

Міністерство світи і науки України
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
фізико-технічний факультет
кафедра радіоелектронної автоматики

В.Б.Мазуренко

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Конспект лекцій

Дніпро

2018

Наведено конспект лекцій з курсу «Фізичні основи неруйнівного контролю», який розроблено відповідно до навчального плану підготовки бакалаврів за напрямком 6.051003 «Приладобудування». Для студентів фізико-технічного факультету ДНУ, що навчаються за напрямком «Приладобудування».

Укладач: старший викладач кафедри радіоелектронної автоматики фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара Мазуренко Валерій Борисович.

ЛЕКЦИЯ №1

Тема: Основные сведения о неразрушающем контроле. Обзор видов и характеристик дефектов.

Оглавление

| | |
|--|---|
| Определение неразрушающего контроля..... | 2 |
| Дефекты..... | 3 |
| Отклонения и дефекты | 3 |
| Устранимые и неустраняемые дефекты | 4 |
| Критические, значительные и малозначительные дефекты | 4 |
| Группы дефектов..... | 5 |
| Методы неразрушающего контроля | 6 |
| Контрольные вопросы по теме | 8 |
| Уровень модуля..... | 8 |
| Уровень курса..... | 8 |

Источники:

1. СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ. ВИДЫ (МЕТОДЫ) И ТЕХНОЛОГИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ
2. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. - М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
3. Методическое пособие. Введение в специальность «Приборы и системы неразрушающего контроля». Методическое пособие.

Определение неразрушающего контроля.

Все виды технического контроля опасных производственных объектов разделяются на 3 группы: разрушающий контроль, повреждающий контроль и неразрушающий контроль.

Разрушающий контроль — это совокупность таких видов контроля, которые требуют отбора проб или вырезки образцов непосредственно из материала объекта», при этом объект остается неработоспособным до восстановления мест отбора проб (образцов). К разрушающим видам контроля относятся:

- лабораторный химический анализ материала объекта (требует насверловки определенного объема стружки);
- металлография (исследование структуры металла объекта; требует вырезки шлифов);
- лабораторные механические испытания материала объекта на растяжение, сжатие, изгиб, ударную вязкость (требует вырезки специальных образцов – темплетов).

Повреждающий контроль – это совокупность таких видов контроля, которые производятся непосредственно на объекте, при этом объект сохраняет работоспособность, но в местах контроля остаются не препятствующие эксплуатации неустраняемые следы. К повреждающим видам контроля, в частности, относятся:

- измерение твердости (твердометрия) вдавливанием специальных инденторов (баббитовые шарики, алмазные наконечники: на поверхности объекта остается вмятина);
- стилоскопирование (оценка марки стали по составу оптического спектра вольтовой дуги, создаваемой между электродом специального прибора - стилоскопа и поверхностью объекта, на которой остается прижег).

Неразрушающий контроль, (НК) – это совокупность таких видов контроля, которые производятся непосредственно на объекте, при этом исправный объект сохраняет работоспособность без каких-либо повреждения материала.

Неразрушающие методы контроля (НМК), или дефектоскопия, - это обобщающее название методов контроля материалов (изделий), используемых для обнаружения нарушения сплошности или однородности макроструктуры, отклонений химического состава и других целей, не требующих разрушения образцов материала и/или изделия в целом.

По степени проникновения в материал все виды неразрушающего контроля условно подразделяются на две категории: поверхностные и объемные.

Поверхностные виды (методы) неразрушающего контроля - это такие, которые позволяют обнаруживать только дефекты, имеющие выход на доступную для контроля поверхность материала объекта.

Объемные виды (методы) неразрушающего контроля это такие, которые дают возможность обнаруживать преимущественно внутренние дефекты материала, а поверхностные дефекты выявляются, только если они достаточно крупные.

НК подразделяют на девять видов: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами. Каждый вид НК осуществляют методами, которые классифицируют по следующим признакам:

- характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- первичным информативным параметрам;
- способам получения первичной информации.

Дефекты

Отклонения и дефекты

В конструкторской и технологической документации на изготовление изделия указываются предельные *отклонения* параметров детали от номинальных значений, при которых изделие будет выполнять свои функции без снижения надежности.

Отклонение считается допустимым, если действительное численное значение параметра изделия не выходит за пределы, установленные нормативной документацией. Выход действительного значения параметра за установленные пределы означает, что рассматриваемая продукция имеет дефект.

Дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией. Дефектами могут быть не только недопустимые нарушения сплошности металла, но и выход размера детали за пределы допуска, несоответствие степени шероховатости поверхности изделия техническим условиям, наличие царапин и сколов на защитном покрытии, высокое содержание вредных примесей в металле т.д.

Устранимые и неустрашимые дефекты

Дефекты, обнаруживаемые при контроле изделий, подразделяют на *явные* и *скрытые*, а также на *устрашимые* и *неустрашимые*. Дефект, устранение которого технически возможно и экономически целесообразно, называют *устрашимым*. Дефект, устранение которого связано с большими трудовыми и материальными затратами, называют *неустрашимым*. Устрашимость и неустрашимость дефекта определяют применительно к рассматриваемым конкретным условиям производства и ремонта с учетом затрат и технических факторов,

Примеры *устрашимых* дефектов: выход действительного размера диаметра вала за наибольший предельный размер: повреждение защитного покрытия; шероховатость поверхности ниже класса, предусмотренного техническими условиями, локальные несплошности др.

Примеры *неустрашимых* дефектов: выход действительного размера диаметра вала за наименьший предельный размер: несоответствие химического состава металла заданному; горячие и холодные трещины, пережог, расширения, рванины и др.

Изделие, имеющее хоть один дефект, относится к некондиционной продукции и не может быть использовано по назначению.

Критические, значительные и малозначительные дефекты

Все встречающиеся отклонения параметров изделия от установленных нормативной документацией в зависимости от их влияния на эффективность и безопасность использования продукции делят на критические, значительные и малозначительные.

Критическими называют отклонения, при наличии которых нельзя использовать продукцию по назначению, так как она не отвечает требованиям безопасности.

Значительными считают отклонения, которые влияют на использование продукции по назначению и на ее долговечность, но не являются критическими.

Малозначительные – отклонения, которые существенно не влияют на использование продукции.

Критические и значительные отклонения считаются дефектами, поэтому для их выявления контроль должен быть сплошным и в отдельных случаях – неоднократным. Малозначительные отклонения не считают дефектами, но для некоторых видов продукции совокупности отклонений, каждое из которых является малозначительным, могут быть эквивалентны

значительному или критическому отклонению и должны быть отнесены к соответствующей категории.

Группы дефектов

В соответствии с назначением приборов измеряемые и определяемые параметры и дефекты разделяют на четыре группы (табл. 1).

Таблица 1

Классификация контролируемых параметров и дефектов

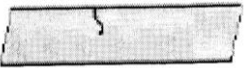







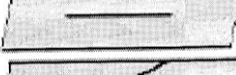

| <i>Группа</i> | <i>Параметры и дефекты</i> |
|---------------|--|
| I | Дефекты типа нарушения сплошности: раковины, трещины, расслоения, поры и др. |
| II | Отклонения размеров - длины, ширины, высоты, диаметра, толщины стенки, а также толщины покрытия и глубины поверхностного слоя (закаленного, обезуглероженного и т.д.) |
| III | Удельная электрическая проводимость, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, остаточная индукция, твердость, влажность, напряжение, структура, химический состав, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, плотность и др. |
| IV | Эмиссия волн напряжения, развитие во времени трещин, увеличение напряжений, утонение стенки, увеличение зазора и т.д. |

Некоторые, наиболее часто встречающиеся виды дефектов в материалах и сварных швах, представлены в таблице 2.

Более детальную информацию о видах дефектов можно получить в справочном пособии [1].

Таблица 2

Виды дефектов в материалах и сварных швах

| <i>Вид дефекта</i> | <i>Эскиз сечения материала</i> |
|-------------------------------------|--|
| Трещина |  |
| Усадочная раковина в отливке |  |
| Шлаковые включения в сварных швах |  |
| Непровар сварного шва |  |
| Дефекты формы сварных швов |  |
| Газовые поры в сварных швах |  |
| Подрез сварного шва |  |
| Расслоение в прокате |  |
| Закат в прокате («ласточкин хвост») |  |
| Заков в поковке («ковочный крест») |  |

Методы неразрушающего контроля

НК подразделяют на девять видов: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами. Каждый вид НК осуществляют методами, которые классифицируют по следующим признакам:

- характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- первичным информативным параметрам;
- способам получения первичной информации.

Выбор метода и прибора неразрушающего контроля для решения задач дефектоскопии, толщинометрии, структуроскопии и технической диагностики зависит от параметров контролируемого объекта и условий его обследования. Ни один из методов и приборов не является универсальным и не может удовлетворить в полном объеме требования практики. Справочник [2] содержит информацию об эффективности методов НК при обнаружении дефектов различного вида, что позволяет выработать рекомендации для

выбора того или иного метода НК для применения в конкретных условиях. В нем, в частности, приводятся следующие таблицы.

- Оценка выявляемости дефектов в металле различными видами НК
- Оценка выявляемости дефектов различными видами НК при выполнении технологических операций (производство электронных приборов)
- Оценка выявляемости дефектов типа нарушения сплошности различными видами НК
- Оценка применяемости видов НК при определении размеров
- Оценка применимости различных видов НК при определении физико-механических свойств

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Перечислите группы технического контроля, выделяемые по степени разрушительного воздействия на объект.
2. Дайте определение неразрушающего контроля (НК).
3. Назовите другое название, используемое для неразрушающего контроля.
4. Назовите категории НК по степени проникновения в материал.
5. Перечислите все виды НК.
6. Что такое отклонение?
7. Что такое дефект?
8. Как разделяются дефекты по степени их устранимости?
9. Что такое неустранимый дефект?
10. Как разделяются дефекты по степени их влияния на безопасность и эффективность использования продукции?
11. На какие четыре группы разделяются контролируемые параметры и дефекты?
12. Назовите 3-4 известных Вам видов дефектов в материалах и сварных швах.

Уровень курса

1. Определение неразрушающего контроля. Отличие от других видов технического контроля. Категории и виды НК.
2. Определение дефекта. Характеристики дефектов, категории, группы, виды дефектов. Примеры дефектов.

Лекція № 2

Тема: Основные характеристики и уравнения электрического поля. Закон Кулона, электрическое поле, напряженность поля. Теорема Гаусса.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Электрическое поле | 1 |
| Взаимодействие зарядов. Закон Кулона | 3 |
| Напряженность поля | 4 |
| Суперпозиция полей | 5 |
| Линии напряженности | 6 |
| Поток вектора напряженности | 7 |
| Теорема Гаусса | 10 |
| Контрольные вопросы по теме | 12 |
| Уровень модуля | 12 |
| Уровень курса | 14 |

Источники:

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

Электрическое поле

Имеется два вида электрических зарядов, условно называемых положительным и отрицательным. Заряды одного знака отталкиваются, разных знаков — притягивают друг друга.

Электрический заряд является неотъемлемым свойством некоторых элементарных частиц. Заряд всех элементарных частиц (если он не равен нулю) одинаков по абсолютной величине. Его можно назвать элементарным зарядом. Обозначать его мы будем буквой e . К числу элементарных частиц принадлежат, например, электрон (несущий отрицательный заряд), протон (несущий положительный заряд) и нейтрон (заряд которого равен нулю). Обычно частицы, несущие заряды разных знаков, присутствуют в равных количествах и распределены в теле с одинаковой плотностью. В этом случае алгебраическая сумма зарядов в любом элементарном объеме тела равна нулю, и каждый такой объем (и тело в целом) будет нейтральным. Если каким-либо образом (например, натиранием) создать в теле избыток частиц одного знака (соответственно недостаток частиц другого знака), тело окажется заряженным. Можно также, не изменяя общего количества положительных и отрицательных частиц, вызвать их перераспределение в теле таким образом, что в одной части тела возникнет избыток зарядов одного знака, в другой — противоположного. Это можно осуществить, приблизив к металлическому телу другое заряженное тело.

Поскольку всякий заряд образуется совокупностью элементарных зарядов, он является целым кратным e :

$$q = \pm Ne \quad (2.1)$$

Однако элементарный заряд настолько мал, что возможную величину макроскопических зарядов можно считать изменяющейся непрерывно. Электрические заряды могут исчезать и возникать вновь. Однако всегда возникают или исчезают одновременно два элементарных заряда противоположных знаков. Поэтому суммарный заряд электрически изолированной системы не может изменяться. Это утверждение носит название закона сохранения электрического заряда.

Единицей заряда в международной системе единиц является кулон (Кл). Элементарный заряд составляет $e \approx 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Если заряженные частицы, например, электроны, могут более или менее свободно перемещаться в пределах тела, то соответствующее вещество способно проводить электрический ток. Единицей силы тока является ампер (А). Если сила тока через некоторое сечение составляет 1 А, то за 1 секунду через это сечение пройдет электрический заряд в 1 кулон.

В соответствии со способностью проводить электрический ток все вещества подразделяются на диэлектрики (или изоляторы), проводники и полупроводники. Идеальных изоляторов в природе не существует. Все вещества хотя бы в ничтожной степени проводят электрический ток. Однако вещества, называемые диэлектриками, проводят ток в 10^{15} – 10^{20} раз хуже, чем вещества, называемые проводниками. Полупроводниками называется обширная группа веществ, которые по способности проводить ток заполняют промежуточную область между проводниками и диэлектриками.

Взаимодействие зарядов. Закон Кулона

Наличие у тела электрического заряда проявляется в том, что такое тело взаимодействует с другими заряженными телами. Тела, несущие заряды одинакового знака (или, как говорят, заряженные одноименно), отталкивают друг друга. Тела, заряженные разноименно, притягиваются друг к другу. Закон, которому подчиняется сила взаимодействия так называемых точечных зарядов, был установлен в 1785 г. Кулоном:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.2)$$

где k — коэффициент пропорциональности, q_1 и q_2 — величины взаимодействующих зарядов, r — расстояние между ними.

В международной системе единиц $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, где ϵ_0 — электрическая постоянная (используются также названия: "диэлектрическая постоянная", "электрическая проницаемость вакуума", "диэлектрическая проницаемость вакуума"). Исследования показали, что ϵ_0 — величина постоянная и ее значение, измеряемое в фарадах на метр, составляет.

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \quad (2.3)$$

Таким образом, в системе СИ закон Кулона записывается следующим образом

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.4)$$

В случае одноименных зарядов сила, вычисленная по формуле (2.4), оказывается положительной (что соответствует отталкиванию между зарядами). В случае разноименных зарядов сила отрицательна (что соответствует притяжению зарядов друг к другу). Сила взаимодействия двух точечных зарядов величиной 1 кулон каждый, находящихся на расстоянии в 1 метр друг от друга составляет около миллиона тонн.

Зная закон, взаємодія між точечними зарядами, можна вирахувати силу взаємодія між зарядами, зосередженими на тілах кінцевих розмірів. Для цього потрібно розбити кожен із зарядів на стільки малих зарядів, щоб їх можна було вважати точечними, вирахувати по формулі (2.4) силу взаємодія між зарядами, взятими попарно, і потім виконати векторне додавання цих сил. Математично ця операція повністю виконується шляхом інтегрування по об'єму.

Напруженість поля

Взаємодія між зарядами здійснюється через електричне поле. Будь-який заряд змінює властивості оточуючого його простору — створює в ньому електричне поле. Це поле проявляє себе в тому, що поміщений в яку-небудь його точку електричний заряд опиняється під дією сили. Отже, для того щоб з'ясувати, чи є в даному місці електричне поле, потрібно помістити туди заряджене тіло (для краткості говорять просто: "заряд") і встановити, чи відчуває воно дію електричної сили чи ні. По величині сили, діючої на даний «пробний» заряд, можна судити про «інтенсивність» поля.

Якщо деякий пробний точечний заряд $q_{пр}$ помістити в поле, створюване точечним зарядом q , то згідно з законом Кулона на нього буде діяти сила величиною:

$$F = q_{пр} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \right) \quad (2.5)$$

З урахуванням не тільки величини, але й напрямку дії сили (рис.2.1), в векторній формі можна записати:

$$\vec{F} = q_{пр} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \right) \vec{R} \quad (2.6)$$

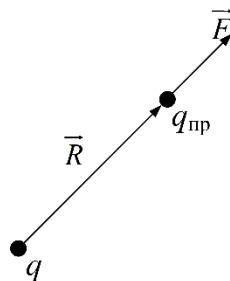


Рис. 2.1 Вектори расстояния и силы

З формули (2.6) випливає, що сила, діюча на пробний заряд, залежить не тільки від величин, що визначають поле (від q і \vec{R}), але й від величини

пробного заряда $q_{пр}$. Если брать разные по величине пробные заряды, то и силы, которые они испытывают в данной точке поля, будут различны. Однако, отношение $\frac{F}{q_{пр}}$ для всех пробных зарядов будет одно и то же, и оно зависит только от величин q и r , определяющих поле в данной точке. Это отношение и есть та величина, которая характеризует электрическое поле:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}} \quad (2.7)$$

Векторную величину (2.7) называют *напряженностью* электрического поля в данной точке. В соответствии с формулой (2.7) напряженность электрического поля численно равна силе, действующей на единичный точечный заряд, находящийся в данной точке поля. Направление вектора \vec{E} совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

Как следует из формул (2.6) и (2.7), напряженность поля точечного заряда пропорциональна величине заряда q и обратно пропорциональна квадрату расстояния r от заряда до данной точки поля:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (2.8)$$

В векторном виде

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{R}}{r} \quad (2.9)$$

Направлен вектор \vec{E} вдоль радиальной прямой, проходящей через заряд и данную точку поля, от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен.

Суперпозиция полей

Опыт показывает, что сила, с которой система зарядов действует на некоторый не входящий в систему заряд, равна векторной сумме сил, с которыми действует на данный заряд каждый из зарядов системы в отдельности. Отсюда вытекает, что напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum \vec{E}_i \quad (2.10)$$

Последнее утверждение носит название принципа суперпозиции (наложения) электрических полей.

Принцип суперпозиции позволяет вычислить напряженность поля любой системы зарядов. Разбивая протяженные заряды на достаточно малые доли dq , любую систему зарядов можно свести к совокупности точечных зарядов. Вклад каждого из таких зарядов в результирующее поле вычисляется по формуле (2.9).

Линии напряженности

Электрическое поле можно задать, указав для каждой точки величину и направление вектора E . Совокупность этих векторов образует поле вектора напряженности электрического поля. Линии напряженности проводятся таким образом, чтобы касательная к ним в каждой точке совпадала с направлением вектора \vec{E} . Густота линий выбирается так, чтобы количество линий, пронизывающих единицу поверхности перпендикулярной к линиям, было равно численному значению вектора \vec{E} . Тогда по картине линий напряженности можно судить о направлении и величине вектора \vec{E} в разных точках пространства (рис. 2.2).

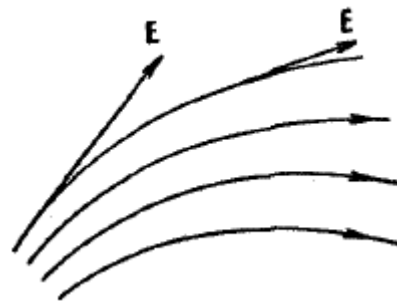


Рис. 2.2 Линии напряженности электрического поля

Линии \vec{E} одиночного, изолированного точечного заряда представляют собой совокупность радиальных прямых, направленных от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен (рис. 2.3). Линии одним концом опираются на заряд, другим уходят в бесконечность. Линии нигде, кроме заряда, не начинаются и не заканчиваются; они, начавшись на заряде, уходят в бесконечность (заряд положителен), либо, приходя из бесконечности, заканчиваются на заряде (заряд отрицателен). Это свойство линий E является общим для всех электростатических полей, т. е. полей, создаваемых любой системой неподвижных зарядов: линии напряженности могут начинаться или заканчиваться лишь на зарядах либо уходить в бесконечность.

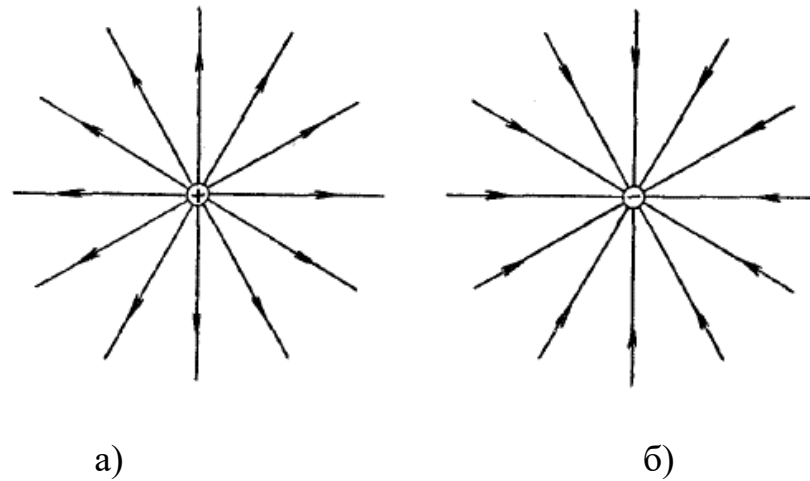


Рис. 2.3 Поле одиночного заряда: а) - положительного, б) - отрицательного

Ниже, на рис. 2.4, показана картина линий \vec{E} поля *диполя* - совокупности близко расположенной пары одинаковых по величине, но разных по знаку точечных зарядов.

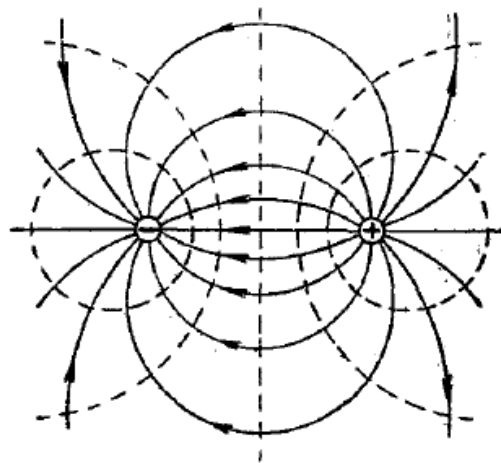


Рис. 2.4 Поле диполя

Поток вектора напряженности

Введем понятие потока вектора напряженности электрического поля. Поток вектора напряженности электрического поля - это есть число линий напряженности \vec{E} , пронизывающих некоторую поверхность S .

Если поверхность представляет собой плоскую площадку, а величина напряженности поля в пределах площадки одинакова, и при этом вектор напряженности перпендикулярен поверхности, то тогда поток определяется как произведение величины вектора напряженности E на площадь поверхности площадки S :

$$\Phi = ES \quad (2.11)$$

Однако, если при этом условие перпендикулярности не соблюдается, то в формулу добавляется $\cos \alpha$, где α - угол между вектором \vec{E} и нормалью к поверхности площадки \vec{n} (рис. 2.5):

$$\Phi = ES \cos \alpha \quad (2.12)$$

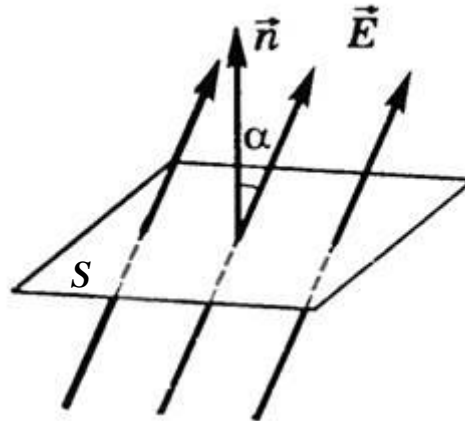


Рис. 2.5 Поток вектора через плоскую поверхность

Формула (2.12), по существу, выражает скалярное произведение векторов \vec{E} и \vec{S} , где \vec{S} – вектор, перпендикулярный рассматриваемой плоской поверхности (по нормали к поверхности \vec{n}), величина которого равна площади этой поверхности S .

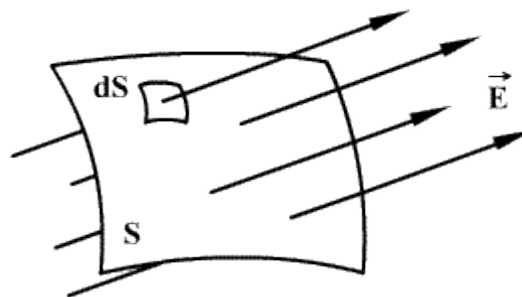


Рис. 2.6 Разбиение поверхности на элементарные участки dS

Рассмотрим поверхность произвольной формы и поток вектора напряженности через такую поверхность. Для того, чтобы вычислить поток вектора через такую поверхность, всю эту поверхность разбивают на бесконечное число бесконечно малых участков dS (рис. 2.6) и каждому из этих участков приписывают так называемый векторный элемент поверхности \vec{dS} . Под векторным элементом поверхности в некоторой точке, лежащей на этой поверхности, понимают вектор, направленный перпендикулярно данной поверхности в указанной точке (по нормали); величина этого вектора соответствует бесконечно малой площади, на которую он опирается (фактически, площади точки). Элементарный вектор поверхности обычно

обозначают как \vec{dS} . Поток вектора через элементарную, бесконечно малую, площадь поверхности представляет собой скалярное произведение двух векторов \vec{E} и \vec{dS} . Тогда полный поток вектора через всю поверхность произвольной формы получаем путем вычисления поверхностного интеграла, рассчитываемого по всей поверхности S .

$$\Phi = \iint_S \vec{E} \vec{dS} \quad (2.13)$$

Понятие потока вектора напряженности поля играет большую роль в учении об электричестве и магнетизме.

Заметим, что поток (2.13) есть алгебраическая величина, причем знак его зависит от выбора направления нормали к элементарным площадкам, на которые разбивается поверхность S при вычислении Φ . Изменение направления нормали на противоположное изменяет знак у потока Φ .

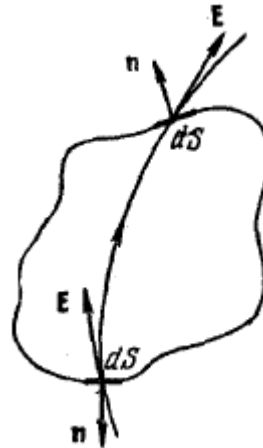


Рис. 2.7 Знак произведения вектора напряженности и нормали к поверхности

В случае замкнутых поверхностей принято вычислять поток, выходящий из охватываемой поверхностью области наружу. Соответственно под нормалью к dS всегда подразумевается обращенная наружу, т. е. внешняя, нормаль. Поэтому в тех местах, где вектор \vec{E} направлен наружу (т. е. линия \vec{E} выходит из объема, охватываемого поверхностью), произведение $\vec{E} \vec{dS}$ будет положительно; в тех же местах, где вектор \vec{E} направлен внутрь (т. е. линия \vec{E} входит в объем, охватываемый поверхностью), произведение $\vec{E} \vec{dS}$ будет отрицательным (рис. 2.7).

Теорема Гаусса

Эта теорема может быть сформулирована следующим образом: поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов (рис. 2.8), деленной на ε_0 :

$$\iint_s \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum q_i \quad (2.14)$$

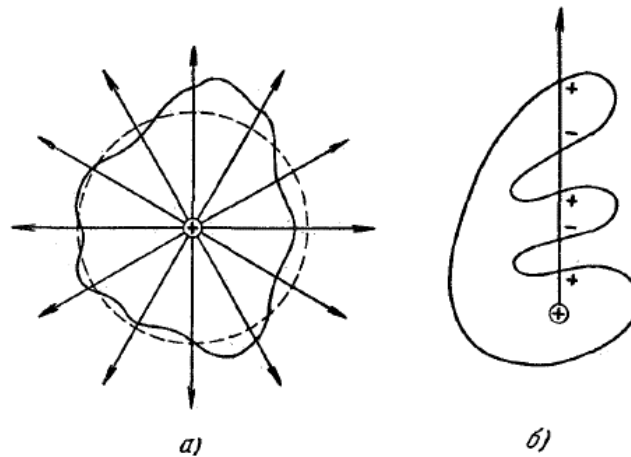


Рис. 2.8 Замкнутая поверхность с заключенными внутри поверхности зарядами

В частности, если внутри поверхности заряды отсутствуют, поток равен нулю. В этом случае каждая линия напряженности поля (создаваемого зарядами, расположенными вне поверхности) пересекает поверхность четное число раз, выходя наружу столько же раз, сколько и входя внутрь (рис. 2.9). В итоге вклад, вносимый в поток каждой из линий, будет равен нулю.

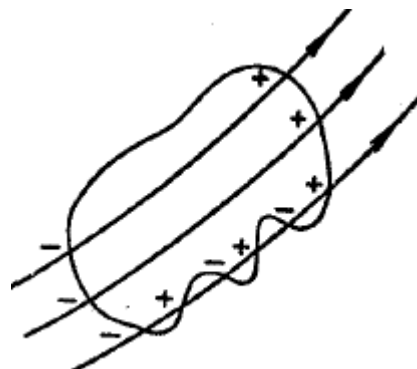


Рис. 2.9 Замкнутая поверхность, не содержащая внутри себя зарядов

Если заряд распределен внутри замкнутой поверхности непрерывно с объемной плотностью ρ , теорема Гаусса должна быть записана следующим образом:

$$\iint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum \iiint_V \rho dV \quad (2.15)$$

где интеграл справа берется по объему V , охватываемому поверхностью S .

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Какая элементарная частица несет отрицательный заряд?
2. Какая элементарная частица несет положительный заряд?
3. Какие известные Вам элементарные частицы не несут электрического заряда?
4. Почему физические тела в большинстве случаев электрически нейтральны?
5. Величина заряда физического тела может принимать любое значение?
6. Почему на практике мы не замечаем ступенчатость изменения электрического заряда?
7. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
8. В каких единицах измеряется электрический заряд?
9. В каких единицах измеряется сила тока?
10. Какова связь между единицами измерения заряда и тока?
11. Как разделяются вещества по их способности проводить электрический ток?
12. Какой фактор определяет способность твердого вещества быть проводником электрического тока?
13. Какой факт установил Кулон своими исследованиями?
14. Запишите формулу закона Кулона в международной системе единиц.
15. Какие термины могут применяться для указания на электрическую постоянную?
16. Если величина одного из двух зарядов увеличится в четыре раза при сохранении расстояния между ними, как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
17. Если величина каждого из двух зарядов уменьшится в три раза при сохранении расстояния между ними, как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
18. Если расстояние между зарядами увеличится в два раза при сохранении величины обоих зарядов, то как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
19. Если изменится полярность обоих зарядов при сохранении величины обоих зарядов и расстояния между ними, то как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
20. Можно ли пользоваться формулой закона Кулона для расчета силы взаимодействия между двумя объемными телами?

21. Как на основании закона Кулона для точечных зарядов определить силу взаимодействия между двумя объемными телами?
22. Каким образом проявляет себя электрическое поле?
23. Какую величину называют напряженностью электрического поля?
24. Напряженность электрического поля - это величина векторная или скалярная?
25. Какими двумя параметрами характеризуется напряженность электрического поля в данной точке пространства?
26. Каким образом величина напряженности электрического поля зависит от величины заряда, порождающего это поле?
27. Каким образом величина напряженности электрического поля зависит от расстояния до заряда, порождающего это поле?
28. Каким образом величина напряженности электрического поля зависит от величины пробного заряда?
29. Как связано направление вектора напряженности электрического поля и знак заряда, порождающего это поле?
30. Как связаны между собой направление вектора напряженности электрического поля и знак пробного заряда?
31. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
32. Как направлены линии напряженности?
33. Как выбирается густота линий напряженности электрического поля?
34. Где начинаются линии напряженности электрического поля?
35. Где заканчиваются линии напряженности электрического поля?
36. Нарисуйте линии напряженности электрического поля одиночного положительного заряда.
37. Нарисуйте линии напряженности электрического поля одиночного отрицательного заряда.
38. Нарисуйте линии напряженности электрического поля, образуемого диполем.
39. Как можно определить понятие "поток вектора напряженности электрического поля"?
40. Если поверхность представляет собой плоскую площадку, а величина напряженности поля в пределах площадки одинакова, и при этом вектор напряженности перпендикулярен поверхности, то как можно рассчитать поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
41. Если поверхность представляет собой плоскую площадку, а величина напряженности поля в пределах площадки одинакова, и при этом вектор напряженности не перпендикулярен поверхности, то как можно

- рассчитать поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
42. Что такое векторный элемент поверхности?
 43. Какой формулой определяется поток напряженности электрического поля через поверхность произвольной формы?
 44. Как выбирается направление нормали для замкнутых поверхностей?
 45. Чему равен поток напряженности электрического поля через замкнутую поверхность?
 46. Сформулируйте теорему Гаусса для случая охвата поверхностью отдельных зарядов.
 47. Сформулируйте теорему Гаусса для случая охвата поверхностью объемно распределенного заряда.
 48. Если число зарядов внутри замкнутой поверхности возрастет в четыре раза, то как изменится поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
 49. Если объемная плотность заряда внутри замкнутой поверхности в каждой точке уменьшится в четыре раза, то как изменится поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
 50. Если количество протонов и электронов внутри замкнутой поверхности одинаково, то чему равен поток напряженности электрического поля через эту поверхность?

Уровень курса

1. Электрическое поле. Закон Кулона.
2. Напряженность электрического поля.
3. Суперпозиция полей. Линии напряженности.
4. Поток вектора напряженности электрического поля.
5. Теорема Гаусса.

Лекція № 3

Тема: Поля тел различной формы. Потенциал.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Электрические поля заряженных тел различной формы..... | 1 |
| Поле бесконечной однородно заряженной плоскости..... | 2 |
| Поле двух разноименно заряженных плоскостей..... | 3 |
| Поле бесконечного заряженного цилиндра. | 4 |
| Поле заряженной сферической поверхности..... | 6 |
| Поле объемно заряженной сферы. | 7 |
| Потенциал | 8 |
| Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом . | 9 |
| Эквипотенциальные поверхности | 10 |
| Контрольные вопросы по теме | 12 |
| Уровень модуля..... | 12 |
| Уровень курса..... | 14 |

Источники:

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

Электрические поля заряженных тел различной формы

Поле бесконечной однородно заряженной плоскости.

Рассмотрим поле, создаваемое бесконечной плоскостью, заряженной с постоянной поверхностной плотностью σ ; для определенности будем считать заряд положительным. Из соображений симметрии вытекает, что напряженность в любой точке поля имеет направление, перпендикулярное к плоскости. В самом деле, поскольку плоскость бесконечна и заряжена однородно (т. е. с постоянной плотностью), нет никаких оснований для того, чтобы сила, действующая на пробный заряд, отклонялась в какую-либо сторону от нормали к плоскости. В симметричных относительно плоскости точках напряженность поля будет одинакова по величине и противоположна по направлению.

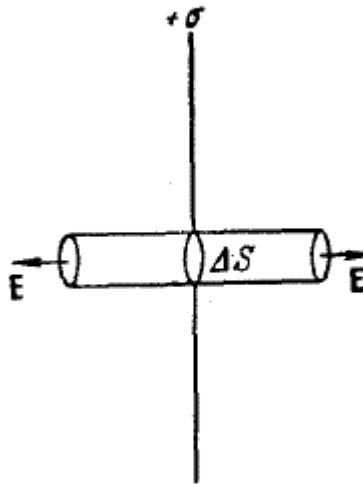


Рис. 3.1 Поверхность для применения теоремы Гаусса

Представим цилиндрическую поверхность с образующими, перпендикулярными к плоскости и основаниями величины ΔS , расположенными относительно плоскости симметрично (рис. 3.1). Применим к этой поверхности теорему Гаусса. Поток через боковую часть поверхности будет отсутствовать, так как вектор \vec{E} направлен вдоль оси цилиндра и линии напряженности не пересекают боковую поверхность цилиндра. Вектор \vec{E} перпендикулярен основаниям цилиндра, то есть через каждое основание проходит поток величиной $E\Delta S$. Таким образом, суммарный поток через всю поверхность цилиндра будет равен $2E\Delta S$. Внутри поверхности заключен заряд $\sigma\Delta S$. Согласно теореме Гаусса должно выполняться условие:

$$2E\Delta S = \frac{\sigma\Delta S}{\varepsilon_0}, \quad (3.1)$$

откуда

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (3.2)$$

Полученный результат не зависит от длины цилиндра. Таким образом, на любых расстояниях от плоскости напряженность поля одинакова по величине. Картина линий напряженности выглядит так, как показано на рис. 3.2. Для отрицательно заряженной плоскости результат будет таким же, лишь направление вектора \vec{E} и линий напряженности изменится на обратное.

Если взять плоскость конечных размеров, например, заряженную тонкую пластинку, то полученный выше результат будет справедливым лишь для точек, расстояние которых от края пластинки значительно превышает расстояние от самой пластинки (на рис. 3.3 область этих точек обведена пунктирной кривой). По мере удаления от плоскости или приближения к ее краям поле будет все больше отличаться от поля бесконечной заряженной плоскости.

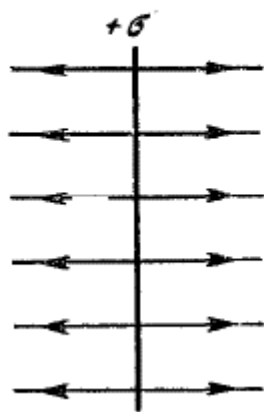


Рис. 3.2

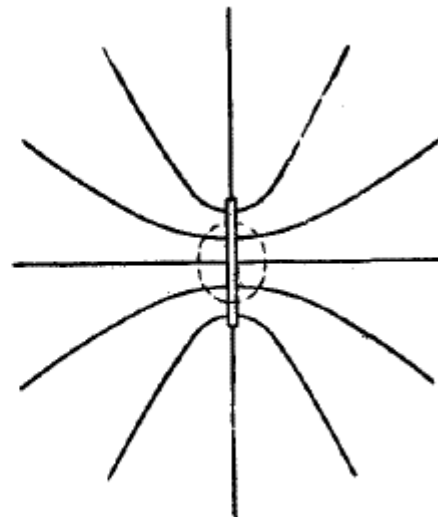


Рис. 3.3

Характер поля на больших расстояниях легко представить, если учесть, что на расстояниях, значительно превышающих размеры пластинки, создаваемое ею поле можно рассматривать как поле точечного заряда.

Поле двух разноименно заряженных плоскостей.

Поле двух параллельных бесконечных плоскостей, заряженных разноименно с одинаковой по величине постоянной поверхностной плотностью σ , можно найти как суперпозицию полей, создаваемых каждой из плоскостей в отдельности. Легко видеть (рис. 3.4), что в области между

плоскостями складываемые поля имеют одинаковое направление, так что результирующая напряженность равна

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \tag{3.3}$$

Вне объема, ограниченного плоскостями, складываемые поля имеют противоположные направления, так что результирующая напряженность равна нулю.

Таким, образом, поле оказывается сосредоточенным между плоскостями. Напряженность поля во всех точках этой области одинакова по величине и по направлению. Поле, обладающее такими свойствами, называется однородным. Линии напряженности однородного поля представляют собой совокупность параллельных равноотстоящих прямых.

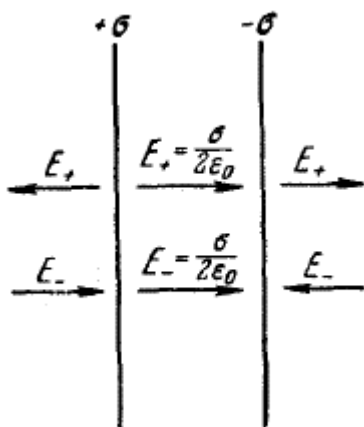


Рис. 3.4



Рис. 3.5

Полученный результат приближенно справедлив и в случае плоскостей конечных размеров, если расстояние между плоскостями значительно меньше их линейных размеров (плоский конденсатор). В этом случае заметные отклонения поля от однородности и значения напряженности от $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$ наблюдаются только вблизи краев пластин (рис. 3.5).

Поле бесконечного заряженного цилиндра.

Рассмотрим поле, создаваемое бесконечной цилиндрической поверхностью радиуса R , заряженной с постоянной поверхностной плотностью σ .

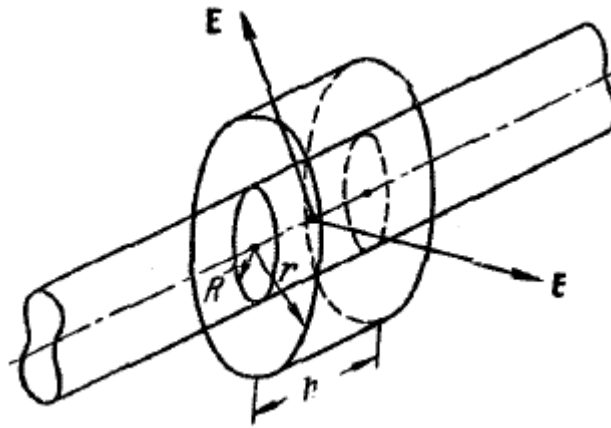


Рис. 3.6 Расчет поля цилиндра

Из соображений симметрии следует, что напряженность поля в любой точке должна быть направлена вдоль радиальной прямой, перпендикулярной к оси цилиндра, а величина напряженности может зависеть лишь от расстояния r от оси цилиндра. Представим себе мысленно коаксиальную с заряженной поверхностью замкнутую цилиндрическую поверхность радиуса r и высоты h (рис. 3.6). Поток через основания этого цилиндра равен нулю, для боковой поверхности $E = E(r)$ (заряд считаем положительным). Следовательно, поток линий \vec{E} через эту замкнутую поверхность будет равен $E(r) \cdot 2\pi r h$. Если $r > R$, внутрь поверхности попадает заряд $q = \lambda h$, где λ – линейная плотность заряда. Применяя теорему Гаусса, получаем

$$E(r) \cdot 2\pi r h = \frac{\lambda h}{\varepsilon_0}, \quad (3.4)$$

откуда

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\lambda}{r} \quad (r \geq R) \quad (3.5)$$

Если $r < R$, рассматриваемая замкнутая поверхность не содержит внутри зарядов, вследствие чего $E(r) = 0$.

Таким образом, внутри заряженной цилиндрической поверхности бесконечной длины поле отсутствует. Напряженность поля вне поверхности определяется лишь линейной плотностью заряда λ и расстоянием r от оси цилиндра. Поле отрицательно заряженного цилиндра отличается от поля цилиндра, заряженного положительно, только направлением вектора \vec{E} .

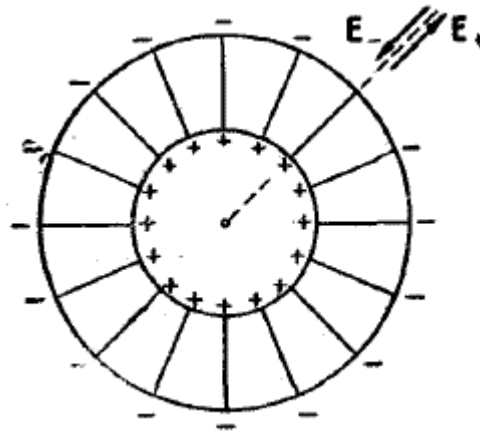


Рис. 3.7 Коаксиальная линия

Из формулы (3.5) следует, что, уменьшая радиус цилиндра R (при неизменной линейной плотности заряда λ , вблизи поверхности цилиндра можно получить очень сильное поле, т. е. поле с очень большой напряженностью E .

Учитывая, что $\lambda = 2\pi R\sigma$, для напряженности в непосредственной близости от поверхности ($r = R$) в соответствии с (3.5) получаем

$$E(R) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (3.6)$$

С помощью принципа суперпозиции легко найти поле двух коаксиальных цилиндрических поверхностей, заряженных с одинаковой по величине, но отличающейся знаком линейной плотностью λ (рис. 3.7). Внутри меньшего и вне большего цилиндров поле отсутствует. В зазоре между цилиндрами величина напряженности поля определяется формулой (3.5). Это справедливо и для цилиндрических поверхностей конечной длины, если зазор между поверхностями значительно меньше их длины (цилиндрический конденсатор). Заметные отступления от поля поверхностей бесконечной длины будут наблюдаться только вблизи краев цилиндров.

Поле заряженной сферической поверхности.

Поле, создаваемое сферической поверхностью радиуса R , заряженной с постоянной поверхностной плотностью σ , будет, очевидно, отличаться центральной симметрией. Это означает, что направление вектора \vec{E} в любой точке проходит через центр сферы, а величина напряженности является функцией расстояния r от центра сферы. Вообразим сферическую поверхность радиуса r . Для всех точек этой поверхности $E = E(r)$. Если $r > R$, внутрь поверхности попадает весь заряд q , создающий рассматриваемое поле. Следовательно,

$$E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad (3.7)$$

откуда

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (r \geq R) \quad (3.8)$$

Сферическая поверхность радиуса r , меньшего, чем R , не будет содержать зарядов, вследствие чего для $r < R$ получается $E(r) = 0$.

Таким образом, внутри сферической поверхности, заряженной с постоянной поверхностной плотностью σ , поле отсутствует. Вне этой поверхности поле имеет такой же вид, как поле точечного заряда той же величины, помещенного в центре сферы.

Заменив в (3.8) q через $4\pi R^2\sigma$ и положив $r = R$, получим для напряженности поля вблизи заряженной сферической поверхности

$$E(R) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (3.9)$$

[ср. с формулой (3.6)].

Используя принцип суперпозиции, легко показать, что поле двух концентрических сферических поверхностей (сферический конденсатор), несущих одинаковые по величине и противоположные по знаку заряды $+q$ и $-q$, сосредоточено в зазоре между поверхностями, причем величина напряженности поля в этом зазоре определяется формулой (3.8).

Поле объемно заряженной сферы.

Рассмотрим сферу радиуса R , заряженную с постоянной объемной плотностью ρ . Поле такой сферы, очевидно, обладает центральной симметрией. Легко видеть, что для поля вне сферы получается тот же результат [в том числе и формула (3.8)], что и в случае поверхностно заряженной сферы. Однако для точек внутри сферы результат будет иным. В самом деле, сферическая поверхность радиуса r ($r < R$) заключает в себе заряд, равный $\rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3$.

Следовательно, теорема Гаусса для такой поверхности запишется следующим образом:

$$E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (3.10)$$

откуда, заменяя ρ через $\frac{q}{\frac{4}{3}\pi R^3}$, получаем

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r \quad (r \leq R) \quad (3.11)$$

Таким образом, внутри сферы напряженность поля растет линейно с расстоянием r от центра сферы. Вне сферы напряженность убывает по такому же закону, как и у поля точечного Заряда.

Потенциал

Как известно, сила при перемещении тела совершает работу. В случае электрического поля сила, действующая на заряд, зависит от напряженности поля. При перемещении единичного заряда (величина которого равна единице заряда – 1 Кл) по некоторому пути внутри поля, который можно обозначить как кривая L , совершается работа

$$A = \int_L \vec{E} d\vec{l} \quad (3.12)$$

Важно отметить, что электростатическое поле, то есть поле, создаваемое неподвижными зарядами, является *потенциальным*. Это означает, что работа (3.12) при перемещении заряда вдоль кривой L зависит только от того, где находится начальная и где находится конечная точки кривой L , а от конфигурации этой кривой – никак не зависит. В частности, если кривая заканчивается в той же точке, где и начиналась, тогда справедливо равенство

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0 \quad (3.13)$$

Это означает, что работа поля при перемещении заряда по замкнутому контуру (точно также, как и работа внешней силы при перемещении заряда по замкнутому контуру внутри электрического поля) равна нулю.

Если положительную работу при перемещении заряда совершает внешняя сила, то потенциальная энергия заряда возрастает. Если работа, которую выполняет внешняя сила, отрицательна, то потенциальная энергия заряда убывает.

Потенциалом электрического поля ϕ в данной точке называется потенциальная энергия единичного заряда, находящегося в этой точке. Численно потенциал равен работе, которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки в бесконечность. Такую же по величине работу необходимо совершить против

сил электрического поля для того, чтобы переместить единичный положительный заряд из бесконечности в данную точку поля. При этом потенциал и работа имеют противоположные знаки

$$\varphi_a = -\int_a^{\infty} \vec{E} d\vec{l} \quad (3.14)$$

Принято считать, что потенциал электрического поля в бесконечности равен нулю. Можно показать, что потенциал электрического поля, образуемого точечным зарядом q_0 на расстоянии r от этого заряда

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r} \quad (3.15)$$

Поскольку электростатическое поле является потенциальным, то работа, совершаемая полем при перемещении единичного положительного заряда из точки a в точку b равна разности потенциалов поля в этих двух точках

$$A = \varphi_a - \varphi_b \quad (3.16)$$

Если заряд, на который действует поле не единичный, и его величина равна q , тогда работа равна

$$A = q(\varphi_a - \varphi_b) \quad (3.17)$$

Следовательно, работа по удалению заряда q из точки a в бесконечность равна

$$A = q\varphi_a \quad (3.18)$$

Если имеется несколько зарядов, которые в совокупности образуют электрическое поле, тогда потенциал поля, создаваемого системой зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов в отдельности. В то время как напряженности поля складываются при наложении полей векторно, потенциалы складываются алгебраически. По этой причине вычисление потенциалов оказывается обычно гораздо проще, чем вычисление напряженностей электрического поля.

Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом

Поскольку в соответствии с (3.14) потенциал представляет собой интеграл от напряженности, взятый по кривой, то напряженность поля, соответственно, равна производной от потенциала по участку кривой

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{d\vec{l}} \quad (3.19)$$

Через \vec{l} и соответственно $d\vec{l}$ обозначено произвольно выбранное направление в пространстве. Если перейти к проекциям \vec{E} и $d\vec{l}$ на оси координат, то получаем

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} \quad (3.20)$$

откуда

$$\vec{E} = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z = -\left(\vec{i}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) \quad (3.21)$$

Выражение, находящееся в скобках, называется градиентом скаляра. В рассматриваемом случае это градиент скаляра φ и обозначается $\text{grad } \varphi$ или $\nabla\varphi$. Используя понятие градиента, можно записать

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \quad (3.22)$$

Эквипотенциальные поверхности

Для наглядного изображения поля можно вместо линий напряженности воспользоваться поверхностями равного потенциала или эквипотенциальными поверхностями. Как следует из ее названия, эквипотенциальная поверхность – это такая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал.

Направление нормали к эквипотенциальной поверхности будет совпадать с направлением вектора \vec{E} в той же точке. Соответственно, линии напряженности в каждой точке ортогональны эквипотенциальным поверхностям.

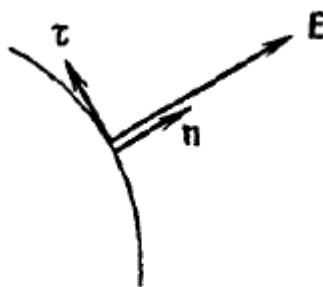


Рис. 3.8

Эквипотенціальную поверхность можно провести через любую точку поля. Следовательно, таких поверхностей может быть построено бесконечное множество. Условливаются, однако, проводить поверхности таким образом, чтобы разность потенциалов $\varphi_{i+1} - \varphi_i$ для двух соседних поверхностей была всюду одна и та же. Тогда по густоте эквипотенциальных поверхностей можно судить о величине напряженности поля. Действительно, чем гуще располагаются эквипотенциальные поверхности, тем быстрее изменяется потенциал при перемещении вдоль нормали к поверхности. Следовательно, тем больше в данном месте $\text{grad } \varphi$, а значит и \vec{E} .

На рис. 3.9 показаны эквипотенциальные поверхности (точнее, их пересечения с плоскостью чертежа) для поля точечного заряда. В соответствии с характером изменения \vec{E} эквипотенциальные поверхности при приближении к заряду становятся гуще.

Для однородного поля эквипотенциальные поверхности, очевидно, представляют собой систему равноотстоящих друг от друга плоскостей, перпендикулярных к направлению поля.

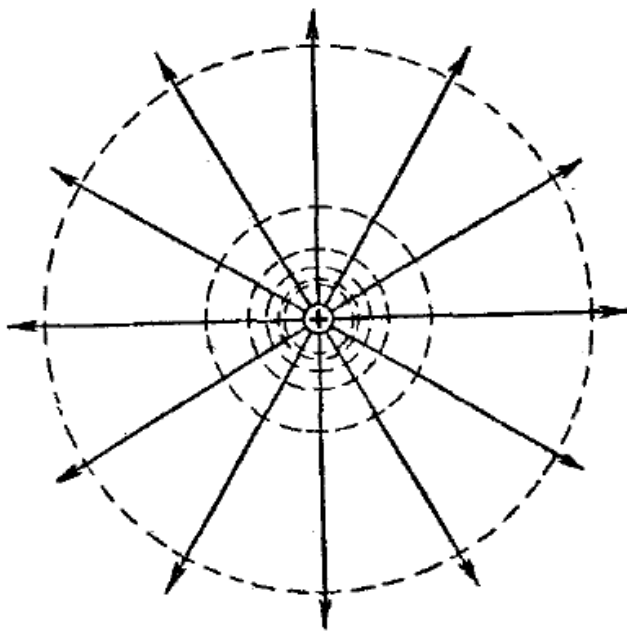


Рис. 3.9

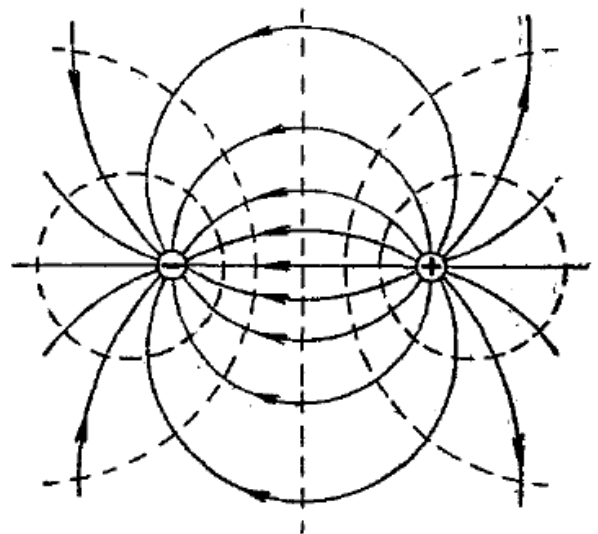


Рис. 3.10

На рис. 3.10 изображены эквипотенциальные поверхности и линии напряженности для поля диполя. Из рис. 3.9 и 3.10 видно, что при одновременном использовании и эквипотенциальных поверхностей, и линий напряженности картина поля получается особенно наглядной.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительно заряженной бесконечной пластины.
2. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля отрицательно заряженной бесконечной пластины.
3. Запишите формулу, связывающую плотность электрического заряда бесконечной пластины и величину напряженности электрического поля, создаваемого этой пластиной.
4. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительно заряженной пластины конечных размеров.
5. Нарисуйте, как выглядит электрическое поле пластины конечных размеров на расстояниях, значительно превышающих размеры пластины.
6. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительного точечного заряда.
7. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля отрицательного точечного заряда.
8. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля диполя.
9. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя противоположно заряженными с одинаковой величиной плотности заряда бесконечными пластинами.
10. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя противоположно заряженными с одинаковой величиной плотности заряда пластинами конечных размеров.
11. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя противоположно заряженными с одинаковой величиной плотности заряда пластинами на расстояниях, с которых пластины могут рассматриваться как точки.
12. Запишите формулу, связывающую значение напряженности электрического поля между двумя противоположно заряженными бесконечными пластинами с поверхностной плотностью заряда этих пластин.
13. Запишите формулу, связывающую значение напряженности электрического поля за пределами двух противоположно заряженных бесконечных пластин с поверхностной плотностью заряда этих пластин.

14. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительно заряженного бесконечного полого цилиндра.
15. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля снаружи заряженного бесконечного полого цилиндра.
16. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля вблизи поверхности заряженного бесконечного полого цилиндра.
17. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля внутри заряженного бесконечного полого цилиндра.
18. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя заряженными бесконечными полыми цилиндрами.
19. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля за пределами внешнего из двух противоположно заряженных бесконечных полых цилиндров.
20. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля в пространстве, которое ограничено внутренним из двух противоположно заряженных бесконечных полых цилиндров.
21. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля снаружи заряженной бесконечной полой сферы.
22. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля внутри заряженной бесконечной полой сферы.
23. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля вблизи поверхности заряженной бесконечной полой сферы.
24. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя полыми сферами.
25. Сравните формулы для значения напряженности электрического поля вблизи поверхности бесконечной пластины, вблизи поверхности бесконечного полого цилиндра и вблизи поверхности полой сферы. Как бы Вы объяснили сходство и различие этих формул?
26. Внутри какого конденсатора более высокая напряженность электрического поля: составленного из двух пластин, составленного из двух цилиндров, составленного из двух сфер?
27. Какой формулой выражается работа, совершаемую полем при перемещении единичного заряда вдоль кривой L ?
28. Чему равна работа электрического поля при перемещении электрического заряда по замкнутой кривой?
29. В чем состоит характерная особенность поля, которое является потенциальным?
30. Почему электрическое поле называют потенциальным?
31. Что называется потенциалом электрического поля?

32. Чему численно равен потенциал электрического поля в данной точке?
33. Чему равен потенциал электрического поля в бесконечности? Как установлено это значение?
34. Как через потенциал выразить работу поля по перемещению заряда величиной q из точки a в точку b ?
35. Как получить потенциал электрического поля, образованного несколькими зарядами, в некоторой точке, если известны потенциалы полей, создаваемых каждым из этих зарядов в отдельности, в данной точке?
36. Как связаны напряженность и потенциал электрического поля в данной точке?
37. Что называют эквипотенциальной поверхностью?
38. Как связано направление вектора напряженности электрического поля в данной точке с формой эквипотенциальной поверхности в этой точке?
39. На каком расстоянии друг от друга на рисунке обычно проводят линии эквипотенциальных поверхностей?
40. Нарисуйте эквипотенциальные линии электрического поля, образованного точечным зарядом.
41. Нарисуйте эквипотенциальные линии электрического поля, образованного диполем.

Уровень курса

1. Электрическое поле бесконечной однородно заряженной пластины. Поле двух разноименно заряженных пластин.
2. Электрическое поле бесконечного заряженного цилиндра.
3. Электрическое поле заряженной сферической поверхности. Поле объемно заряженной сферы.
4. Потенциал электрического поля.
5. Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом.
6. Эквипотенциальные поверхности.

Лекція № 4

Тема: Электрическое поле в диэлектрике. Сегнетоэлектрики. Пьезоэлектрики. Проводник в электрическом поле.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Электрическое поле в диэлектриках | 2 |
| Полярные и неполярные молекулы..... | 2 |
| Диполь в однородном электрическом поле..... | 3 |
| Поляризация диэлектриков | 4 |
| Описание поля в диэлектрике..... | 6 |
| Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков | 7 |
| Сегнетоэлектрики..... | 8 |
| Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект..... | 9 |
| Проводники в электрическом поле | 11 |
| Равновесие зарядов на проводнике | 11 |
| Проводник во внешнем электрическом поле..... | 14 |
| Электрическая емкость..... | 15 |
| Конденсаторы | 16 |
| Контрольные вопросы по теме | 18 |
| Уровень модуля..... | 18 |
| Уровень курса..... | 20 |

Источники:

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

Электрическое поле в диэлектриках

Полярные и неполярные молекулы

Если диэлектрик внести в электрическое поле, то это поле и сам диэлектрик претерпевают существенные изменения. Чтобы понять, почему это происходит, нужно учесть, что в составе атомов и молекул имеются положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны. Электроны движутся в пределах атома или молекулы с огромной скоростью, непрерывно изменяя свое положение относительно ядер. Поэтому действие каждого электрона на внешние заряды будет примерно таким, как если бы он находился в покое в некоторой точке, полученной усреднением положения электрона по времени. Эту точку условно можно назвать "центром тяжести" электрона.

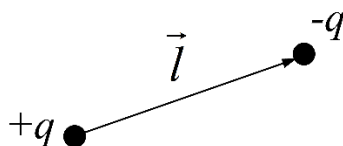


Рис. 4.1

В отсутствие внешнего электрического поля центры тяжести положительных и отрицательных зарядов внутри молекулы вещества могут либо совпадать, либо могут быть сдвинутыми друг относительно друга. В последнем случае молекула эквивалентна электрическому диполю и называется *полярной*. Напомним, что диполь - это совокупность близко расположенных двух одинаковых по величине, но разных по знаку точечных зарядов $+q$ и $-q$ (рис. 4.1). Полярная молекула обладает собственным электрическим моментом \vec{p} :

$$\vec{p} = q\vec{l} , \quad (4.1)$$

где q - суммарный заряд всех сдвинутых внутри молекулы положительных элементарных зарядов, который равен сумме всех сдвинутых внутри молекулы отрицательных элементарных зарядов, \vec{l} - вектор, соединяющий центры тяжести всей совокупности смещенных положительных и всей совокупности смещенных отрицательных элементарных зарядов молекулы. При этом, несмотря на наличие электрического момента, молекула по своему электрическому заряду остается нейтральной.

Молекула, у которой центры тяжести зарядов разных знаков в отсутствие поля совмещены ($l = 0$), собственным электрическим моментом не обладает. Такая молекула называется *неполярной*. Однако, под действием

внешнего электрического поля заряды в неполярной молекуле смещаются друг относительно друга: положительные по направлению поля, отрицательные против поля. В результате молекула приобретает электрический момент, величина которого, как показывает опыт, пропорциональна напряженности поля. Коэффициент пропорциональности записывают в виде $\epsilon_0\beta$, где ϵ_0 – электрическая постоянная, а β – величина, называемая *поляризуемостью молекулы*. Учитывая, что направления \vec{p} и \vec{E} совпадают, можно написать

$$\vec{p} = \beta\epsilon_0\vec{E} \quad (4.2)$$

Процесс поляризации неполярной молекулы протекает так, как если бы положительные и отрицательные заряды молекулы были связаны друг с другом упругими силами. Поэтому говорят, что неполярная молекула ведет себя во внешнем поле как упругий диполь.

Действие внешнего поля на полярную молекулу сводится в основном к стремлению повернуть молекулу так, чтобы ее электрический момент установился по направлению поля. На величину электрического момента внешнее поле практически не влияет. Следовательно, полярная молекула ведет себя во внешнем поле как жесткий диполь.

Поскольку молекулы по электрическим свойствам эквивалентны диполям, для понимания явлений в диэлектриках нужно знать, как ведет себя диполь во внешнем электрическом поле.

Диполь в однородном электрическом поле

Если диполь поместить в однородное электрическое поле, образующие диполь заряды $+q$ и $-q$ окажутся под действием равных по величине, но противоположных по направлению сил f_1 и f_2 (рис. 4.2). Эти силы образуют пару, плечо которой зависит от ориентации диполя относительно поля и равно $l \sin \alpha$.

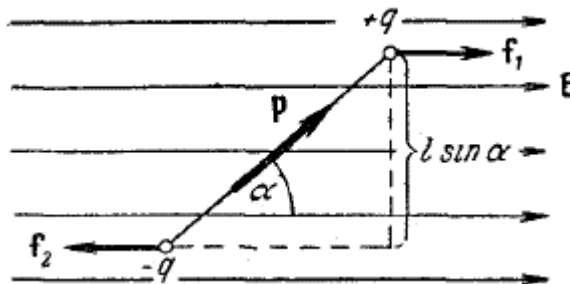


Рис. 4.2

Модуль каждой из сил равен qE . Умножив его на плечо, получим величину момента пары сил, действующих на диполь:

$$M = qEl \sin \alpha = pE \sin \alpha \quad (4.3)$$

где p – электрический момент диполя.

Формула (4.3), очевидно, может быть написана в векторном виде

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (4.4)$$

Момент сил (4.4) стремится повернуть диполь так, чтобы его электрический момент \vec{p} установился по направлению поля.

Поляризация диэлектриков

В отсутствие внешнего электрического поля дипольные моменты молекул диэлектрика или равны нулю (неполярные молекулы), или распределены по направлениям в пространстве хаотическим образом (полярные молекулы). В обоих случаях суммарный электрический момент диэлектрика равен нулю. Под действием внешнего поля диэлектрик поляризуется. Это означает, что результирующий электрический момент диэлектрика становится отличным от нуля. В качестве величины, характеризующей степень поляризации диэлектрика, естественно взять электрический момент единицы объема. Если поле или диэлектрик (или оба они) неоднородны, степень поляризации в разных точках диэлектрика будет различна. Чтобы охарактеризовать поляризацию в данной точке, нужно выделить заключающий в себе эту точку физически бесконечно малый объем ΔV , найти сумму $\sum_{\Delta V} \vec{p}_i$ моментов, заключенных в этом объеме молекул, и взять отношение

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V} \quad (4.5)$$

Величина \vec{P} , определяемая формулой (4.5), называется *вектором поляризации диэлектрика*. У диэлектриков любого типа вектор поляризации связан с напряженностью поля в той же точке простым соотношением

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \quad (4.6)$$

где χ – безразмерная, не зависящая от \vec{E} величина, называемая *диэлектрической восприимчивостью диэлектрика*. В то же время размерность

вектором поляризації диелектрика \vec{P} и напряженности электрического поля \vec{E} совпадают.

По существу, вектор поляризации характеризует дополнительное электрическое поле, возникающее внутри диелектрика под действием внешнего электрического поля. Поляризованные под действием внешнего поля молекулы выстраиваются таким образом, чтобы отрицательная сторона молекулы была направлена в сторону положительного заряда, порождающего внешнее поле, а положительная сторона – соответственно к отрицательному заряду. Вектор \vec{P} , как уже было показано выше (4.5), – это усреднение по объему, среднее значение электрических моментов молекул-диполей в единице объема вещества диелектрика. Если очень условно представить эту единицу объема вещества в виде некоторого диполя, заряды которого расположены по краям этого объема и расположены на одной и той же линии напряженности, то мы увидим, что эти два заряда диполя создают собственное электрическое поле \vec{E}' , которое направлено против внешнего \vec{E}_0 (рис. 4.3).

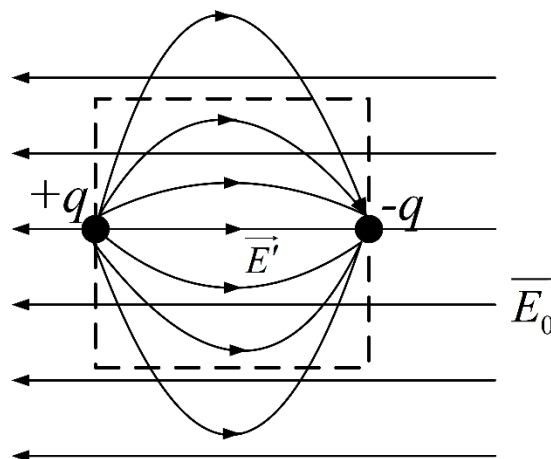


Рис. 4.3

То есть, суммарное, действующее внутри диелектрика электрическое поле $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$ оказывается слабее, чем внешнее поле, так как \vec{E}_0 и \vec{E}' всегда направлены в противоположные стороны, встречно. Можно сказать и по-другому: действующее внутри диелектрика электрическое поле всегда слабее того поля, которое действовало бы, если бы в этом месте был вакуум, а не диелектрик. Таким образом, поляризация диелектриков приводит к ослаблению электрического поля. В физике установлено, что величина, на которую ослабляется поле, равна величине вектора поляризации диелектрика \vec{P} .

Описание поля в диэлектрике

Введем понятие электрического смещения.

Электрическим смещением называется величина, определяемая соотношением

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (4.7)$$

В вакууме, где отсутствует поляризация, смещение и напряженность электрического поля равны с точностью до множителя ε_0

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (4.8)$$

Электрическое смещение также иногда называют "электрической индукцией".

Очень важно отметить, что величина \vec{D} не зависит от того, где распространяется электрическое поле: в вакууме или в диэлектрике. В то время как напряженность зависит. Величина смещения напрямую связана с зарядом, который продуцирует электрическое поле и ни с чем другим. Эта связь определяется теоремой Гаусса для общего случая, охватывающего как вакуум, так и диэлектрики:

$$\iint_s \vec{D} d\vec{S} = \sum q_i \quad (4.9)$$

Формула (4.9) выражает **теорему Гаусса** для вектора электрического смещения: *поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности свободных зарядов.*

Если свободные заряды распределены внутри замкнутой поверхности непрерывно с объемной плотностью ρ , то формула (4.9) видоизменяется следующим образом:

$$\iint_s \vec{D} d\vec{S} = \sum \iiint_v \rho dV \quad (4.10)$$

В вакууме $\vec{P} = 0$, а \vec{D} определяется выражением (4.8). Тогда формулы (4.9) и (4.10) переходят в формулы (2.14) и (2.15) из лекции №2.

Подставив в формулу (4.7) выражение (4.6) для $\vec{P} = 0$, получим

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \chi \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \quad (4.11)$$

Безразмерную величину

$$\varepsilon = 1 + \chi \quad (4.12)$$

называют *относительной диэлектрической проницаемостью* или просто *диэлектрической проницаемостью среды*. Следовательно, соотношение (4.11) можно записать в виде

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \quad (4.13)$$

Это самое простое и в то же время фундаментальное соотношение между векторами \vec{E} и \vec{D} , на основе которого описывается электрическое поле в общем случае: и в вакууме, и внутри диэлектрического вещества. Очевидно, что для вакуума $\varepsilon = 1$.

Единицей электрического смещения служит кулон на квадратный метр (Кл/м²).

Величину

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon \quad (4.14)$$

называют абсолютной диэлектрической проницаемостью среды. Очевидно, что абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума $\varepsilon_a = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков

| <i>Твердые тела</i> | | |
|-------------------------|---------------------|---------------|
| Вещество | ρ , Ом·см | ε |
| Бакелит | $10^{13} - 10^{14}$ | 4,5 |
| Битум | $10^{15} - 10^{16}$ | 2,5–3 |
| Бумага сухая | $10^{13} - 10^{14}$ | 2–2,5 |
| Гетинакс | $10^{10} - 10^{11}$ | 5–6 |
| Каучук | 10^{16} | 2,4 |
| Кварц | $10^{14} - 10^{15}$ | 3,5–4,5 |
| Керамика конденсаторная | 10^{11} | 10–200 |
| Метатитанат бария | - | 2000 |
| Парафин | $3 \cdot 10^{18}$ | 2–2,3 |
| Плексиглас (оргстекло) | 10^{13} | 3,5 |
| Полистирол | $10^{17} - 10^{19}$ | 2,4–2,6 |

| | | |
|------------------------------|--|---------|
| Полихлорвинил | 10^{16} | 3 |
| Полиетилен | 10^{16} | 2,3–2,4 |
| Сегнетова соль | - | 500 |
| Слюда | 10^{16} | 5,7–7 |
| Стекло | $10^8–10^{17}$ | 4–16 |
| Текстолит | $10^9–10^{10}$ | - |
| Фарфор | 10^{15} | 4,5–4,7 |
| Шеллак | $10^{15}–10^{16}$ | 3,5 |
| Эбонит | $10^{15}–10^{16}$ | 2,5–3 |
| Янтарь | $10^{17}–10^{20}$ | 2,8 |
| <i>Жидкости</i> | | |
| Бензин | 10^{12} | 2 |
| Вода дистиллированная | $10^5–10^6$ | 81 |
| Масло вазелиновое | 10^{16} | 2 |
| Масло касторовое | 10^{11} | 4,6–4,8 |
| Масло трансформаторное | $10^{12}–10^{15}$ | 2,2 |
| Скипидар | 10^{13} | 2,2 |
| Спирт этиловый | $10^6–10^7$ | 27 |
| <i>Газы (760 мм рт. ст.)</i> | | |
| Азот | - | 1,00054 |
| Воздух (сухой) | $10^{16}–10^{17}$ (в очень слабых полях) | 1,00025 |
| Гелий | - | 1,00007 |
| Кислород | - | 1,00055 |
| Углекислый газ | - | 1,0009 |

Сегнетоэлектрики

Существует группа веществ, которые могут обладать спонтанной (самопроизвольной) поляризацией в отсутствие внешнего поля. Это явление было открыто первоначально для сегнетовой соли, в связи с чем все подобные вещества получили название сегнетоэлектриков. Сегнетоэлектрики отличаются от остальных диэлектриков рядом характерных особенностей:

1. В то время как у обычных диэлектриков ϵ составляет несколько единиц, достигая в виде исключения нескольких десятков (у воды, например, $\epsilon = 81$), диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков бывает порядка нескольких тысяч.

2. Зависимость D от E не является линейной, следовательно, диэлектрическая проницаемость оказывается зависящей от напряженности поля (ветвь 1 на кривой рис. 4.4).

3. При изменениях поля значения вектора поляризации P (а следовательно, и D) отстают от напряженности поля E , в результате чего P и E определяются не только величиной E в данный момент, но и предшествующими значениями E , т. е. зависят от предыстории диэлектрика. Это явление называется гистерезисом (от греческого «гистерезис» — запаздывание). При циклических изменениях поля зависимость P от E следует изображенной на рис. 4.4 кривой, называемой петлей гистерезиса.

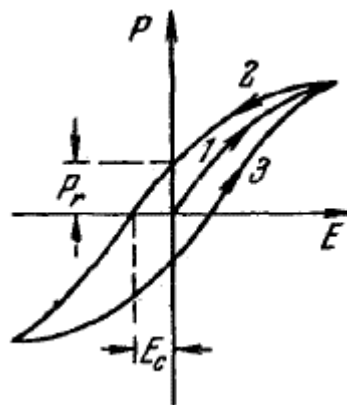


Рис. 4.4

Поведение поляризации сегнетоэлектриков аналогично поведению намагничения ферромагнетиков (о которых речь пойдет в последующих лекциях). По этой причине сегнетоэлектрики иногда называют ферроэлектриками.

Для каждого сегнетоэлектрика имеется температура, выше которой вещество утрачивает необычные свойства и становится нормальным диэлектриком. Эта температура называется точкой Кюри. Сегнетова соль имеет две точки Кюри: при -15°C и $+22,5^{\circ}\text{C}$, причем она ведет себя как сегнетоэлектрик лишь в температурном интервале, ограниченном указанными значениями. При температуре ниже -15°C и выше $+22,5^{\circ}\text{C}$ электрические свойства сегнетовой соли обычны.

Очень важное практическое значение имеет другой открытый сегнетоэлектрик — метатитанат бария, точка Кюри которого равна 125°C .

Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект

Некоторые кристаллы, не имеющие центра симметрии (в том числе все сегнетоэлектрики), при деформации поляризуются. Это явление называется прямым пьезоэлектрическим эффектом или просто пьезоэлектрическим

ефектом. Величина поляризації пропорциональна деформації, а, следовательно, в пределах упругости и механическому напряжению. При изменении знака деформации знак поляризации меняется также на обратный.

Важнейшими пьезоэлектриками (т. е. пьезоэлектрическими кристаллами) являются кварц, сегнетова соль, метатитанат бария и др.

Кристаллы кварца принадлежат к гексагональной системе. Если вырезать из кристалла кварца пластинку, перпендикулярную к кристаллографической оси a , и подвергнуть ее сжатию вдоль этой оси, то на гранях пластинки появляются связанные заряды (на рис. 4.5 пластинка расположена так, что кристаллографическая ось c направлена на нас). То же самое происходит, если пластинку подвергнуть растяжению вдоль оси OO , перпендикулярной к кристаллографическим направлениям a и c . В последнем случае эффект называют поперечным, в первом случае — продольным. При изменении знака деформации (т.е. при растяжении вдоль a или сжатии вдоль OO) на гранях пластинки появляются связанные заряды другого знака. Для практического использования пьезоэлектрического эффекта на грани пластинки накладывают металлические обкладки. Если эти обкладки включить в замкнутую цепь, то при изменениях деформации кристалла в цепи будут возникать импульсы тока. Такие процессы протекают, например, в пьезоэлектрическом микрофоне — знакопеременная деформация пластинки под действием звуковой волны преобразуется в переменный ток той же частоты.

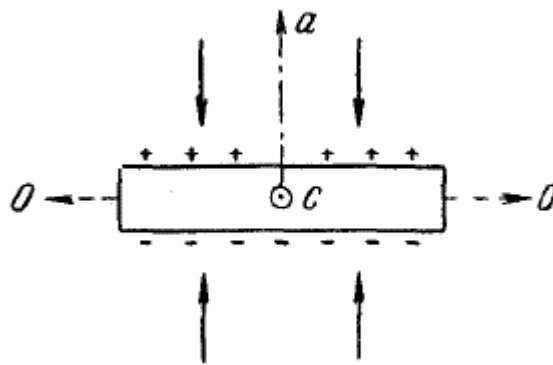


Рис 4.5

Наряду с описанным выше прямым эффектом, у пьезоэлектрических кристаллов наблюдается обратный эффект, заключающийся в том, что поляризация под действием электрического поля сопровождается механическими деформациями кристалла. Таким образом, если на металлические обкладки изображенной на рис. 4.5 пластинки подать переменное электрическое напряжение, то пластинка будет попеременно,

растягиваться и сжиматься вдоль оси a (одновременно происходят сжатие и растяжение вдоль оси OO), т. е. в ней возбуждятся механические колебания. Эти колебания станут особенно интенсивными, если частота переменного напряжения совпадает с собственной (резонансной) частотой пластинки.

Такие настроенные в резонанс пьезоэлектрические пластинки используются для возбуждения ультразвуковых волн, для стабилизации частоты генераторов электрических колебаний в радиотехнике и т. п.

Проводники в электрическом поле

Равновесие зарядов на проводнике

Носители заряда в проводнике способны перемещаться под действием сколь угодно малой силы. Поэтому равновесие зарядов на проводнике может наблюдаться лишь при выполнении следующих условий (рис. 4.6):

1. Напряженность поля всюду внутри проводника должна быть равна нулю

$$E = 0 \quad (4.15)$$

Это означает, что потенциал внутри проводника должен быть постоянным ($\varphi = const$).

2. Напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности

$$E = E_n \quad (4.16)$$

Следовательно, в случае равновесия зарядов поверхность проводника будет эквипотенциальной.

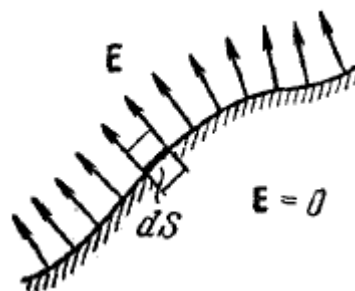


Рис. 4.6

Если проводящему телу сообщить некоторый заряд q , то он распределится так, чтобы соблюдались условия равновесия. Представим себе мысленно произвольную замкнутую поверхность, полностью заключенную в пределах тела. Поскольку при равновесии зарядов поле в каждой точке внутри

проводника отсутствует, поток вектора электрического смещения через поверхность равен нулю. Согласно теореме Гаусса алгебраическая сумма зарядов внутри поверхности также будет равна нулю. Это справедливо для поверхности любых размеров, проведенной внутри проводника произвольным образом. Следовательно, при равновесии ни в каком месте внутри проводника не может быть избыточных зарядов – все они расположатся по поверхности проводника с некоторой плотностью σ .

Так как в состоянии равновесия внутри проводника избыточных зарядов нет, удаление вещества из некоторого объема, взятого внутри проводника, никак не отразится на равновесном расположении зарядов. Таким образом, избыточный заряд распределяется на полой проводнике так же, как и на сплошном, т. е. по его наружной поверхности. На поверхности полости в состоянии равновесия избыточные заряды располагаться не могут. Этот вывод вытекает также из того, что одноименные элементарные заряды, образующие данный заряд q , взаимно отталкиваются и, следовательно, стремятся расположиться на наибольшем расстоянии друг от друга.

Напряженность поля вблизи поверхности проводника

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (4.17)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник.

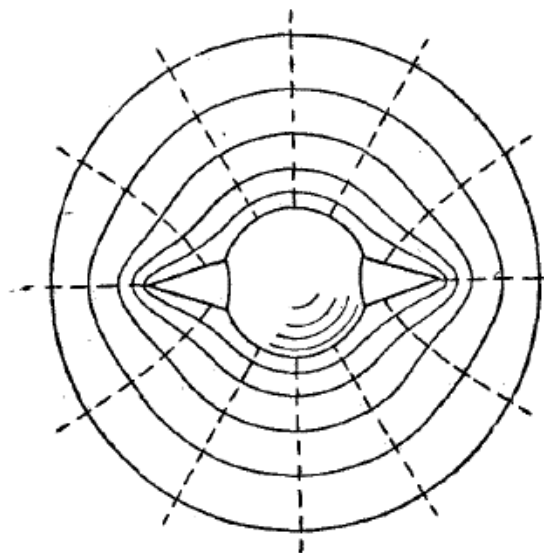


Рис. 4.7

Рассмотрим поле, создаваемое изображенным на рис. 4.7 заряженным проводником. На больших расстояниях от проводника эквипотенциальные поверхности имеют характерную для точечного заряда форму сферы (на

рисунке для экономии места сферическая поверхность изображена на небольшом расстоянии от проводника; пунктиром показаны линии напряженности поля). По мере приближения к проводнику эквипотенциальные поверхности становятся все более сходными с поверхностью проводника, которая, как мы знаем, является эквипотенциальной. Вблизи выступов эквипотенциальные поверхности располагаются гуще, значит и напряженность поля здесь больше. Отсюда согласно (4.17) получается, что плотность зарядов на выступах особенно велика. К тому же выводу можно прийти, учитывая, что из-за взаимного отталкивания заряды стремятся расположиться как можно дальше друг от друга.

Вблизи углублений в проводнике (рис. 4.8) эквипотенциальные поверхности расположены реже. Соответственно напряженность поля и плотность зарядов в этих местах будет меньше. Вообще, плотность зарядов при данном потенциале проводника определяется кривизной поверхности — она растет с увеличением положительной кривизны (выпуклости) и убывает с увеличением отрицательной кривизны (вогнутости). Особенно велика бывает плотность зарядов на остриях.

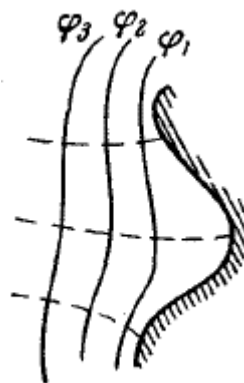


Рис. 4.8

Поэтому напряженность поля вблизи остриев может быть настолько большой, что происходит ионизация молекул газа, окружающего проводник. Ионы иного знака, чем q , притягиваются к проводнику и нейтрализуют его заряд. Ионы того же знака, что и q , начинают двигаться от проводника, увлекая с собой нейтральные молекулы газа. В результате возникает ощутимое движение газа, называемое электрическим ветром. Заряд проводника уменьшается, он как бы стекает с острия и уносится ветром. Поэтому такое явление называют истечением заряда с острия.

Проводник во внешнем электрическом поле

При внесении незаряженного проводника в электрическое поле носители заряда приходят в движение: положительные в направлении вектора E , отрицательные – в противоположную сторону. В результате у концов проводника возникают заряды противоположного знака, называемые индуцированными зарядами (рис. 4.9; пунктиром показаны линии напряженности внешнего поля). Поле этих зарядов направлено противоположно внешнему полю. Таким образом, накапливание зарядов у концов проводника приводит к ослаблению в нем поля. Перераспределение носителей заряда происходит до тех пор, пока не будут выполнены условия (4.15) и (4.16), т. е. пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю, а линии напряженности вне проводника перпендикулярными к его поверхности (рис. 4.9). Следовательно, нейтральный проводник, внесенный в электрическое поле, разрывает часть линий напряженности – они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных.

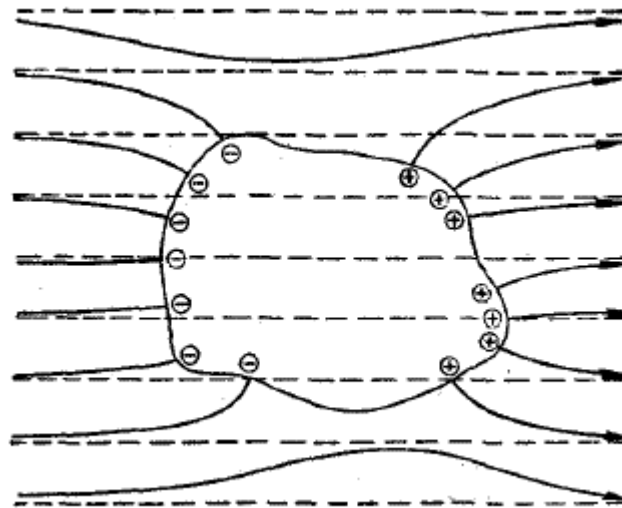


Рис. 4.9

Индукцированные заряды распределяются по внешней поверхности проводника. Если внутри проводника имеется полость, то при равновесном распределении индуцированных зарядов поле внутри нее также обращается в нуль. На этом основывается электростатическая защита. Когда какой-то прибор хотят защитить от воздействия внешних полей, его окружают проводящим футляром (экраном). Внешнее поле компенсируется внутри экрана возникающими на его поверхности индуцированными зарядами. Подобный экран действует хорошо и в том случае, если его сделать не сплошным, а в виде густой сетки.

Электрическая емкость

Сообщенный проводнику заряд распределяется по его поверхности так, чтобы напряженность поля внутри проводника была равна нулю. Если проводнику, уже несущему заряд q , сообщить еще заряд той же величины, то второй заряд должен распределиться по проводнику точно таким же образом, как и первый, в противном случае он создаст в проводнике поле, не равное нулю. Таким образом, различные по величине заряды распределяются на проводнике подобным образом, т. е. отношение плотностей заряда в двух произвольных точках поверхности проводника при любой величине заряда будет одно и то же. Отсюда вытекает, что потенциал уединенного проводника пропорционален находящемуся на нем заряду. Действительно, увеличение в некоторое число раз заряда приводит к увеличению в то же число раз напряженности поля в каждой точке окружающего проводник пространства. Следовательно, в такое же число раз возрастет работа переноса по любому пути единичного заряда из бесконечности на поверхность проводника, т. е. потенциал проводника. Таким образом, для уединенного проводника

$$q = C\varphi \quad (4.18)$$

Коэффициент пропорциональности C между потенциалом и зарядом называется электроемкостью (электрической емкостью или просто емкостью) проводника. Из (4.18) следует, что

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (4.19)$$

Емкость численно равна заряду, сообщение которого проводнику повышает его потенциал на единицу.

Пользуясь приведенными ранее выражениями можно показать, что емкость уединенного шара радиуса R , погруженного в однородный безграничный диэлектрик с относительной проницаемостью ε , равна

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R \quad (4.20)$$

За единицу емкости принимают емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 вольт при сообщении ему заряда в 1 кулон. Эта единица емкости называется фарадой (Ф).

Емкостью в одну фараду обладал бы уединенный шар радиуса $9 \cdot 10^9$ м, то есть радиусом, примерно в 1500 раз большим радиуса Земли. Таким образом, фарада – очень большая величина. Поэтому на практике пользуются единицами, равными долям фарады – микрофарадой (мкФ) и пикофарадой (пФ), которые определяются следующим образом:

$$1 \text{ мкф} = 10^{-6} \text{ ф},$$

$$1 \text{ пф} = 10^{-12} \text{ ф}.$$

Конденсаторы

Уединенные проводники обладают малой емкостью. Даже шар таких размеров, как Земля, имеет емкость всего лишь 700 мкФ. Вместе с тем на практике бывает потребность в устройствах, которые при небольшом относительно окружающих тел потенциале накапливали бы на себе («конденсировали») заметные по величине заряды. В основу таких устройств, называемых конденсаторами, положен тот факт, что емкость проводника возрастает при приближении к нему других тел. Действительно, под действием поля, создаваемого заряженным проводником, на поднесенном к нему теле возникают индуцированные (на проводнике) или связанные (на диэлектрике) заряды. Заряды, противоположные по знаку заряду проводника q , располагаются ближе к проводнику, чем одноименные с q , и, следовательно, оказывают большее влияние на его потенциал. Поэтому при поднесении к заряженному проводнику какого-либо тела потенциал проводника уменьшается по абсолютной величине. Согласно формуле (4.19) это означает увеличение емкости проводника.

Конденсаторы делают в виде двух проводников, расположенных близко друг к другу. Образующие конденсатор проводники называют его обкладками. Чтобы внешние тела не оказывали воздействия на емкость конденсатора, обкладкам придают такую форму и так располагают их друг относительно друга, чтобы поле, создаваемое накапливаемыми на них зарядами, было полностью сосредоточено внутри конденсатора. Этому условию удовлетворяют две пластинки, расположенные близко друг к другу, два coaxialных цилиндра и две концентрические сферы. Соответственно бывают плоские, цилиндрические и сферические конденсаторы.

Поскольку поле заключено внутри конденсатора, линии электрического смещения начинаются на одной обкладке и заканчиваются на другой. Следовательно, свободные заряды, возникающие на разных обкладках, имеют одинаковую величину q и различны по знаку. Под емкостью конденсатора понимается физическая величина, пропорциональная заряду q и обратно пропорциональная разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (4.21)$$

Емкость конденсатора измеряется в тех же единицах, что и емкость уединенного проводника.

Величина емкости определяется геометрией конденсатора (формой и размерами обкладок, а также величиной зазора между ними), а также диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками. Найдем формулу для емкости плоского конденсатора. Если площадь обкладки S , а заряд на ней q , то напряженность поля между обкладками равна

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S} \quad (4.22)$$

Мы воспользовались формулой (3.3) из предыдущей лекции и учли возможность наличия диэлектрика в зазоре между пластинками.

Разность потенциалов, как известно, есть работа поля по перемещению единичного заряда. В однородном поле, когда напряженность во всех точках поля одинакова, эта работа будет равна произведению величины напряженности E на расстояние, на которое перемещается единичный заряд. Если расстояние между обкладками конденсатора равно d , то разность потенциалов, то есть напряжение между этими обкладками

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{qd}{\varepsilon\varepsilon_0 S} \quad (4.23)$$

откуда для емкости плоского конденсатора получается следующая формула:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad (4.24)$$

где S – площадь обкладки, d – величина зазора между обкладками, ε – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего зазор.

Из формулы (4.24) следует, что размерность электрической постоянной ε_0 равна размерности емкости, деленной на размерность длины (напомним, что ε – безразмерная величина). В соответствии с этим единицы, в которых измеряется ε_0 , носят название «фарада на метр» (Ф/м).

Из выражения (4.24) ясно, почему введение между обкладками прослойки из сегнетоэлектрика (например, метатитаната бария) позволяет получить при небольших размерах конденсатора большую емкость.

Помимо емкости, каждый конденсатор характеризуется предельным напряжением U_{\max} , которое можно прикладывать к обкладкам конденсатора, не опасаясь его пробоя. При превышении этого напряжения между обкладками проскакивает искра, в результате чего разрушается диэлектрик и конденсатор выходит из строя.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Какую молекулу называют полярной?
2. Какую молекулу называют неполярной?
3. Что называется диполем?
4. Что называют электрическим моментом диполя?
5. Как неполярные молекулы приобретают электрический момент?
6. Как связан электрический момент, приобретаемый неполярной молекулой в электрическом поле и напряженность этого поля?
7. Какую величину называют поляризуемостью молекулы?
8. Почему по отношению к неполярным молекулам применяют термин "упругий диполь"?
9. По отношению к каким молекулам применяется понятие "жесткий диполь"? Почему?
10. Приведите формулу, которая связывает момент пары сил, действующих на заряды диполя в электрическом поле, электрический момент диполя и напряженность электрического поля, вызывающего этот момент сил.
11. В каком направлении вращает диполь момент сил в электрическом поле?
12. Какой формулой можно выразить электрический момент единицы объема вещества диэлектрика в данной точке?
13. Какую величину называют вектором поляризации диэлектрика?
14. Каким образом связаны электрический момент единицы объема вещества диэлектрика и вектор поляризации диэлектрика?
15. Как в диэлектрике связаны вектор поляризации и вектор напряженности электрического поля в данной точке?
16. Какую величину называют диэлектрической восприимчивостью диэлектрика?
17. Поляризация диэлектрика приводит к усилению или ослаблению электрического поля?
18. По отношению к внешнему полю электрическое поле, возникающее вследствие поляризации диэлектрика, имеет направление:
а) произвольное направление; б) под прямым углом;
в) противоположное направление; г) то же направление, что и внешнее поле; д) электрическое поле вследствие поляризации диэлектрика не возникает?
19. Насколько, на какую величину ослабляется электрическое поле внутри диэлектрика вследствие его поляризации?

20. Как связаны векторы электрического смещения, напряженности и поляризации?
21. Как связаны векторы электрического смещения и напряженности в вакууме?
22. Каким образом величина электрического смещения от зависит от среды распространения электрического поля?
23. Зависит ли величина напряженности от свойств среды распространения электрического поля?
24. Запишите формулу, выражающую теорему Гаусса для вектора электрического смещения.
25. Сформулируйте теорему Гаусса для вектора электрического смещения.
26. Запишите формулу, выражающую теорему Гаусса для вектора электрического смещения в случае наличия объемного заряда.
27. Какую величину называют относительной диэлектрической проницаемостью?
28. Какую величину называют диэлектрической проницаемостью среды?
29. Какое соотношение связывает электрическое смещение, напряженность электрического поля и относительную диэлектрическую проницаемость среды?
30. Чему равна относительная диэлектрическая проницаемость вакуума?
31. Чему равна абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума? Чему она равна численно?
32. В каких пределах находится значение относительной диэлектрической проницаемости обычных диэлектриков в твердом состоянии?
33. Какие жидкости отличаются высокой относительной диэлектрической проницаемостью?
34. Сколько единиц составляет относительная диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды?
35. Как можно охарактеризовать величину относительной диэлектрической проницаемости газов?
36. Какое явление характерно для поляризации сегнетоэлектриков?
37. Какова диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков?
38. Нарисуйте зависимость величины поляризации от напряженности электрического поля для сегнетоэлектриков.
39. Что называют точкой Кюри для сегнетоэлектриков?
40. Назовите известные Вам вещества, относящиеся к сегнетоэлектрикам.
41. В чем состоит прямой пьезоэлектрический эффект?
42. В чем состоит обратный пьезоэлектрический эффект?
43. Назовите известные Вам вещества, относящиеся к пьезоэлектрикам.

44. В каком случае у пьезоэлектриков возникает резонанс?
45. Как на практике используются резонансные явления в пьезоэлектриках?
46. Каковы условия равновесия зарядов в проводниках?
47. Насколько могут отличаться потенциалы различных точек поверхности заряженного проводника?
48. Как располагаются заряды внутри проводника?
49. Как располагаются заряды на поверхности проводника?
50. Как связаны напряженность поля вблизи поверхности проводника и поверхностная плотность заряда?
51. Где напряженность поля выше: на впадинах или на выступах заряженного тела из проводящего материала?
52. Что называют "электрическим ветром"?
53. Какой заряд называют "индуцированным"?
54. Где располагаются индуцированные заряды в теле из проводящего вещества?
55. Что называется электрической емкостью проводника?
56. Чему численно равна емкость?
57. В каких единицах измеряется емкость?
58. Какие дробные единицы измерения емкости Вам известны?
59. Какой формы обычно бывают конденсаторы?
60. Как рассчитывается емкость плоского конденсатора через его конструктивные параметры?
61. Почему использование сегнетоэлектриков позволяет создавать конденсаторы большой емкости?

Уровень курса

1. Полярные и неполярные молекулы диэлектрика. Диполь в однородном электрическом поле.
2. Поляризация диэлектриков.
3. Описание электрического поля в диэлектрике.
4. Сегнетоэлектрики и их свойства.
5. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.
6. Равновесие зарядов на проводнике.
7. Проводник во внешнем электрическом поле.
8. Электрическая емкость.
9. Конденсаторы.

Лекція № 5

Тема: Физические основы емкостного метода контроля

Оглавление

| | |
|--|---|
| Эмкостной метод | 2 |
| Преобразователи | 3 |
| Измерение состава и структуры материалов | 6 |
| Контрольные вопросы по теме | 9 |
| Уровень модуля..... | 9 |
| Уровень курса..... | 9 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. /В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.: ил.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

Электроемкостной метод

Электроемкостный метод контроля (ЭМК) предусматривает введение объекта контроля или его исследуемого участка в электростатическое поле и определение искомых характеристик материала по вызванной им обратной реакции на источник этого поля. В качестве источника поля применяют электрический конденсатор, который является одновременно и первичным электроемкостным преобразователем (ЭП), так как осуществляет преобразование физических и геометрических характеристик объекта контроля в электрический параметр.

Обратная реакция ЭП проявляется как изменение его интегральных параметров, чаще всего двух параметров, из которых один характеризует «емкостные» свойства ЭП, а другой диэлектрические потери (например, емкость и тангенс угла потерь, составляющие комплексной проводимости). Эти параметры являются первичными информативными параметрами ЭМК.

Информативность ЭМК определяется зависимостью первичных информативных параметров ЭП от характеристик объекта контроля – непосредственно от электрических характеристик (например, диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь) и геометрических размеров объекта контроля. Косвенным путем с помощью ЭМК можно определять и другие физические характеристики материала: плотность, содержание компонентов в гетерогенных системах, влажность, степень полимеризации и старения, механические параметры, радиопрозрачность и пр. К наиболее информативным геометрическим параметрам объекта контроля следует отнести толщину пластин, оболочек и диэлектрических покрытий на проводящем и непроводящем основаниях, поперечные размеры линейно-протяженных проводящих и диэлектрических изделий (нитей, стержней, лент, прутков), локализацию проводящих и диэлектрических включений и др.

Следует отметить, что информативные параметры ЭП зависят также от его конструкции и электрических характеристик среды, в которую помещен объект контроля. Первое обстоятельство учитывается при оптимизации конструкции ЭП, второе обычно является причиной возникновения мешающих контролю факторов. По назначению электроемкостные методы контроля могут быть классифицированы на три группы: измерение параметров состава и структуры материала, определение геометрических размеров объекта контроля, контроль влажности.

Влажность измеряется с помощью влагомеров. Выделение этого метода в отдельную группу объясняется, во-первых, наиболее широким применением ЭМК для контроля влажности, а во-вторых, рядом особенностей контроля,

обусловленных влиянием видов влаги на свойства материалов. Так, если вода входит в состав материала как свободная (гигроскопическая), то ее относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon \gg 80$, в то время как для воды, абсорбируемой в виде монослоя, $\epsilon = 2,5$. В случае электролитической поляризации диэлектрическая проницаемость влажной гетерогенной системы может превышать значение проницаемости самой воды.

Применение ЭМК характеризуется следующими основными особенностями:

а) информация, получаемая от объекта контроля, многопараметрическая, что, с одной стороны, свидетельствует в пользу этого метода, так как позволяет получить более подробные сведения (совокупность сведений) об объекте контроля, а с другой, создает дополнительные трудности при разделении параметров контроля. Так, при измерении одного из параметров на результат контроля оказывают влияние другие параметры, являющиеся мешающими факторами;

б) возможность проведения бесконтактных измерений в динамическом режиме, что играет важную роль при автоматизации процесса контроля;

в) ЭМК позволяет получить информацию о средних значениях контролируемых параметров в сравнительно больших объемах материала или локализовать поле в определенном участке, а также на определенной глубине исследуемого материала.

Преобразователи

Конструкция ЭП зависит от объекта контроля и в первую очередь от агрегатного состояния исследуемой среды (твердая, жидкая, газообразная). Наиболее сложную задачу представляет контроль твердых материалов, так как жидкие и газообразные среды могут принимать любую форму, и конструкцию ЭП в данных случаях выбирают на основании условий обеспечения наибольшей точности измерения, разрешающей способности метода, его пропускной способности, характера взаимодействия среды с электродами и т.п.

В случае контроля твердых сплошных материалов конструкцию ЭП определяет в первую очередь условие обеспечения неразрушающего контроля, часто при одностороннем доступе к поверхности изделия. Для решения такого рода задач применяют накладные ЭП, электроды которых расположены на одной стороне поверхности объекта контроля или непосредственно на поверхности контролируемого объекта или в непосредственной близости от него. При этом электроды ЭП находятся в

одной плоской или криволинейной поверхности. С целью обеспечения дистанционного контроля часто некоторые элементы измерительной схемы располагают в выносном блоке преобразователя.

Накладные ЭП характеризуются большой неоднородностью создаваемого ими электростатического поля в объекте контроля с максимальным значением напряженности поля (следовательно, и максимальной чувствительностью) непосредственно у поверхности электродов и быстрым затуханием поля по мере удаления от электродов. В связи с этим использование накладных ЭП обычно требует осуществления мер по компенсации влияния контактных условий (шероховатость поверхности, ее загрязнение и пр.).

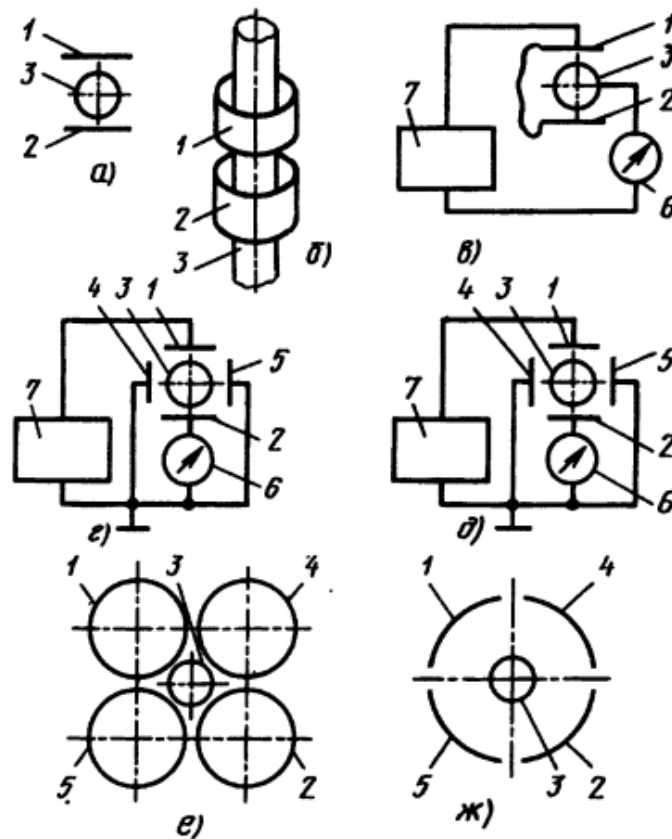


Рис. 5.1. Конструкция проходных ЭП с измерением емкости:

a-в – полной; *г-д* – частичной; *е,ж* – перекрестной;

1 – высокопотенциальный электрод; 2 – низкопотенциальный электрод;

3 – объект контроля; 4 и 5 – охранные электроды; 6 – индикатор;

7 – источник питания

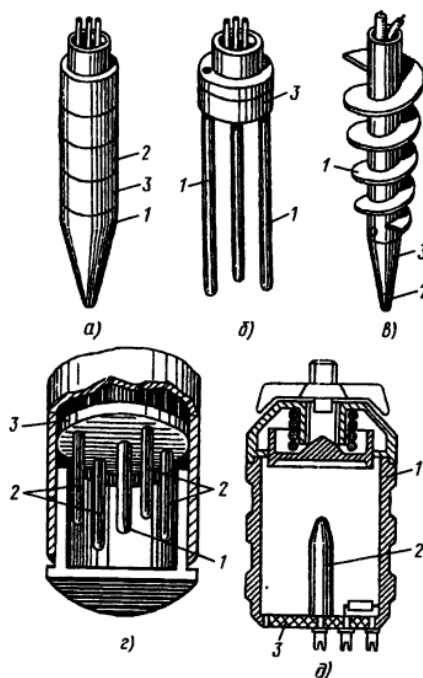


Рис. 5.2. ЭП для контроля сыпучих материалов:

а-в – погружные; г– типа сосуда; д – типа сосуда с прессовым устройством для уплотнения пробы;

1 – низкопотенциальный электрод; 2 – высокопотенциальный электрод;

3 – изоляционное основание

Для контроля размеров поперечного сечения линейно-протяжных изделий (например, проволоки, ленты, полосы, фольги, прутков и пр.) применяют проходные ЭП (рис. 5.1). В зависимости от схемы включения электродов и объекта контроля конструкции ЭП бывают двух и трехзажимными. Их работа основана на измерении полной или частичной емкости. Контроль может осуществляться и по так называемой схеме с перекрестной емкостью (например, включение проходных ЭП по схеме, показанной на рис. 5.1, е, ж).

Контроль твердых дисперсных (сыпучих) материалов допускает большую свободу в выборе конструкции ЭП, так как контролируемая среда может принять любую форму в соответствии с применяемой конструкцией ЭП. Чаще всего ЭП выполняют в виде сосуда, заполняемого контролируемой средой, или в виде преобразователя, погружаемого в эту среду. Несколько конструкций ЭП такого вида приведено на рис. 5.2. Контролируемыми параметрами в данном случае являются степень дисперсности среды, физико-механические параметры частиц (например, их состав, влажность), состав полидисперсных сред.

Измерение состава и структуры материалов

Принцип действия этих приборов основан на определении исследуемых характеристик состава и структуры материала по его электрическим параметрам (диэлектрической проницаемости и коэффициенту диэлектрических потерь). Для измерения первичных информативных параметров ЭП может быть использована любая схема для измерения параметров конденсаторов с учетом соблюдения двух условий:

- необходимости вынесения ЭП с дистанционным измерением его параметров
- предусмотрения мер по устранению влияния контакта ЭП с поверхностью контролируемого объекта.

Эти необходимые условия резко ограничивают выбор измерительных схем. С точки зрения дистанционного контроля применение нашли трехзажимные ЭП с включением их в мостовую схему с индуктивно связанными плечами (трансформаторные мосты). Несколько разновидностей таких схем приведено на рис. 5.3, а в. Условия равновесия для приведенных схем:

$$\text{а) } \frac{C_x}{C_0} = \frac{N_0 n_0}{N_x n_x} \quad \text{б) } \frac{C_x}{C_0} = \frac{N_0}{N_x} \quad \text{в) } \frac{C_x}{C_0} = \frac{n_0}{n_x}$$

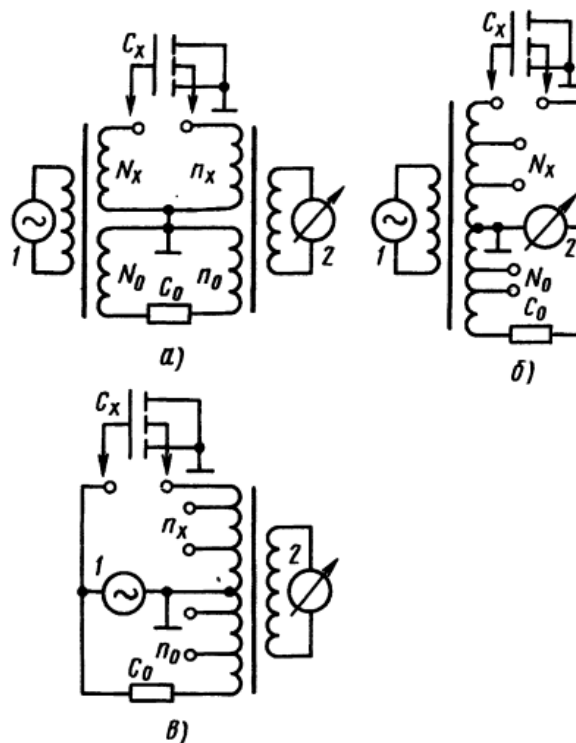


Рис.5.3. Мосты с индуктивно связанными плечами:

1 – генератор; 2 – индикатор

Основными преимуществами данного типа трансформаторных мостов являются:

- малая чувствительность к паразитным емкостям, включенным параллельно индуктивным плечам, что позволяет проводить измерения при наличии длинных соединительных проводов;
- возможность построения мостов с широким диапазоном измерений при применении многосекционированных трансформаторов при малом числе образцовых мер;
- возможность выбора образцовой меры такого значения, при котором можно ожидать наибольшую стабильность и точность измерений.

Кроме трансформаторных мостов, при построении приборов, основанных на ЭМК, применяют и другие измерительные схемы, допускающие вынесение части схемы в блок преобразователя, например, автогенераторные схемы, измерители добротности с вынесенным резонансным контуром, схемы преобразования на основе операционного усилителя, схемы сравнения токов или напряжений или специальные схемы компенсации влияния подводящих проводов.

Неразрушающий контроль электрических свойств материала возможен с помощью стандартных измерителей параметров конденсаторов измерением емкости C_1 и тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta_1$, C_2 , $\operatorname{tg} \delta_2$ – соответственно незаполненного и заполненного исследуемым материалом ЭП.

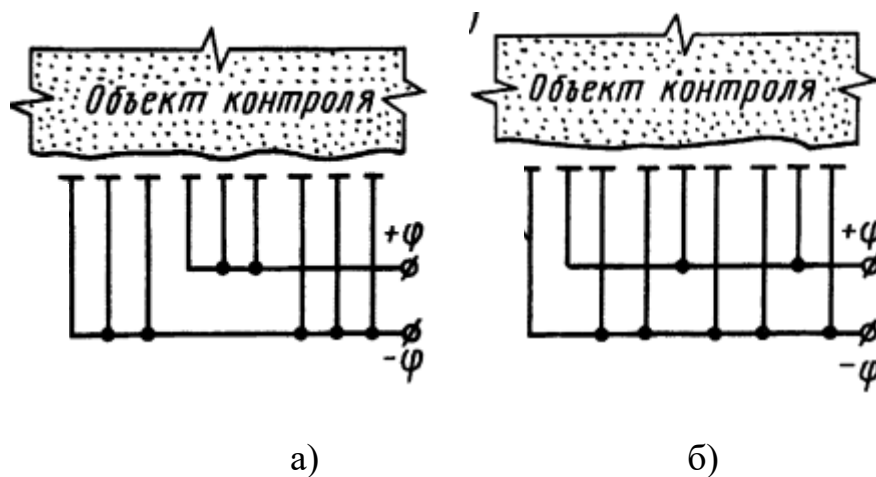


Рис 5.4 Схемы сечения электродов девятиэлементного ЭП для различных глубин проникновения поля в ОК и зависимости емкости ЭП от зазора

Для устранения влияния контакта, а также влияния других мешающих факторов, касающихся геометрии объекта контроля, применяют многопараметровый метод контроля с формированием сигнала путем вариации топографии электрического поля (изменения распределения напряженности поля в контролируемом объеме). Изменение топографии поля

осуществляется, например, коммутацией электродов многоэлементного ЭП, смещением плоскостей разноименно заряженных электродов, изменением диэлектрической проницаемости в зазоре между электродами ЭП и контролируемой поверхностью. На рис. 5.4 приведена схема сечения девятиэлементного ЭП, электроды которого соединяются в две комбинации, соответствующие большой глубине проникновения поля (рис. 5.4, а) и малой глубине проникновения поля (рис. 5.4, б) в объект контроля.

Измерители диэлектрических характеристик (диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь) основаны на измерении параметров выносного резонансного контура, в который включен ЭП. Частота колебаний и напряжение контура автоматически поддерживаются постоянными. Изменение емкости ΔC_k и проводимости ΔG_k контура после внесения объекта контроля в электрическое поле ЭП компенсируется с помощью варикапа и туннельного диода. Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь материала

$$\varepsilon_M = \frac{C_0 + \Delta C_k}{C_0}$$
$$\operatorname{tg} \delta_M = \frac{\Delta C_k}{2\pi f_0 (C_0 + \Delta C_k)}$$

где C_0 – рабочая емкость ЭП; f_0 - частота резонансного контура. Отсчет показаний прибора – цифровой трехзначный для ε и $\operatorname{tg} \delta$.

По электрическим характеристикам материала, полученным расчетным или экспериментальным путем, могут быть определены другие характеристики состава и структуры материала, из которых в первую очередь представляет интерес определение содержания компонентов гетерогенной среды, в частности, коэффициент армирования композитных материалов. Параметры таких гетерогенных систем вычисляют с помощью формул, определяющих средние значения диэлектрической проницаемости через диэлектрические проницаемости компонентов и их объемную или массовую концентрацию. Эти формулы могут быть использованы и для обратной задачи определения характеристик состава материала, например, коэффициента армирования, пористости, влажности по диэлектрической проницаемости всей композиции и отдельных ее компонентов, а также для определения диэлектрической проницаемости одного из компонентов, если известны остальные параметры.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Что является источником электрического поля в электроемкостном методе НК?
2. Что является первичным преобразователем в электроемкостном методе НК?
3. Какие параметры являются первичными информативными параметрами в электроемкостном методе НК?
4. Какие физические характеристики материала могут быть проконтролированы электроемкостным методом НК?
5. Какие геометрические характеристики объекта могут быть проконтролированы электроемкостным методом НК?
6. Является ли информация, получаемая от объекта контроля электроемкостным методом, многопараметрической?
7. Какой тип преобразователя используется для контроля твердых сплошных материалов?
8. Какой тип преобразователя используется для контроля размеров поперечного сечения линейно-протяжных изделий?
9. Какие типы преобразователей используются в электроемкостном методе НК?
10. Какие виды схем используются для измерения емкости?

Уровень курса

1. Электроемкостной метод неразрушающего контроля.
2. Преобразователи для электроемкостного метода неразрушающего контроля.
3. Схемы измерения, применяемые в электроемкостном методе неразрушающего контроля.

Лекция № 6

Тема: Физические основы электропотенциального метода. Физические основы электроискровых методов. Физические основы методов электрического сопротивления. Термоэлектрические явления и их использование в неразрушающем контроле.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Электропотенциальный метод..... | 3 |
| Электроискровой метод..... | 4 |
| Физические основы..... | 4 |
| Технические основы | 6 |
| Электроискровые дефектоскопы..... | 7 |
| Методы электрического сопротивления..... | 8 |
| Общие сведения и физические основы..... | 8 |
| Методы и средства дефектоскопии..... | 9 |
| Методы и средства контроля отклонений формы поверхностей... | 10 |
| Физические основы термоэлектрических явлений | 11 |
| Работа выхода..... | 11 |
| Контактная разность потенциалов | 12 |
| Явление Зеебека | 13 |
| Использование термоэлектрических явлений в неразрушающем контроле | 14 |
| Средства контроля химического состава и структуры металлов и сплавов | 16 |
| Контрольные вопросы по теме | 17 |
| Уровень модуля..... | 17 |
| Уровень курса..... | 18 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.

2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 2: Электрический контроль. /К.В.Подмастерьев, Ф.Р.Соснин, С.Ф.Кондорф, Т.И.Ногачева, Е.В.Пахолкин, Л.А.Бондарева, В.Ф. Мужичкий. М.: Машиностроение, 2004. 679 с.: ил.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

Электроденциальный метод

При пропускании через электропроводящий объект тока в объекте создается электрическое поле. Геометрическое место точек с одинаковым потенциалом составляет эквипотенциальные линии (рис. 6.1). На рисунке показано распределение эквипотенциальных линий при отсутствии (рис. 6.1, а) и наличии дефекта (рис. 6.1, б). Разность потенциалов зависит от трех факторов: удельной электрической проводимости g , геометрических размеров (например, толщины) и наличия поверхностных трещин. При пропускании переменного тока разность потенциалов будет зависеть и от магнитной проницаемости μ .

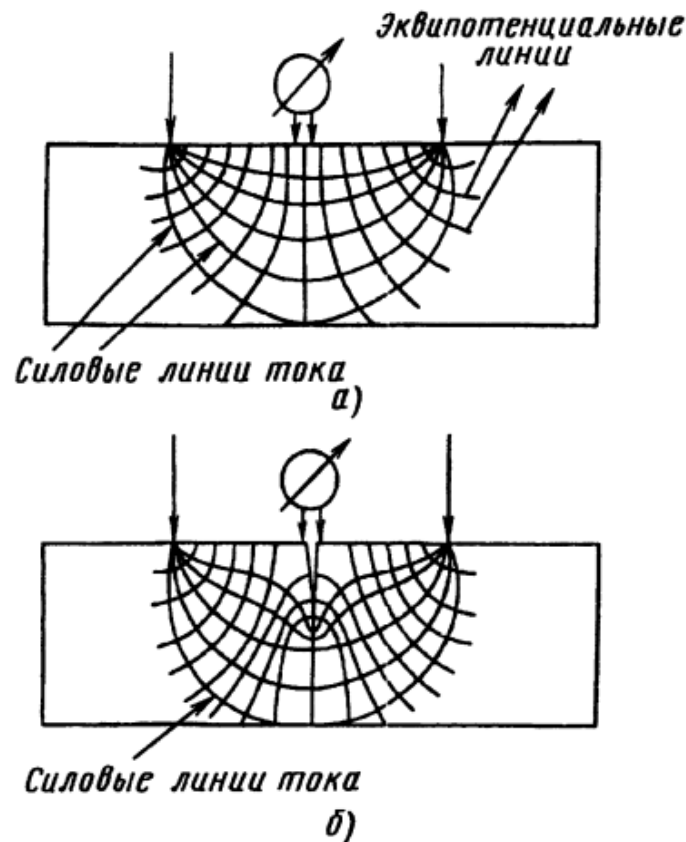


Рис. 6.1. Распределение эквипотенциальных линий

В приборах имеется четыре электрода. С помощью двух из них (токопроводящих) к контролируемому участку подводится ток. Два электрода измерительные, с их помощью измеряют разность потенциалов на определенном расстоянии (обычно не более 2 мм), по которой судят о глубине обнаруженной трещины.

Правильный выбор конструктивных параметров преобразователя (расстояние между токовым $2a$ и измерительным 2Δ электродами) определяет верхний предел измерения по глубине h и точность измерений глубины.

Задача решается в два этапа: 1) вычисляется разность потенциалов U_o , измеряемая с помощью потенциальных электродов на бездефектном участке электропроводящего полупространства с электрофизическими свойствами μ и g , к которому подводится с помощью двух электродов ток с поверхностной плотностью j_o частотой ω ; 2) вычисляется разность потенциалов U_g , измеряемая с помощью потенциальных электродов и обусловленная протяженным дефектом конечной глубины.

При соблюдении требуемых геометрических соотношений измеренная глубина дефекта оказывается пропорциональна относительной разности потенциалов:

$$h = 2\Delta \frac{U_g - U_o}{U_o}$$

где Δ – расстояние между измерительными электродами.

Электропотенциальные приборы применяют для измерения толщины стенок деталей, для изучения анизотропии электрических и магнитных свойств, обусловленной приложенными к объекту контроля механическими напряжениями, но основное назначение этих приборов измерение глубины трещин, обнаруженных другими методами НК. Электропотенциальный метод с использованием четырех электродов является единственным методом, который позволяет осуществить простое измерение глубины (до 100 – 120 мм) поверхностных трещин.

Электроискровой метод

Физические основы

Электроискровой метод используется для обнаружения нарушений сплошности диэлектрических защитных покрытий на электропроводящих ОК и для обнаружения сквозных пор и трещин в диэлектрических ОК. Электроискровой метод основывается на регистрации возникновения электрического пробоя в ОК или на его участке. Пробой твердых диэлектриков - это потеря диэлектриком диэлектрических свойств при наложении электрического поля напряженностью выше определенного значения. При пробое диэлектриков электропроводность резко возрастает, и диэлектрик становится проводником. Критическое значение напряженности электрического поля, при котором происходит пробой диэлектриков $U_{пр}$, называется электрической прочностью диэлектрика. В сильных электрических полях протекание тока через диэлектрик не подчиняется закону

Ома. Ток возрастает с напряжением примерно экспоненциально и затем при некотором значении напряженности поля увеличивается скачком до очень больших значений. Протекание больших токов ведет к разрушению материала, а диэлектрические свойства в большинстве случаев после снятия напряжения не восстанавливаются. Основные формы пробоя твердых диэлектриков - тепловая и электрическая.

Тепловой пробой в общих чертах развивается следующим образом. При повышении напряжения увеличивается количество тепла, выделяемое в диэлектрике, и, следовательно, повышается температура. Так как для диэлектриков электропроводность увеличивается с температурой по экспоненте, то повышение температуры в свою очередь вызывает увеличение тока. Стационарное состояние возможно до тех пор, пока тепловыделение не превышает теплоотвода. При некоторой напряженности поля это условие нарушается. При тепловом пробое наблюдается также зависимость $U_{пр}$ от времени приложения напряжения, условий теплоотвода и частоты переменного напряжения. Зависимость $U_{пр}$ от частоты связана с зависимостью от частоты активного сопротивления диэлектрика. Теоретически при любом значении сопротивления диэлектрика должен наступить тепловой пробой.

При больших значениях удельного электрического сопротивления или малых временах приложения напряжения и низких температурах еще до наступления теплового пробоя может наступить **электрический пробой** диэлектрика. В отличие от теплового пробоя, электрический пробой является нарушением не теплового равновесия диэлектрика, а стационарного режима электропроводности. Для электрического пробоя твердых диэлектриков характерно слабое увеличение электрической прочности с температурой, сильная зависимость измеряемой электрической прочности от степени однородности электрического поля, отсутствие зависимости в однородном электрическом поле от времени приложения напряжения вплоть до времен порядка 10^{-7} с.

При помещении образца диэлектрика между электродами часто наблюдается появление искровых разрядов вдоль его поверхности, которые переходят в дуговой разряд (**поверхностный пробой**). Напряжение поверхностного пробоя обычно меньше напряжения пробоя воздуха при том же расстоянии между электродами. Поверхностный пробой - это пробой воздуха, осложненный присутствием диэлектрика. Наличие на поверхности

диелектрика зарядов и различие диэлектрических проницаемостей и проводимостей воздуха и диелектрика приводят к сильному искажению электрического поля Это и снижает $U_{пр}$ воздуха при поверхностном пробое.

Технические основы

Высокое переменное, импульсное или постоянное напряжение может прикладываться между электропроводящим основанием ОК и специальным электродом на покрытии, или между двумя электродами, расположенными с противоположных сторон диэлектрического ОК. Если в диэлектрике, к которому приложено высокое напряжение, имеются канальные поры или трещины, то в этом месте возникает коронный или искровой разряд.

Коронный разряд - один из видов разряда в газе при нормальном давлении (порядка 10^5 Па) в сильно неоднородном электрическом поле Коронный разряд возникает на электродах с малым радиусом кривизны (острия, тонкие проволоки и т.п.). Ионизация и возбуждение молекул газа при коронном разряде происходят лишь в небольшой области вблизи коронирующего электрода, в остальной части разрядного промежутка происходит несамостоятельный разряд Сопротивление этой "темной" области разряда определяет ток в цепи разрядного промежутка. Наряду со стационарным протеканием тока в коронном разряде имеют место прерывистые явления, благодаря которым коронный разряд служит источником значительных радиопомех.

Искровой разряд - прерывистая форма электрического разряда в газах, возникающая обычно при нормальном атмосферном давлении (порядка 10^5 Па). В естественных природных условиях искровой разряд легко наблюдать в виде молнии. По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких, быстро исчезающих или сменяющих друг друга нитевидных, часто сильно разветвленных полосок - так называемых искровых каналов. Эти каналы развиваются как от положительного, так и от отрицательного электродов либо начинаются в пространстве между ними. При этом каналы, развивающиеся от положительного электрода, имеют четкие нитевидные очертания, а развивающиеся от отрицательного - диффузные края и более мелкое ветвление. Искровой разряд как конечная стадия развития возникает при мощности источника тока, недостаточной для поддержания стационарного дугового или тлеющего разряда Напряжение зажигания искрового разряда достаточно велико, однако после пробоя разрядного

промежутка, когда его сопротивление становится очень малым, в цепи возникает импульс тока большой силы, напряжение на разрядном промежутке падает до значения, меньшего напряжения погасания искрового разряда, и разряд прекращается. После этого напряжение на разрядном промежутке вновь повышается до прежней величины, и процесс повторяется. Максимальная сила тока в импульсе при искровом разряде изменяется в широких пределах в зависимости от параметров цепи разряда и условий в разрядном промежутке, достигая значения порядка нескольких сотен кА.

Электроискровые дефектоскопы

Электроискровые дефектоскопы обычно содержат источник регулируемого высокого напряжения в пределах $0,5 \div 40$ кВ, электронный блок, набор электродов и вспомогательных устройств (пружинные зажимы, магнитные контакты).

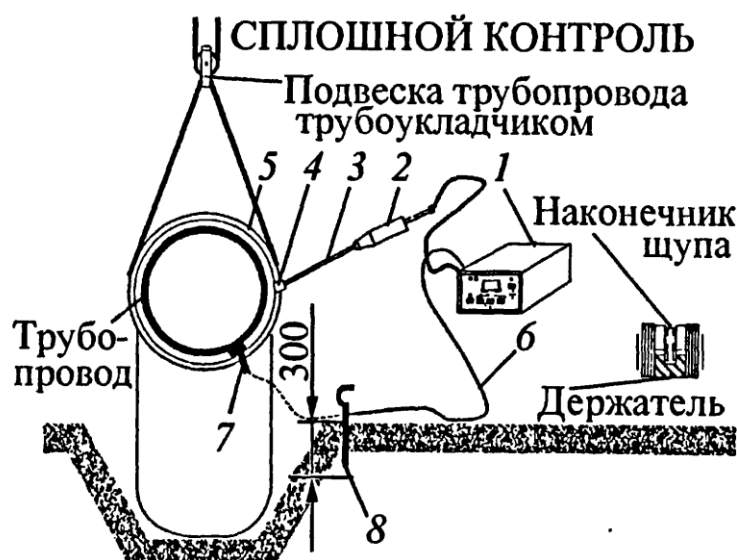


Рис. 6.2. Контроль изоляционного покрытия стальных труб электроискровым дефектоскопом с применением схватывающего электрода:

- 1 - блок управления и контроля; 2 - трансформатор высоковольтный;
- 3 - стержень; 4 - держатель; 5 - щуп для сплошного контроля;
- 6 - провод заземления; 7 - магнит-заземлитель; 8 - штырь

С помощью электронного блока регулируют испытательное напряжение, подсчитывают число пробоев. Он содержит электронные устройства световой и звуковой сигнализации о пробое, блокировки высокого напряжения при коротких замыканиях электродов на основании ОК или непреднамеренном касании электродов оператором. Электроды имеют

различные варианты исполнения, что позволяет контролировать как плоские поверхности, так и наружные и внутренние поверхности труб, а также поверхности сплошной формы. Электроискровые дефектоскопы используют для контроля качества диэлектрических покрытий толщиной до 10 мм из эпоксидных смол, полимерных материалов, битума, эмали, стекла, лаков и красок, позволяя обнаруживать такие дефекты, как трещины, царапины и т.п.

Методы электрического сопротивления

Общие сведения и физические основы

При решении задач технического диагностирования, контроля и прогнозирования состояния узлов машин и механизмов (подшипников качения, скольжения, зубчатых зацеплений и т.п.) широкое применение находят электропараметрические методы, основанные на определении искомых характеристик объекта путем оценки параметров флуктуирующих при его работе активного электрического сопротивления или проводимости. Данные методы называют электрорезистивными, они существенно расширяют область применения традиционных методов электрического сопротивления, основанных на оценке состояния электропроводящих объектов (например, медных проводников на печатных платах) по их электрическому сопротивлению.

При реализации электрорезистивных методов состояние объекта оценивается при его работе в эксплуатационных (или имитирующих эксплуатационные) режимах и условиях. При этом специальные первичные преобразователи не применяются – сигнал измерительной информации снимается непосредственно с трущихся деталей или деталей, гальванически связанных с ними, а определение необходимых характеристик объекта осуществляется с помощью соответствующих алгоритмов обработки информации.

Методы обеспечивают комплексную оценку состояния объекта, контроль макрогеометрии и поиск дефектов его рабочих поверхностей, оценку толщины и фактического состояния разделяющей поверхности смазочной пленки, количественную оценку режима смазки в зонах трения и т.п. С их помощью эффективно решаются задачи входного контроля и контроля качества сборки узлов на этапе изготовления машин и механизмов, функциональной диагностики объектов в процессе эксплуатации изделий, оценки степени износа и возможности эксплуатации объектов в течение следующей межконтрольной наработки (дефектация) при техническом

обслуживании и ремонте, функциональной диагностики объектов при проведении испытаний и трибологических исследованиях.

При работе смазанного узла вследствие гидродинамического эффекта в зонах трения его деталей самопроизвольно образуется устойчивый слой (пленка) смазочного материала, препятствующий непосредственному контактированию поверхностей. Толщина пленки непрерывно изменяется – флуктуирует, возможны ее кратковременные местные разрушения в контактах наиболее высоких неровностей поверхностей (микроконтакты), что свидетельствует о переходе от жидкостной смазки к полужидкостной или граничной. Состояние смазки в зонах трения формируется совместным действием большого числа факторов и параметров (микро- и макрогеометрия рабочих поверхностей, нагрузка в контакте и скорость относительного перемещения поверхностей, свойства конструкционных и смазочных материалов, температура, работоспособность системы смазывания и т.п.) и является комплексным критерием, количественная оценка которого обеспечивает получение необходимой информации как для контроля, так и для прогнозирования технического состояния узлов трения.

Смазочный материал обладает высоким удельным электрическим сопротивлением, поэтому изменения состояния смазки в зонах трения (флуктуации толщины пленки, ее разрушения, изменения характера контактирования поверхностей и т.п.) приводят к соответствующим изменениям электрической проводимости (g) и сопротивления (R) объекта (рис. 10.6).

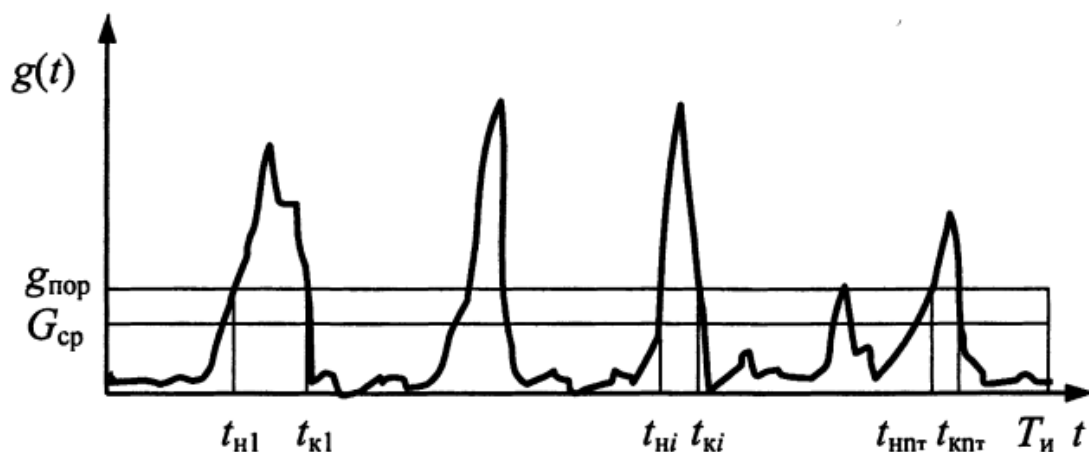


Рис. 6.3. Типичний вид залежності $g(t)$

Методи и средства дефектоскопии

Попадание дефектного участка поверхности (риски, лунки, трещины, раковины и т.п.) в нагруженную контактную зону вызывает уменьшение давления, что приводит к снижению толщины разделяющей поверхности

смазочной пленки, возрастанию вероятности микроконтактирования деталей и, соответственно, значения R . При этом степень влияния дефекта на R зависит от его вида и величины, а между его размерными параметрами (протяженность, глубина, объем) и значением R существуют однозначные монотонные зависимости.

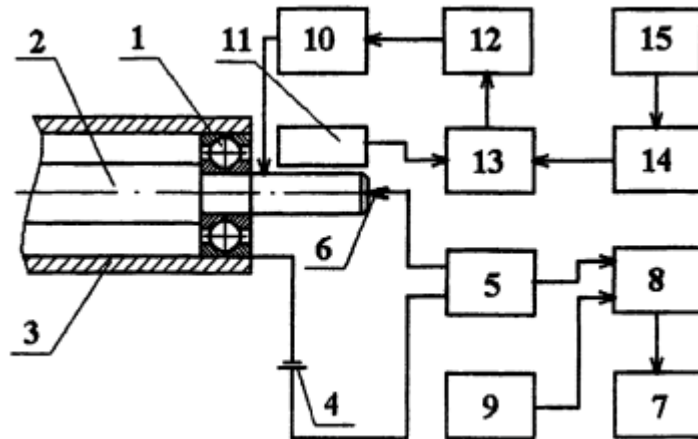


Рис. 6.4. Устройства поиска дефектов тел качения:

1 – контролируемый подшипник; 2 – вал; 3 – корпус; 4 – источник напряжения; 5 – формирователь импульсов; 6 – токосъемник; 7 – счетчик; 8 – временной селектор; 9 – генератор опорной частоты; 10 – устройство нагружения; 11 – датчик углового положения; 12 – блок управления; 13 – генератор; 14 – блок задержки; 15 – одновибратор;

Это явление положено в основу электрических методов дефектоскопии, которые применительно к подшипнику качения обеспечивают обнаружение регламентированных нормативной технической документацией повреждений рабочих поверхностей колец и тел качения как отдельного подшипника, так и опоры качения узла с глубиной поиска до поврежденного тела качения и местоположения дефекта на дорожке качения каждого из колец в условиях рабочего и тестового диагностирования.

Методы и средства контроля отклонений формы поверхностей

Значение диагностического параметра в каждый момент времени t определяется соотношением толщины смазочной пленки и параметров микро- и макрогеометрии участков поверхностей в нагруженных контактных зонах. При работе объекта в контактные зоны попадают различные сочетания участков поверхностей при различных нагрузках, следствием чего является непрерывное изменение функции $R(t)$, которая имеет детерминированную

составляющую, определяемую конструктивными особенностями объекта контроля. Отклонения макрогеометрии рабочих поверхностей (овальность, гранность) приводят к периодическому изменению кривизны контактирующих поверхностей в зонах трения деталей, изменению размеров площадок контактов, толщины смазочной пленки и, как следствие, к характерной трансформации детерминированной составляющей $R(t)$.

Это явление положено в основу электрорезистивных методов контроля отклонений формы рабочих поверхностей узлов машин и механизмов, которые применительно к подшипникам качения обеспечивают идентификацию доминирующего вида, оценку ориентации и значений отклонений макрогеометрии дорожек качения колец как отдельного подшипника, так и опоры качения в условиях рабочего и тестового диагностирования.

Физические основы термоэлектрических явлений

Работа выхода

Металлы не приобретают сами по себе положительного заряда. Значит, электроны проводимости не могут самопроизвольно покинуть металл в заметном количестве. Это объясняется тем, что металл представляет для электронов потенциальную яму. Покинуть металл удастся только тем электронам, энергия которых оказывается достаточной для преодоления потенциального барьера, имеющегося на поверхности. Силы, обуславливающие этот барьер, имеют следующее происхождение. Случайное удаление электрона от наружного слоя положительных ионов решетки приводит к возникновению в том месте, которое покинул электрон, избыточного положительного заряда. Кулоновское взаимодействие с этим зарядом заставляет электрон, скорость которого не очень велика, вернуться обратно. Таким образом, отдельные электроны все время покидают поверхность металла, удаляются от нее на несколько межатомных расстояний и затем поворачивают обратно. В результате металл оказывается окруженным тонким облаком электронов. Это облако образует совместно с наружным слоем ионов двойной электрический слой (рис. 6.5; кружки — ионы, черные точки — электроны).

Силы, действующие на электрон в таком слое, направлены внутрь металла. Работа, совершаемая против этих сил при переводе электрона из металла наружу, идет на увеличение потенциальной энергии электрона W_p .

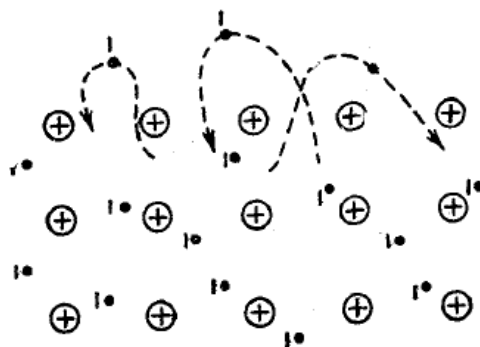


Рис. 6.5. Ионы и электроны в поверхностном слое металла и над металлом

Наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы удалить его из твердого или жидкого тела в вакуум, называется работой выхода. Работу выхода принято обозначать через $e\phi$, где ϕ – величина, имеющая размерность потенциала и называемая потенциалом выхода. Работа выхода для разных металлов имеет разное значение. У одних металлов она больше, у других – меньше.

Контактная разность потенциалов

Если привести два разных металла в соприкосновение, между ними возникнет разность потенциалов, которая называется контактной. При этом в окружающем металлы пространстве появляется электрическое поле. На рис. 6.6 изображены эквипотенциальные поверхности (сплошные линии) и линии напряженности (пунктирные) этого поля; поверхность каждого из металлов является эквипотенциальной.

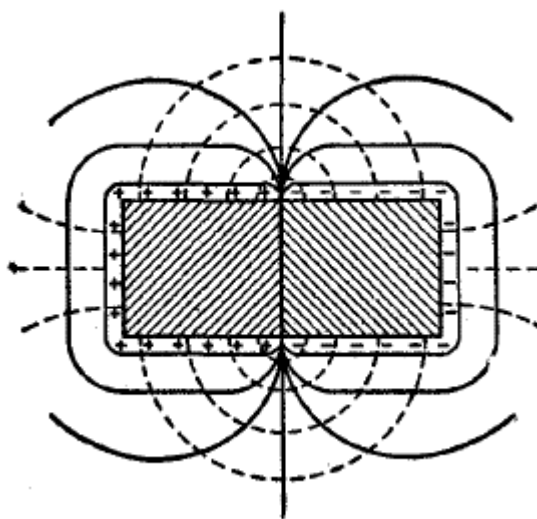


Рис. 6.6. Электрическое поле при соприкосновении разных металлов

Контактная разность потенциалов вызывается тем, что при соприкосновении двух разных металлов вследствие разного значения работы выхода в этих металлах часть электронов из одного металла переходит в другой. В результате потенциал первого металла возрастет, а второго — уменьшится. Соответственно потенциальная энергия электрона в первом металле уменьшится, а во втором увеличится.

Контактная разность потенциалов между первым и вторым металлами равна разности работ выхода для второго и первого металлов, деленной на элементарный заряд, или просто разности потенциалов выхода для второго и первого металлов. Контактная разность потенциалов колеблется для различных пар металлов от нескольких десятых вольта до нескольких вольт.

Явление Зеебека

Зеебек обнаружил в 1821 г., что если спаи 1 и 2 двух разнородных металлов, образующих замкнутую цепь (рис. 6.7), поддерживать при различных температурах, то в цепи течет ток.

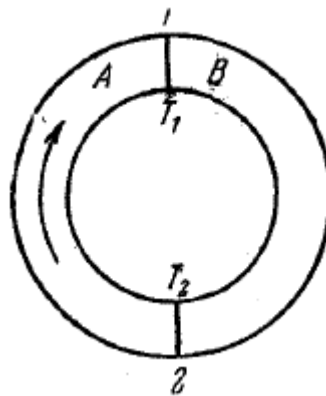


Рис. 6.7. Явление Зеебека

Изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления тока.

Явление Зеебека используется для измерения температур. Соответствующее устройство называется термопарой. Один спай термопары поддерживают при постоянной температуре (например, при 0°C), другой помещают в тот объем, температуру которого хотят измерить. О величине температуры можно судить по силе возникающего термотока, измеряемой гальванометром. Более точный результат получается, если измерять возникающую термо-э. д. с. по методу компенсации. С помощью термопар можно измерять с точностью порядка сотых долей градуса как низкие, так и высокие температуры. В качестве источников тока термопары из металлов и их сплавов не используются вследствие весьма низкого к. п. д. (не более 0,5%).

Термопары из полупроводниковых материалов обладают заметно большим к. п. д. (до 7%).

Использование термоэлектрических явлений в неразрушающем контроле

Высокая чувствительность термоэлектрических параметров к дефектам, примесям, изменению физических и механических характеристик, химического и фазового состава, простота и высокая скорость измерений предопределили успешное применение термоэлектрического метода контроля качества проводящих материалов и изделий из них. Термоэлектрическую способность материалов измерить довольно просто, поэтому именно этот параметр используется в большинстве случаев реализации термоэлектрического метода. Причем определение значения самой термоэлектрической способности материала часто не является обязательным, достаточно измерить интегральную термоЭДС в цепи из контролируемого и эталонного материалов. В основу устройств термоэлектрического контроля положен принцип механического контакта с изделием. Термоэлектрическая цепь создается между ОК и выполненными из заданного материала электродами, которые соединены с измерительным прибором. Количество применяемых измерительных электродов зависит от целей и задач контроля, но обычно применяются два электрода. Между электродами поддерживается постоянная разность температур, которая может создаваться двумя способами

- до заданных температур нагреваются оба электрода (рис 6.8),
- нагревается один из электродов, а второй поддерживается при комнатной температуре (рис 6.9), при этом нагрев прекращается при достижении заданной разности температур между ними.

Второй способ получил наибольшее практическое распространение, так как позволяет упростить конструкцию и уменьшить габариты устройства. Электрод, нагретый до более высокой температуры, получил название *горячего* электрода, другой - *холодного*.

В известных устройствах термоэлектрического контроля используется одна из двух схем измерения термоЭДС, получивших название *простой* и *дифференциальной*.

В случае **простой** схемы измеряют термоЭДС, возникающую между электродами и изделием (рис 6.10, а). ТермоЭДС в других контактах разнородных металлов сводится к нулю помещением этих контактов в условия с одинаковой температурой.

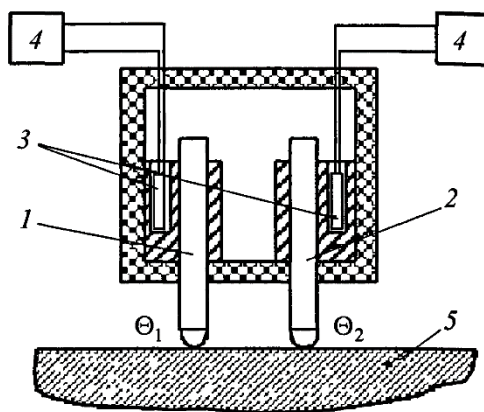


Рис. 6.8. Схема, обеспечивающая постоянную разность температур между электродами за счет нагрева обоих электродов:

- 1 - измерительный электрод, нагреваемый до температуры Θ_1 ,
- 2 - измерительный электрод, нагреваемый до температуры Θ_2 ($\Theta_2 > \Theta_1$),
- 3 - нагреватели, 4 - блоки регулирования питания нагревателей, 5 - ОК

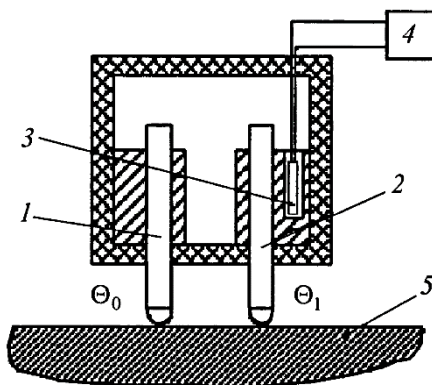


Рис. 6.9. Схема, обеспечивающая постоянную разность температур между электродами за счет нагрева одного электрода:

- 1 - измерительный электрод, поддерживаемый при комнатной температуре,
- 2 - измерительный электрод, нагреваемый до температуры Θ_2 ,
- 3 - нагреватели, 4 - блок регулирования питания нагревателей, 5 - ОК

При **дифференциальной** схеме в термоэлектрическую цепь в качестве активного элемента входит материал эталона, включенного между горячим электродом и индикаторным прибором (рис 6.10, б). ТермоЭДС, возникающая в контакте горячего электрода с эталоном, служит для полной или частичной компенсации измеряемой термоЭДС. Дифференциальная схема применяется в основном при разбраковке сплавов, так как при условии равенства температур в контактах электрод - изделие и электрод - эталон результирующая термоЭДС равна величине ЭДС в паре изделие - эталон.

Выбор материала эталона идентичным материалу изделия позволяет реализовать "нулевой метод" контроля термоЭДС. Такая разбраковка по "нулевому методу" может быть осуществлена даже при непостоянной разности температур между горячим и холодным электродами.

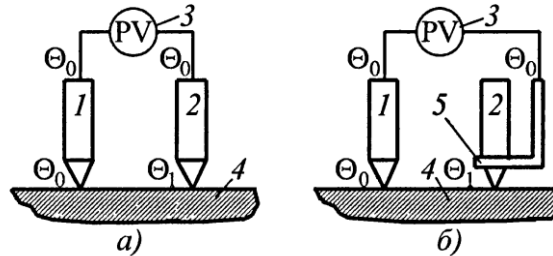


Рис. 6.10. Схемы измерения термоЭДС:

а - простая схема, б - дифференциальная схема,

1 - холодный электрод, 2 - горячий электрод, 3 - индикаторный прибор,
4 - контролируемый образец, 5 - эталон, Θ_1 , Θ_2 - температуры в контактах

На основе полученных экспериментальных значений термоЭДС определяют термоэлектрическую чувствительность контролируемого материала, а по ней на основании предварительно установленных корреляционных связей, аналитических зависимостей или градуировочных характеристик определяют различные физические, механические, тепловые и другие параметры материалов.

Средства контроля химического состава и структуры металлов и сплавов

Средства контроля химического состава и структуры металлов и сплавов основаны на высокой чувствительности термоэлектрической способности материалов к примесям в них. Добавление даже десятых долей % примеси может привести к изменению термоэлектрической способности на сотни процентов и даже изменить ее знак. Особенностью термоэлектрического метода НК, кроме того, является высокая локальность, которая определяется размерами нагреваемой области ОК и размерами неоднородностей в нем. При использовании в качестве наконечника измерительного зонда иглы термоэлектрический метод НК не имеет ограничений, связанных с формой ОК.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Как реализуется электропотенциальный метод НК? На чем он основан?
2. От каких факторов зависит разность потенциалов на поверхности контролируемого объекта?
3. Сколько электродов используется в приборе, реализующем электропотенциальный метод НК? Каково их назначение?
4. Назовите последовательность операций при проведении НК электропотенциальным методом.
5. Как связаны глубина дефекта, разность потенциалов на поверхности на бездефектом участке и разность потенциалов на поверхности над дефектом?
6. Какова предельная глубина поверхностных трещин, которая может быть замерена электропотенциальным методом?
7. В чем уникальность электропотенциального метода НК?
8. Электропотенциальный метод НК является основным методом выявления поверхностных трещин или дополнительным?
9. Назовите основные формы пробоя твердых диэлектриков.
10. Восстанавливаются ли диэлектрические свойства материала после пробоя?
11. Какие виды электрического разряда Вам известны?
12. Для каких целей применяют электроискровые дефектоскопы?
13. Какой параметр является информационным в электрорезистивном методе НК?
14. С каких частей объекта контроля снимается сигнал при проведении контроля электрорезистивным методом?
15. Какие параметры объекта контроля могут быть оценены при помощи электрорезистивного метода НК?
16. Какие свойства смазки позволяют применять электрорезистивный метод для контроля ее состояния?
17. Какие явления в зоне трения используются для проведения контроля состояния смазки электрорезистивным методом?
18. Какие свойства обеспечивают успешное применение термоэлектрического метода контроля качества изделий из проводящих материалов?
19. Что происходит при попадании дефектного участка поверхности в нагруженную контактную зону?
20. Что называется работой выхода электрона из металла?

21. Что называется термопарой?
22. В чем состоит эффект Зеебека?
23. Что называется контактной разностью потенциалов?
24. Каким образом в термоэлектрических дефектоскопах поддерживается постоянная разность температур между электродами?
25. Какие две основные схемы применяются для построения термоэлектрических дефектоскопов?
26. Что такое "нулевой метод" контроля термоЭДС?
27. На каком явлении основывается работа термоэлектрических средств контроля химического состава и структуры металлов и сплавов?

Уровень курса

1. Электропотенциальный метод неразрушающего контроля.
2. Физические основы электроискрового метода неразрушающего контроля.
3. Технические основы электроискрового метода неразрушающего контроля.
4. Физические основы электрорезистивного метода неразрушающего контроля.
5. Работа выхода электрона из металла.
6. Контактная разность потенциалов и эффект Зеебека.
7. Использование термоэлектрических явлений в неразрушающем контроле.

Лекція № 7

Тема: Природа магнетизма. Магнитное поле. Магнитные свойства веществ.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Магнитные явления и природа магнетизма | 2 |
| Магнитное поле | 7 |
| Взаимодействие токов | 7 |
| Магнитная индукция | 8 |
| Напряженность магнитного поля и закон полного тока | 10 |
| Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля ... | 11 |
| Магнитные свойства веществ | 12 |
| Подразделение веществ на сильномагнитные и слабомагнитные. | 12 |
| Основные характеристики ферромагнитных материалов | 13 |
| Потери, обусловленные гистерезисом | 15 |
| Магнитомягкие и магнитотвердые материалы | 15 |
| Контрольные вопросы по теме | 17 |
| Уровень модуля | 17 |
| Уровень курса | 18 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. /В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.: ил.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

Магнитные явления и природа магнетизма

Магнитные свойства присущи всем без исключения окружающим телам. Магнетизм так же универсален, как земное притяжение и электричество. Однако не у всех тел это свойство проявляется в одинаковой степени. У подавляющего большинства тел магнитные свойства очень слабы. Можно указать два наиболее ярких проявления магнетизма.

Во-первых, это так называемые постоянные магниты, обычно изготовленные из железа или его сплавов и соединений, а также из некоторых других химических элементов - никеля, кобальта и редкоземельных элементов (лантаноидов), например, гадолиния. Во-вторых, проявление аналогичной силы можно увидеть, если взамен упомянутых постоянных магнитов взять проводники (или катушки из них - соленоиды), по которым протекает постоянный электрический ток. Рассмотрим два постоянных магнита из одинаковых массивных железных стержней (рис. 7.1.). Будем считать, что заштрихованный конец стержня имеет знак "+" и обозначен буквой N, а незаштрихованный конец - знак "-" и обозначен буквой S. Стержни, изображенные на рис. 7.1, направлены друг к другу одинаковыми знаками и буквами (+, N). Чтобы сблизить стержни, необходимо приложить усилия. На рис. 7.2, где стержни обращены друг к другу разными знаками и буквами (+, N и -, S), усилия направлены на то, чтобы не дать стержням соприкоснуться. Достаточно ослабить усилие, как в первом случае магнитные стержни разъедутся, а во втором - плотно соединятся.

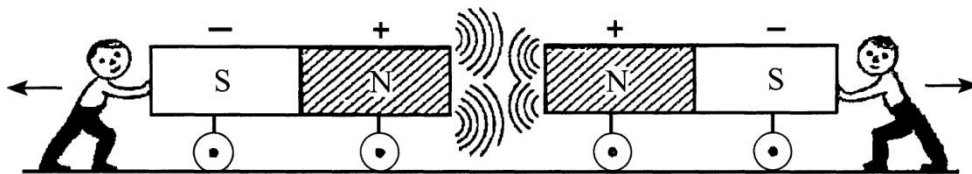


Рис. 7.1. Усилия при попытке сблизить одноименные концы постоянного магнита

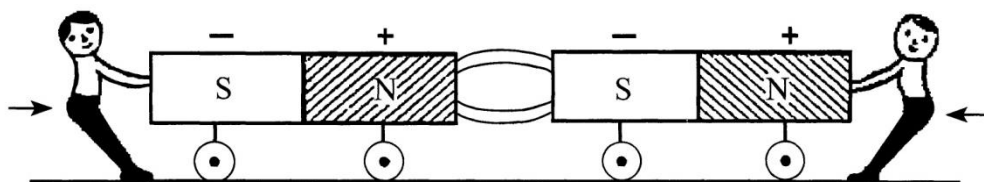


Рис. 7.2. Усилия при попытке удержать постоянные магниты, направленные друг к другу разноименными концами

Существует еще один наглядный способ обнаружения магнитного действия постоянных магнитов. Если около магнита поместить металлическую деталь, которая до приближения к магниту не проявляла

никаких магнитных действий, то вблизи постоянного магнита эта деталь сама становится магнитом. На стороне детали, обращенной к магниту, возникает состояние, при котором она всегда притягивается к магниту, подобно разноименным концам магнитных стержней (рис. 7.3).

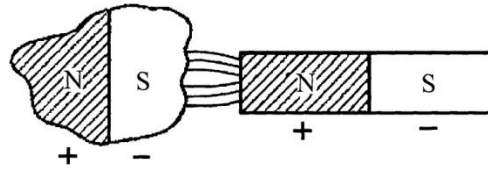


Рис. 7.3. Магнитоиндукционный эффект

Этот магнитоиндукционный эффект можно использовать для обнаружения в пространстве, окружающем магнит, его магнитного действия. На рис. 7.4, а показано проявление таких магнитных действий стержневым постоянным магнитом, полученное с помощью магнитных порошков. Частицы порошка (имея несколько удлиненную форму) выстраиваются вдоль линий, которые выходят из одного конца магнита и входят в другой его конец (рис. 7.4, б). Их принято называть линиями индукции, или магнитными силовыми линиями, поскольку именно вдоль них направлены силы (показаны на рис. 7.4, б стрелками), ориентирующие частицы магнитного порошка вокруг магнита.

Напомним, что концы магнитов называют полюсами. Если вблизи магнита нет других магнитов, каких-либо больших железных предметов или залежей магнитной руды, то подвешенный магнит всегда ориентируется почти точно вдоль географического меридиана с юга на север (рис. 7.5).

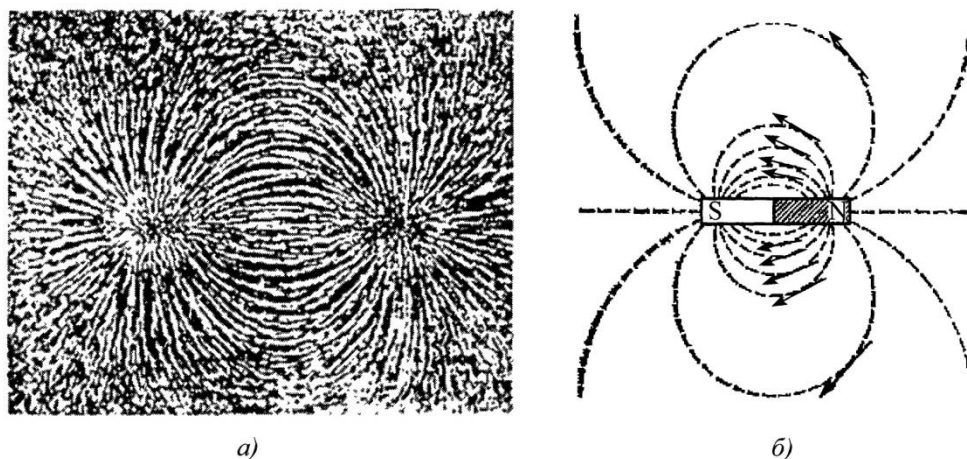


Рис.7.4. Картина линий индукции стержневого магнита, полученная с помощью магнитных порошков (а), и векторный характер магнитного поля (б)

Вокруг магнитов существует особая форма материи - магнитное поле. Это и есть тот материальный носитель, который передает взаимодействие между магнитами. Этот носитель передает взаимодействие и между электрическими токами.

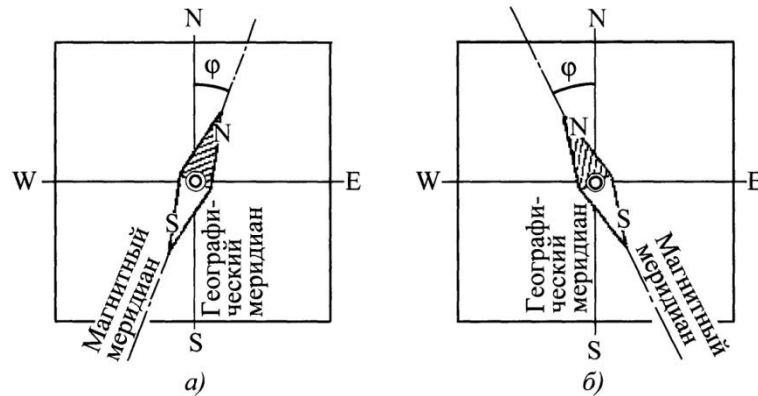


Рис. 7.5. Направление магнитной стрелки относительно географического меридиана в местах с восточным (а) и с западным (б) магнитным склонением (φ - угол склонения)

Существуют тела, которые могут притягиваться и отталкиваться от магнитов, не находясь при этом в непосредственном контакте с ними. Сила притяжения или отталкивания прямо пропорциональна расстоянию между магнитом и взаимодействующим с ним телом.

Некоторые тела вблизи магнита сами становятся ярко выраженными магнитами. Однако при удалении магнита они могут как сохранить, так и потерять это свойство. Сами исходные магниты также могут утратить свои магнитные свойства, например, если нагреть их выше определенной температуры, а потом охладить без присутствия других магнитов поблизости, или же подвергнуть их сильным механическим ударам. Восстановить магнитные свойства, утерянные при нагревании, можно путем охлаждения вблизи другого магнита или с помощью воздействия постоянных электрических токов, протекающих по проводам или соленоидам, а потерянные при ударах - теми же способами даже без охлаждения.

На направление стрелки компаса влияют не только магнитное поле Земли или поле постоянных магнитов, но и электрические токи (рис. 7.6). Это впервые в 1820 г. обнаружил датский физик Ханс Кристиан Эрстед.

Вокруг проводника с током, как и вокруг постоянного магнита, возникает магнитное поле. Это можно подтвердить с помощью частиц магнитного порошка, которые "нарисуют" линии индукции магнитного поля электрических токов.

На рис. 7.7 приведены хорошо известные картины линий индукции магнитных полей прямого и кругового токов, а также соленоида, полученные с помощью железных опилок. Хотя эти картины и похожи на аналогичные картины для постоянных магнитов, но есть и некоторые различия.

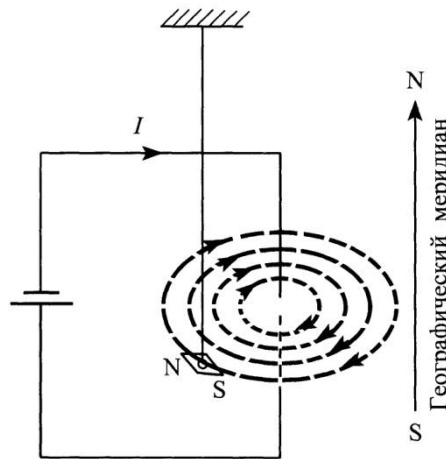


Рис. 7.6. Направление магнитной стрелки около прямого проводника с электрическим током I (открытие Эрстеда)

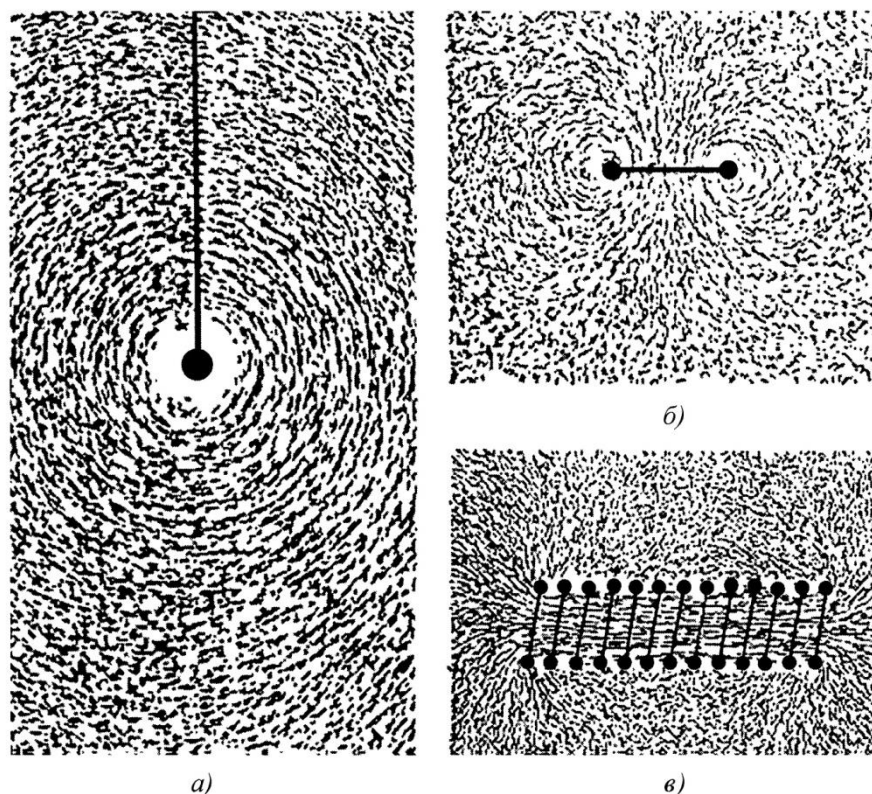


Рис. 7.7. Картины линий индукции магнитных полей, полученные с помощью магнитного порошка: а - для прямого тока; б - для замкнутого кругового тока; в - для соленоида с током

Сравним картины линий индукции стержневого магнита и соленоида (см. рис. 7.4, а и рис. 7.7, в). Если исключить внутреннюю часть последнего, то картины поля совершенно подобны. Однако у соленоида силовые линии в отличие от магнита не имеют ни начала, ни конца - они всегда замкнуты как у прямого, так и кругового проводника.

Французский физик Ампер еще в 20-х годах XIX столетия, сразу после опытов Эрстеда, выдвинул гипотезу о молекулярных токах: электрические токи могут быть не только макроскопическими, когда они текут по большим (по сравнению с размерами атомов) проводам, но и микроскопическими, протекающими в пределах одного атома или молекулы. Таким образом, в каждом теле имеется огромное число замкнутых молекулярных токов. Каждый из них создает вокруг себя магнитное поле, подобное полю замкнутого кругового тока (см. рис. 7.7, б).

В большинстве тел, когда на них не действуют никакие внешние ориентирующие силы, тепловое хаотическое движение все время меняет направление молекулярных токов, и поэтому наиболее вероятно, что в среднем магнитные поля этих токов не складываются в одно результирующее поле, а дают в сумме нулевой эффект. На рис. 7.8, а показано беспорядочное распределение ориентации молекулярных токов в теле, "скрывающее" его магнетизм. Постоянные магниты отличаются от других тел только тем, что в них по определенным причинам молекулярные токи ориентированы упорядоченно - параллельно (рис. 7.8, б) и поэтому дают вполне заметный суммарный магнитный эффект во внешнем пространстве.

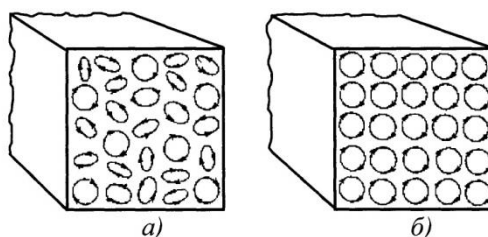


Рис. 7.8. Микроскопические (молекулярные) замкнутые токи в постоянном магните: а - при беспорядочном распределении (гипотеза Ампера); б - при упорядоченном распределении

Если в телах нет внутренних, закрепляющих параллельную ориентацию, взаимодействий между молекулярными токами, то такая ориентация с тем или иным эффектом может быть обусловлена только влиянием внешнего магнитного поля, например, поля постоянного магнита или соленоида с током.

Гипотеза Ампера о молекулярных токах сначала была лишь гениальной догадкой. Только в конце XIX - начале XX веков, когда был открыт электрон,

когда была предсказана и получила опытное подтверждение ядерная структура атомов, эта гипотеза нашла полное экспериментальное и теоретическое обоснование.

Ампер дал "токовую" интерпретацию магнитным взаимодействиям. Она связана с теоремой об эквивалентности магнитных полей, создаваемых электрическими токами и постоянными магнитами (теорема Ампера).

Магнитное поле

Взаимодействие токов

Электрические токи взаимодействуют между собой. Например, два тонких прямолинейных параллельных проводника, по которым текут токи (мы будем называть их прямыми токами), притягивают друг друга, если токи в них имеют одинаковое направление, и отталкивают друг друга, если их направления противоположны.

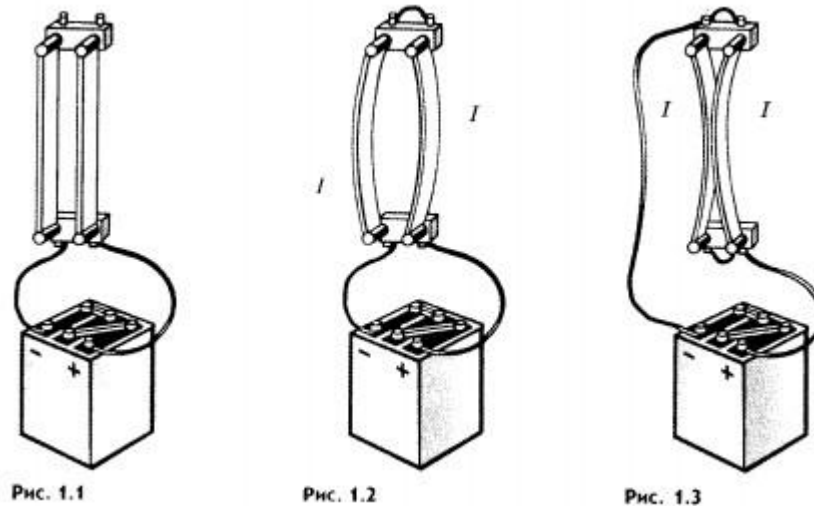


Рис 7.9

Взаимодействие токов осуществляется через поле, которое называется магнитным. Это название происходит от того, что, как обнаружил Эрстед, поле, создаваемое током, оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку.

Итак, движущиеся заряды (токи) изменяют свойства окружающего их пространства — создают в нем магнитное поле. Это поле проявляется в том, что на движущиеся в нем заряды (токи) действуют силы.

Магнитная индукция

Силовой характеристикой магнитного поля является *магнитная индукция*, которую обычно обозначают латинской буквой B или \vec{B} – когда необходимо указать ее векторную природу. Магнитная индукция \vec{B} – это векторная величина, определяемая по силовому воздействию магнитного поля на ток. Одним из основных проявлений магнитного поля является его силовое воздействие на проводник с током, помещенный в это поле. Опыт показывает, что сила \vec{F} , с которой магнитное поле действует на элемент проводника длиной $d\vec{l}$ с током I , определяется векторным произведением:

$$\vec{F} = I [d\vec{l} \vec{B}] \quad (7.1)$$

Эта сила направлена перпендикулярно индукции в данной точке поля и перпендикулярна элементу тока $I d\vec{l}$ (рис. 7.10).

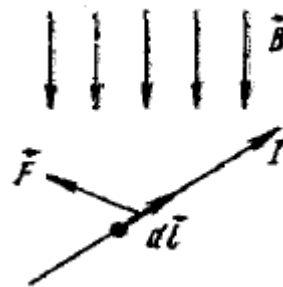


Рис. 7.10

В международной системе единиц СИ единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 1 \text{ Вб} / \text{м}^2$.

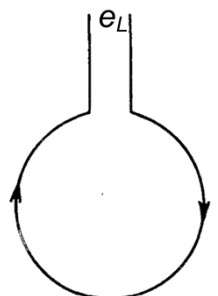


Рис. 7.11

Еще одним проявлением силовых свойств магнитного поля является явление электромагнитной индукции, которое было рассмотрено в лекции №7. Электромагнитной индукцией называется возникновения эдс в контуре при пересечении его магнитным полем. Под контуром понимается незамкнутый виток провода, имеющий форму петли (Рис. 7.11).

Индуктируемая в контуре внешним магнитным полем электродвижущая сила e определяется по формуле:

$$e_L = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (7.2)$$

Здесь Φ – это магнитный поток, пронизывающий контур:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (7.3)$$

В случае плоского контура и неизменной в пределах этого контура величине магнитной индукции магнитный поток Φ прямо пропорционален величине магнитной индукции B в данной точке магнитного поля, площади контура S и косинусу угла между вектором \vec{B} и нормалью к плоскости контура (рис. 7.12):

$$\Phi = \vec{B}\vec{S} = B \cdot S \cos \alpha \quad (7.4)$$

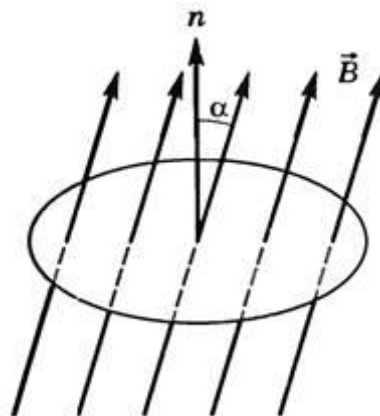


Рис. 7.12

Очевидно, что магнитный поток через контур имеет максимальное значение, когда магнитная индукция направлена перпендикулярно плоскости контура (то есть, когда $\alpha = 0$).

ЭДС индукции, наводимая внешним магнитным полем, пропорциональна **скорости изменения магнитного потока**. Знак минус в правой части формулы (7.2) обусловлен принципом Ленца, определяющим направление индуктивной эдс: «эдс направлена так, что своим действием препятствует причине, вызвавшей её появление».

Закон Ленца: эдс, наводимая в контуре изменяющимся магнитным потоком, всегда стремится вызвать ток, направленный так, чтобы воспрепятствовать изменению магнитного потока.

Если площадь контура неизменна, и угол α не меняется, то ЭДС, наводимая в контуре магнитным полем, оказывается пропорциональна скорости изменения магнитной индукции B , которая, как уже было сказано ранее, является силовой характеристики поля.

Напряженность магнитного поля и закон полного тока

Другой характеристикой магнитного поля является его *напряженность*. Магнитное поле в каждой точке характеризуется вектором *напряженности* \vec{H} , величина которого измеряется в А/м. Напряженность характеризует связь параметров поля с величиной источника поля. Как было указано выше, источником магнитного поля является электрический ток.

Магнитное поле создается электрическими токами. Количественная связь между линейным интегралом от вектора напряженности магнитного поля \vec{H} вдоль любого произвольного контура и алгебраической суммой токов $\sum I$, охваченных этим контуром, определяется **законом полного тока**:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I \quad (7.5)$$

Данная формула иллюстрируется следующим рисунком.

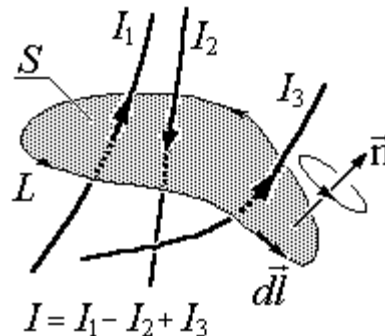


Рис. 7.13

Положительное направление интегрирования связано с положительным направлением тока I правилом правого винта. Если контур интегрирования будет пронизывать катушку с числом витков w (синий контур L1 на рис.7.14), по которой проходит ток I , то $\sum I = Iw$ и $\oint \vec{H} d\vec{l} = Iw$.

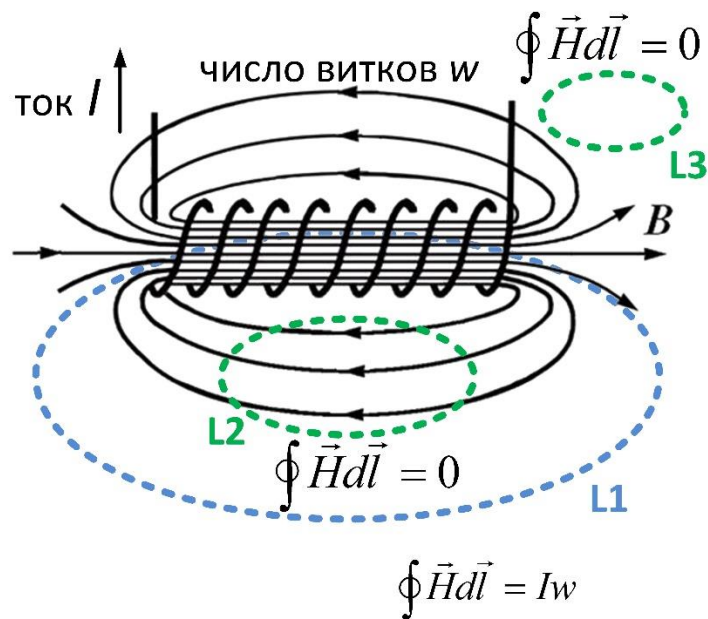


Рис. 7.14

Если контур интегрирования не охватывает ни одного витка катушки (зеленые контура L2 и L3), ни одного провода, по которому протекает электрический ток, то в этом случае:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = 0 \tag{7.6}$$

Разумеется, этот интеграл $\oint \vec{H} d\vec{l}$ также равен нулю всегда, когда по катушке не пропускается ток, то есть когда $I=0$, даже если интегрирование идет по контуру L1.

Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля

Итак, напряженность магнитного поля H показывает **причину** появления магнитного поля: почему оно возникает? Эта характеристика отражает связь с источником возникновения магнитного поля – с электрическим током (формула (7.5)). А вот магнитная индукция B отражает силовые свойства поля. Она показывает, с какой силой данное магнитное поле действует на провод с током, помещенный в это поле (формула (7.1)). То есть, магнитная индукция указывает на **последствия** наличия магнитного поля: на то, как оно проявляется, как можно его обнаружить?

Существует ли связь между этими двумя характеристиками: напряженностью и магнитной индукцией?

Да. Если мы рассматриваем магнитное поле в вакууме, то обе эти характеристики фактически представляют собой одну и ту же величину:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \tag{7.7}$$

Они отличаются только масштабным коэффициентом, который зависит от выбранной системы единиц. Можно подобрать такую систему единиц, при которой напряженность и магнитная индукция будут полностью совпадать. В применяемой нами международной системе единиц СИ B и H связаны через коэффициент μ_0 , который носит название *магнитная постоянная*, она равна:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \quad (7.8)$$

Казалось бы, зачем тогда вводить две характеристики магнитного поля вместо одной? Все дело в том, что для веществ равенство (7.7) не соблюдается. Если магнитное поле распространяется не в вакууме, а внутри вещества: внутри газа (например, воздух), внутри жидкости (например, вода) или внутри твердого тела (например, дерево или железо), – то вместо формулы (7.7) необходимо пользоваться другой формулой:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (7.9)$$

И, здесь, как видите, появляется еще один коэффициент, обозначаемый μ , и имеющий название *относительная магнитная проницаемость*. Относительная магнитная проницаемость разная для разных веществ. Соответственно, разной для разных веществ является и *абсолютная магнитная проницаемость*

$$\mu_a = \mu_0 \mu \quad (7.10)$$

С использованием абсолютной магнитной проницаемости формула (7.9) может быть переписана следующим образом:

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} \quad (7.11)$$

Магнитные свойства веществ

Подразделение веществ на сильномагнитные и слабомагнитные

Из курса физики известно, что вещества по их магнитным свойствам подразделяют на диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные. У диамагнитных веществ относительная магнитная проницаемость практически не отличается от единицы, но все же несколько меньше единицы $\mu < 1$, например, для висмута = 0,99983. У парамагнитных веществ $\mu > 1$, однако также в очень небольшой степени. Например для платины = 1,00036. У ферромагнитных веществ (железо, кобальт и их сплавы) μ много больше единицы (например, 10^4 , а у некоторых материалов даже до 10^6). При решении большинства электротехнических задач достаточно подразделять все

вещества не на перечисленные группы, а на сильномагнитные (или даже просто магнитные), у которых $\mu \gg 1$, и на слабомагнитные (немагнитные), у которых относительная магнитная проницаемость практически не отличается от единицы $\mu \approx 1$.

Основные характеристики ферромагнитных материалов

Свойства ферромагнитных материалов принято характеризовать зависимостью магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H . Различают два основных типа этих зависимостей: кривые намагничивания и гистерезисные петли.

Под кривыми намагничивания понимают однозначную зависимость между B и H . Кривые намагничивания подразделяют на начальную, основную и безгистерезисную (что будет пояснено далее).

Из курса физики известно, что ферромагнитным материалам присуще явление гистерезиса – отставание изменения магнитной индукции B от изменения напряженности магнитного поля H . Он обусловлен необратимыми изменениями энергетического состояния под действием внешнего поля H . При периодическом изменении напряженности поля зависимость между B и H приобретает петлевой характер.

Различают несколько типов гистерезисных петель – симметричную, предельную и несимметричную (частный цикл).

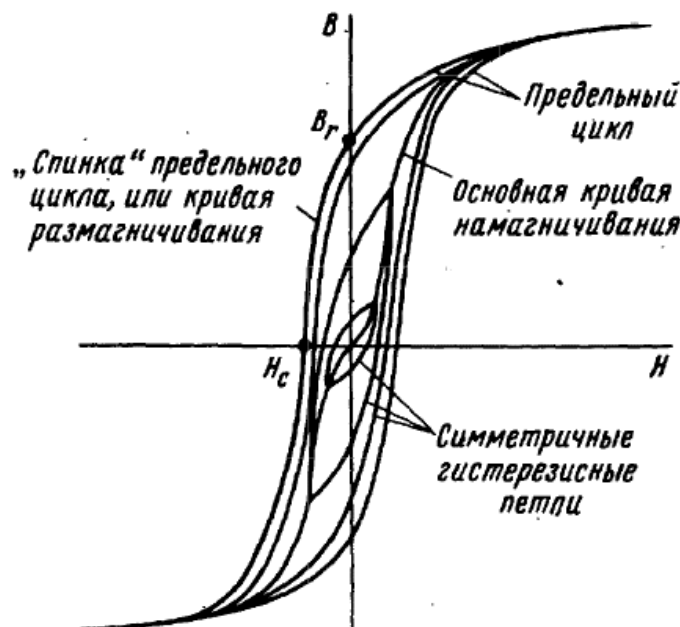


Рис. 7.15

На рис. 7.15 изображено семейство симметричных гистерезисных петель. Для каждой симметричной петли максимальное положительное

значение B равно максимальному отрицательному значению B и соответственно $H_{max} = |-H_{max}|$.

Геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель называют *основной кривой намагничивания*. При очень больших H вблизи $\pm H_{max}$ восходящая и нисходящая ветви гистерезисной петли практически сливаются.

Предельной гистерезисной петлей или *предельным циклом* называют симметричную гистерезисную петлю, снятую при очень больших H_{max} . Индукцию при $H = 0$ называют *остаточной индукцией* и обозначают B_r .

Напряженность поля при $B=0$ называют *задерживающей* или *коэрцитивной силой* и обозначают H_c .

Участок предельного цикла $B_r H_c$ (рис. 7.15) принято называть кривой размагничивания или «спинкой» гистерезисной петли.

Этот участок используют при расчетах магнитных цепей с постоянными магнитами и магнитных элементов запоминающих устройств вычислительной техники.

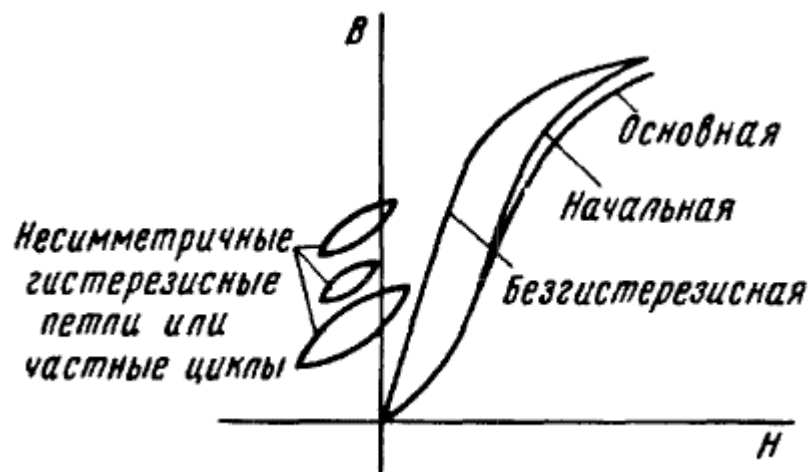


Рис. 7.16

Если изменять H периодически и так, что $+H_{max} \neq |-H_{max}|$, то зависимость между B и H будет иметь вид петли, но центр петли не совпадает с началом координат (рис. 7.16). Такие гистерезисные петли называют частными петлями гистерезиса или частными циклами.

Когда предварительно размагниченный ферромагнитный материал ($B=0$, $H=0$) намагничивают, монотонно увеличивая H , получаемую зависимость между B и H называют начальной кривой намагничивания.

Начальная и основная кривые намагничивания настолько близко расположены друг к другу, что практически во многих случаях их можно считать совпадающими (рис. 7.15).

Безгистерезисной кривой намагничивания называют зависимость между B и H , возникающую, когда при намагничивании ферромагнитного материала его периодически постукивают или воздействуют на него полем, имеющим кроме постоянной составляющей еще и затухающую по амплитуде синусоидальную составляющую. При этом гистерезис как бы снимается.

Безгистерезисная кривая намагничивания резко отличается от основной кривой.

В различных справочниках, а также в стандартах в качестве однозначной зависимости между B и H дается основная кривая намагничивания.

Потери, обусловленные гистерезисом

При периодическом перемагничивании ферромагнитного материала в нем совершаются необратимые процессы, на которые расходуется энергия от намагничивающего источника. В общем случае потери в ферромагнитном сердечнике обусловлены гистерезисом, макроскопическими вихревыми токами и магнитной вязкостью. Степень проявления различных видов потерь зависит от скорости перемагничивания ферромагнитного материала. Если сердечник перемагничивается во времени замедленно, то потери в сердечнике обусловлены практически только гистерезисом (потери от макроскопических вихревых токов и магнитной вязкости при этом стремятся к нулю).

Площадь гистерезисной петли $\oint HdB$ характеризует энергию, выделяющуюся в единице объема ферромагнитного вещества за один цикл перемагничивания.

Если ферромагнитный сердечник подвергается периодическому намагничиванию (например, в цепях переменного тока), то для уменьшения потерь на гистерезис в нем он должен быть выполнен из магнитомягкого материала.

Магнитомягкие и магнитотвердые материалы

По величине коэрцитивной силы ферромагнитные материалы подразделяют на магнитомягкие и магнитотвердые. Материалы, у которых $H_c < 4$ кА/м, относятся к магнитомягким, у которых $H_c > 4$ кА/м – к магнитотвердым

Магнитомягкие материалы обладают круто поднимающейся основной кривой намагничивания и относительно малыми площадями гистерезисных петель. Их применяют во всех устройствах, которые работают или могут работать при периодически изменяющемся магнитном потоке (трансформаторах, электрических двигателях и генераторах, индуктивных катушках и т. п.).

Некоторые магнитомягкие материалы, например перминвар, сплавы 68НМП и др., обладают петлей гистерезиса по форме, близкой к прямоугольной (рис. 7.17,а). Такие материалы получили распространение в энергетике, радиотехнике и устройствах автоматики.

В группу магнитомягких материалов входят электротехнические стали, железоникелевые сплавы типа пермаллоя и др.

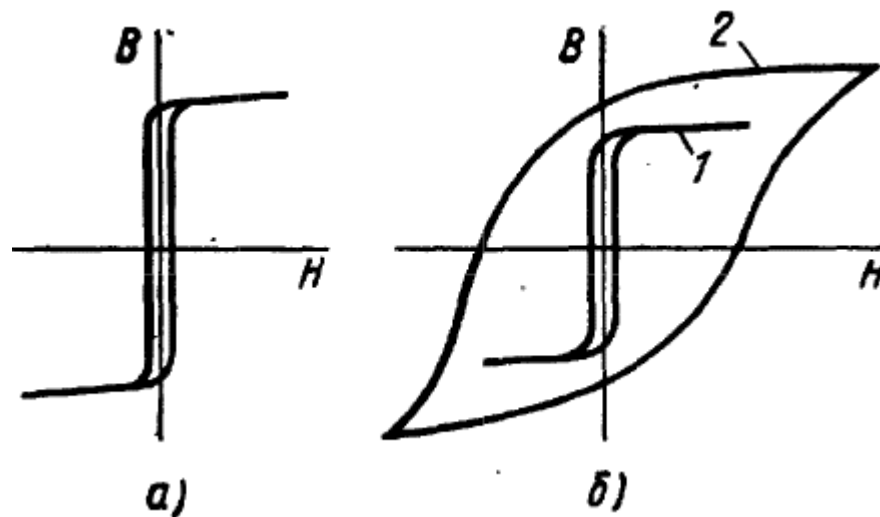


Рис 7.17

Магнитотвердые материалы обладают полого поднимающейся основной кривой намагничивания и большой площадью гистерезисной петли. В группу магнитотвердых материалов входят углеродистые стали, сплавы магнито, вольфрамовые, платинокобальтовые сплавы и сплавы на основе редкоземельных элементов, например самарийкобальтовые. У последних $B_r \approx 0,9$ Тл и $H_c = 660$ кА/м.

На рис. 7.17, б качественно сопоставлены гистерезисные петли для магнитомягкого материала типа пермаллоя (кривая 1) и для магнитотвердого материала (кривая 2).

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. В чем, по гипотезе Ампера, причина возникновения магнитных явлений?
2. В чем проявляется взаимодействие токов при их протекании по параллельным проводникам?
3. Как называется поле, через которое происходит взаимодействие токов?
4. Как называется силовая характеристика магнитного поля?
5. Как связаны сила \vec{F} , с которой магнитное поле действует на элемент проводника длиной $d\vec{l}$ с током I , и индукция этого магнитного поля?
6. В каких единицах измеряется магнитная индукция?
7. Как связана эдс, индуцируемая магнитным полем в контуре, и магнитный поток пронизывающий этот контур?
8. Что такое магнитный поток?
9. При каких условиях магнитный поток через контур имеет максимальное значение?
10. Сформулируйте закон Ленца.
11. В каких единицах измеряется напряженность магнитного поля?
12. Запишите формулу, выражающую закон полного тока.
13. Если контур интегрирования не охватывает ни одного провода с током, то чему будет равен интеграл от напряженности магнитного поля по этому контуру?
14. Как связаны величины магнитной индукции и напряженности магнитного поля в вакууме?
15. Как называется коэффициент μ_0 в формуле, связывающей магнитную индукцию и напряженность магнитного поля в вакууме?
16. Как связаны величины магнитной индукции и напряженности магнитного поля в веществе?
17. Как связаны абсолютная и относительная магнитные проницаемости?
18. На какие три группы подразделяют вещества по их магнитным свойствам?
19. Какие вещества называют диамагнитными?
20. Какие вещества называют парамагнитными?
21. Какие вещества называют ферромагнитными?
22. Какие два основных типа зависимостей индукции от напряженности характеризуют магнитные свойства материалов?

23. Какие виды кривых намагничивания Вам известны?
24. Какие существуют типы гистерезисных петель?
25. Что называют основной кривой намагничивания?
26. Что называют предельной гистерезисной петлей?
27. Что называют остаточной индукцией?
28. Что называют коэрцитивной силой?
29. Что называют начальной кривой намагничивания?
30. Какую кривую намагничивания ферромагнитных материалов приводят в справочниках и стандартах?
31. В каких материалах потери на гистерезис больше: в материалах с широкой петлей гистерезиса или в материалах с узкой петлей гистерезиса?
32. По величине какого параметра различают магнитомягкие и магнитотвердые материалы?
33. Какие материалы называют магнитомягкими?
34. Какие материалы называют магнитотвердыми?
35. В каких случаях применяют магнитомягкие материалы?
36. В каких случаях применяют магнитотвердые материалы?

Уровень курса

1. Магнитные явления и природа магнетизма.
2. Магнитное поле.
3. Магнитная индукция.
4. Напряженность магнитного поля и закон полного тока.
5. Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля.
6. Основные характеристики ферромагнитных материалов: кривые намагничивания и гистерезисные петли.
7. Деление веществ на диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные.
8. Деление ферромагнитных веществ на магнитомягкие и магнитотвердые.

Лекція № 8

Тема: Физические основы магнитного вида неразрушающего контроля**Оглавление**

| | |
|---|----|
| Магнитное поле над дефектом | 3 |
| Способы намагничивания объекта..... | 4 |
| Продольное намагничивание..... | 4 |
| Циркулярное намагничивание..... | 6 |
| Комбинированное намагничивание | 7 |
| Параллельное намагничивание..... | 7 |
| Физические основы регистрации дефектов с помощью магнитного порошка..... | 8 |
| “Сухой” способ..... | 9 |
| “Мокрый” способ | 9 |
| Физические основы магнитографического способа регистрации дефектов..... | 11 |
| Способы размагничивания объектов | 13 |
| Магнитные преобразователи | 14 |
| Пассивный индукционный преобразователь и физические основы его работы | 14 |
| Магнитная индукционная головка | 16 |
| Феррозондовый преобразователь и физические основы его работы | 17 |
| Физические основы работы преобразователей Холла | 20 |
| Физические основы работы магниторезисторов | 20 |
| Контрольные вопросы по теме | 22 |
| Уровень модуля..... | 22 |
| Уровень курса..... | 23 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. /В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.: ил.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

<https://www.youtube.com/watch?v=qpgcD5k1494>

Магнитное поле над дефектом

Магнитные методы неразрушающего контроля (МНК) применяются только для контроля деталей и изделий, изготовленных из ферромагнитных материалов, находящихся в намагниченном состоянии. МНК основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, поэтому эти методы позволяют определять только поверхностные и подповерхностные дефекты, залегающие в ферромагнетиках на глубинах, не превосходящих 15 мм.

Дефекты наиболее легко обнаруживаются, когда направление намагничивания контролируемой детали перпендикулярно направлению дефекта. Для оптимального выявления дефектов при МНК намагничивание контролируемых изделий производят в двух направлениях, а деталей сложной формы в нескольких направлениях.

На рис. 8.1 приведена схема образования магнитного поля над дефектом. Контролируемая деталь 1 с трещиной 2 помещена между полюсами NS постоянного магнита (электромагнита). Над трещиной возникает магнитное поле рассеяния 3, эквивалентное маленькому магниту с полюсами NS.

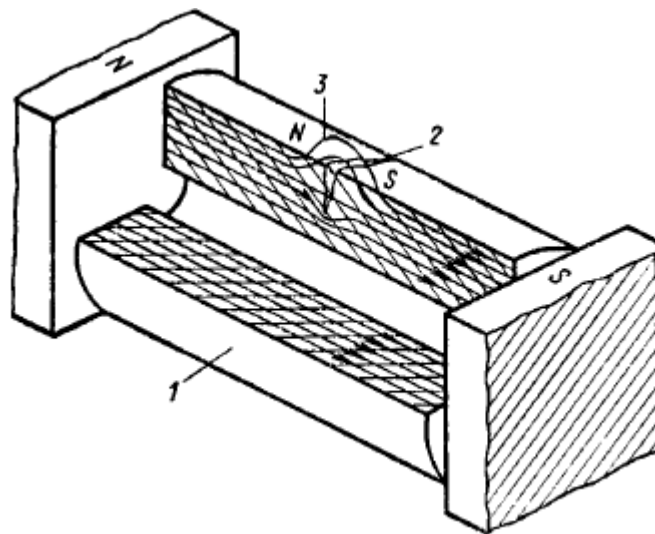


Рис. 8.1. Схема образования магнитного поля над дефектом

После намагничивания изделия осуществляется проявление дефектов, состоящее в фиксировании магнитного поля над дефектом каким-либо методом: порошковым, феррозондовым, магнитографическим и другими методами, которые будут рассмотрены в дальнейшем. При этом контроль (выявление) дефектов осуществляется двумя способами:

1. Контроль дефектов на остаточной намагниченности контролируемого изделия, пригодный только для магнитотвёрдых материалов с коэрцитивной силой H_c больше 800 А/м. В этом случае проявление дефектов осуществляется

после намагничивания контролируемого изделия и удаления его из намагничивающего поля.

2. Контроль дефектов в приложенном магнитном поле, применяемый для магнитомягких материалов, у которых коэрцитивная сила $H_c < 800$ А/м. В этом случае проявление дефектов осуществляется после намагничивания контролируемого изделия без его удаления из намагничивающего поля, т.к. без приложенного внешнего магнитного поля над дефектами образуются слабые магнитные поля рассеяния, не позволяющие выявить дефект. Этим способом контролируют детали сложной формы, а также в том случае, когда мощности источника питания недостаточно для намагничивания всей детали вследствие ее больших размеров; в приложенном магнитном поле рабочая индукция поля достигается при почти в четыре раза меньшей напряженности магнитного поля.

После МНК обязательно проводится размагничивание проконтролированного изделия.

Способы намагничивания объекта

Качество МНК существенно зависит от способа намагничивания контролируемого изделия. С целью получения максимальной чувствительности и разрешающей способности магнитного метода неразрушающего контроля применяются различные виды намагничивания материалов, среди которых пять основных: продольное (полюсное), циркулярное, комбинированное, параллельное, способом магнитного контакта.

Продольное намагничивание

Продольным (полюсным) намагничиванием называется такое намагничивание, при котором магнитные силовые линии часть пути проходят по изделию, а часть по воздуху. Это намагничивание осуществляется путём помещения контролируемого протяжённого изделия правильной формы (цилиндрического, прямоугольного и т.п.) либо между полюсами постоянного магнита (электромагнита), либо в соленоид. После удаления изделия из намагничивающего поля за счёт остаточной намагниченности в изделии возникают два магнитных полюса, N и S, как показано на рис. 8.2, поэтому такой метод намагничивания назван полюсным

На рис. 8.3. схематично изображены приемы полюсного намагничивания. Намагничивание полем стационарного электромагнита (рис. 8.3, а) или полем ручного электромагнита (рис. 8.3, б) позволяет выявлять линейные дефекты, перпендикулярные оси изделия, а намагничивание полем соленоида (рис. 8.3, в, г) выявляет дефекты, перпендикулярные оси изделия.

Намагничивание внешним полем соленоида позволяет выявлять дефекты на внутренней поверхности отверстия, перпендикулярные оси отверстия (рис. 8.3, д).

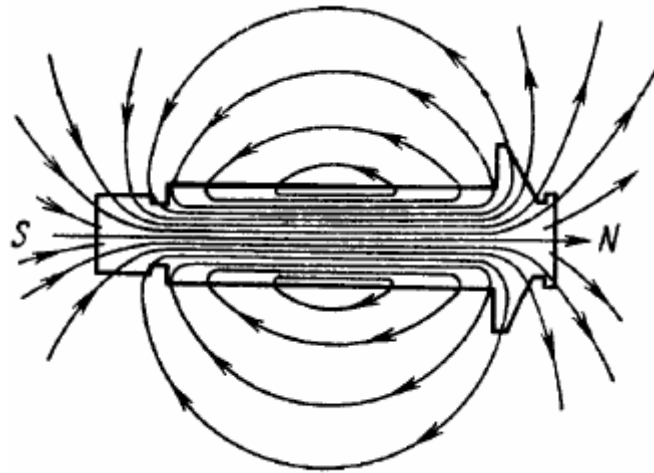


Рис. 8.2. Схема магнитного поля вокруг намагниченной полюсным методом детали

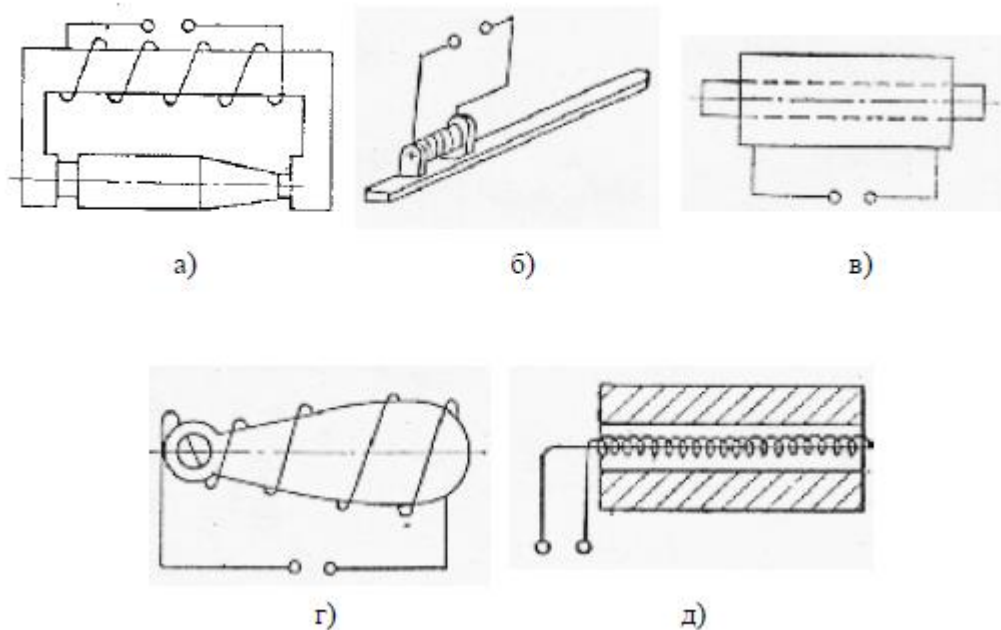


Рис. 8.3. Способы создания полюсного намагничивания: с помощью стационарного электромагнита: б – с помощью ручного (переносного) электромагнита; в, г, д – полем соленоида

При полюсном методе различают продольное намагничивание, при котором направление вектора H внешнего магнитного поля совпадает с направлением продольной оси детали (рис. 8.4, а), и поперечное

намагничивание, при котором вектор перпендикулярен продольной оси детали (рис. 8.4, б). Поперечное намагничивание в другом направлении прямоугольной детали, как показано на рис. 8.4, в. иногда называют нормальным намагничиванием.

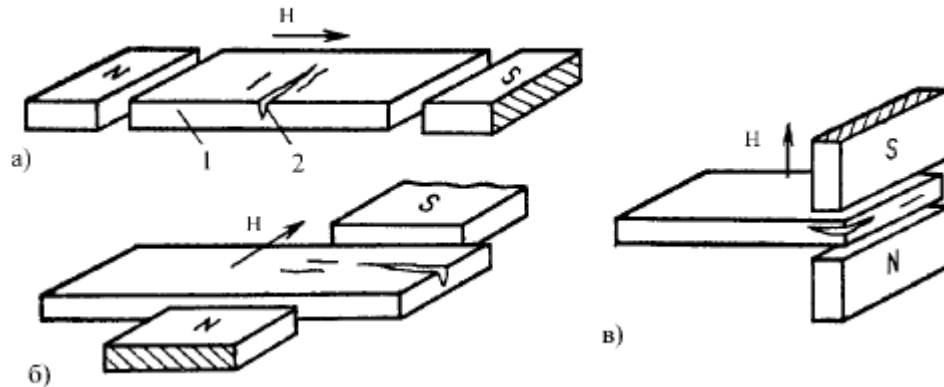


Рис. 8.4. Виды полюсного намагничивания: а - продольное; б - поперечное; в - нормальное; 1 - намагничиваемая деталь; 2 - трещина

Циркулярное намагничивание

Циркулярным называется намагничивание, при котором магнитные силовые линии имеют вид концентрических окружностей, расположенных в плоскости, перпендикулярной направлению тока. При отсутствии дефектов магнитные силовые линии замыкаются внутри детали, магнитные полюса не образуются. При наличии дефекта магнитное поле выходит из детали, как показано на рис. 8.5.

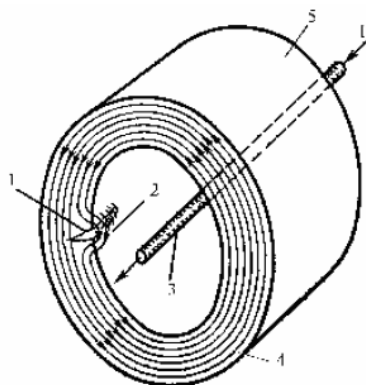


Рис. 8.5. Схема циркулярного намагничивания детали пропусканием тока по стержню: 1 – трещина; 2 – поле рассеяния над трещиной; 3 – стержень; 4 – магнитные линии; 5 – деталь; I – ток

Циркулярний метод намагнічування здійснюється або пропусканням тока по товстому мідному стержню або проводу, протягнутому через деталь (рис. 8.5), або пропусканням тока безпосередньо через деталь (рис. 8.6). Останній спосіб застосовується для контролю сплошних протяжених деталей, циліндричних полых товстостінних деталей при виявленні дефектів на зовнішній поверхні циліндра, при контролі зварних швів шляхом пропускання тока через шов. Прижимні контакти для пропускання тока через деталь називаються електрокарандашами.

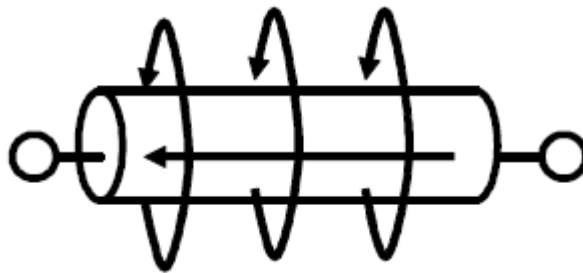


Рис. 8.6. Намагнічування полем тока, пропускаемого через деталь

Комбинируемое намагнічування

Комбинируемым називається намагнічування, при якому магнітне поле збуджується одночасно дією двох або трьох джерел полів, наприклад, продольним полем електромагніта і одного або двох циркулярних полів прямого тока. При цьому вектори напруженостей магнітного поля H_1 , H_2 і H_3 складаються векторно, так що результуючий вектор $H = H_1 + H_2 + H_3$ направлений по винтовій лінії.

Комбинируемое намагнічування забезпечує максимальну виявляемость дефектів, особливо в деталях складної форми. На рис. 8.7 приведены два приклади схем комбинируемого намагнічування циліндричної деталі. Постійний ток в електромагніті створює продольне намагнічування деталі з напруженістю магнітного поля $H_{пр}$, а змінний ток $I_{ц}$, пропускаемый через деталь, створює циркулярне намагнічування деталі з амплітудою напруженості магнітного поля $H_{ц}$.

Параллельное намагнічування

Параллельним називається намагнічування, при якому провід з намагнічуючим потоком розташований паралельно поверхні контролюваної деталі, як показано на рис. 8.7, а, де 1 – кабель з током, 2 – контролюване изделие со щелью 3.

Для збільшення намагнічування изделия застосовуються додаткові магнітопроводи 4 в формі півколець, закріплених на токоведущем кабеле 1

на расстоянии 3-5 мм друг от друга и плотно прижатых к изделию 2 (рис 8.7, б).

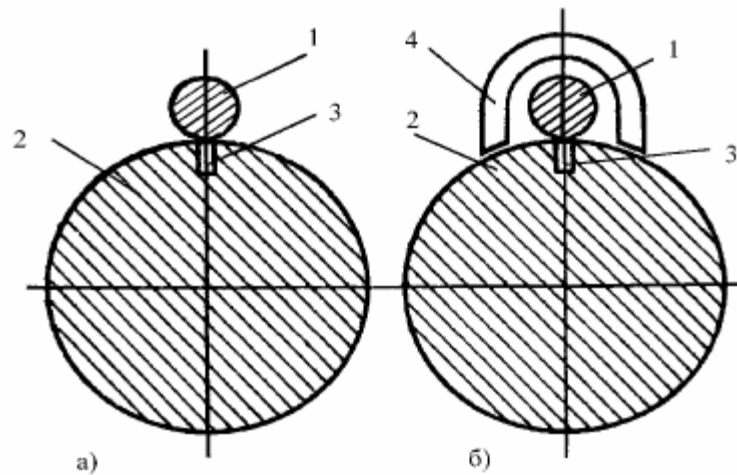


Рис. 8.7. Схема параллельного намагничивания детали с применением: а – обычного кабеля; б – кабеля с полукольцом; 1 – кабель с током; 2 – контролируемое изделие; 3 – щель; 4 – дополнительные магнитопроводы

Полукольца изготавливаются из магнитомягкой стали Ст-3, стали 10, 20 и др, ширина полуколец обычно составляет 15-40 мм, диаметр зависит от величины наибольшего тока, протекающего по кабелю. При пропускании тока через кабель возникает замкнутая магнитная цепь: полукольцо – участок детали – следующее полукольцо. При параллельном намагничивании в стали типа 30ХГСНА удаётся выявить шлифовочные трещины глубиной 0,05 – 0,07 мм, скрытые слоем хрома толщиной 50-70 мкм. Такой способ намагничивания целесообразен, если к детали ограничен подход и по ней не разрешается пропускать ток.

Физические основы регистрации дефектов с помощью магнитного порошка

Порошковый способ регистрации дефектов состоит в нанесении порошка ферромагнитного материала на намагниченное контролируемое изделие и в регистрации скоплений этого порошка вблизи дефектов. Над дефектом образуются локальные магнитные поля рассеяния. На попавшие в поле частицы действуют пондеромоторные силы, стремящиеся затянуть их в места наибольших концентраций магнитных силовых линий. Частицы накапливаются вблизи дефекта и одновременно намагничиваются полем рассеяния дефекта. Притягиваясь друг к другу, эти частицы образуют цепочечные структуры, ориентированные по магнитным силовым линиям

поля дефекта. В результате происходит накопление частиц осевшего порошка в виде полосок (валиков, жилок, шнуров) над дефектом. Ширина полоски из осевшего порошка значительно больше ширины трещины, волосяны, поэтому магнитопорошковым способом могут быть выявлены мельчайшие трещины и другие поверхностные дефекты, невидимые при визуальном осмотре.

В качестве ферромагнитного материала наиболее часто используются черные порошки окислов магнетита Fe_3O_4 , представляющего смесь закиси железа FeO и окиси железа Fe_2O_3 . Несколько реже используется ферромагнитная окись железа Fe_2O_3 . Для получения буровато-красных порошков используется красная гамма окись железа $\gamma-Fe_2O_3$. Для изготовления светлых порошков используются специально приготовленные смеси железного и никелевого порошков и алюминиевой пудры.

Применяются два способа нанесения ферромагнитного порошка на контролируемое изделие.

“Сухой” способ

“Сухой” способ состоит в нанесении на изделие высокодисперсного порошка с размерами частиц 0,1-10 мкм в воздушной взвеси, получаемой распылением порошка в специальных установках. Этот способ применяют для обнаружения подповерхностных дефектов, а также дефектов под слоем немагнитного покрытия толщиной до 200 мкм.

Другой способ нанесения сухого порошка на изделие применяется для грубодисперсионных порошков с размером частиц от 0,05 до 2 мм. В этом случае порошок наносится с помощью пульверизатора, резиновой груши или качающегося сита. Этот способ применяется для обнаружения относительно крупных поверхностных и подповерхностных дефектов, а также для контроля деталей с грубо обработанной поверхностью.

“Мокрый” способ

“Мокрый” способ нанесения магнитного порошка на поверхность намагниченного контролируемого изделия осуществляют путем полива изделия суспензией магнитного порошка или путем погружения изделия в ванну, наполненную суспензией. Магнитная суспензия должна стечь с поверхности, т.е. изделие располагают с наклоном. Возможен контроль без извлечения деталей из суспензии для осмотра. Такой способ, например, рекомендуется для обнаружения шлифовочных трещин под слоем хрома толщиной до 0,2 мм.

Для облегчения обнаружения дефектов вместо черного магнитного порошка в указанные суспензии вводят магнитнолюминесцентный порошок.

Люминофорами в порошке служат флуоресцентные смолы, растворители смол, такие как хлористый метилен, люминоген светло-желтый. При облучении ультрафиолетовым светом кварцевых ламп со светофильтрами магнитные порошки с люминофорами ярко светятся. Светофильтры применяют для исключения видимого света.

В зависимости от способа магнитного контроля в приложенном магнитном поле или на остаточной намагниченности, от формы контролируемой поверхности, от чистоты ее обработки применяются разнообразные суспензии, жидкой фазой которых кроме воды являются керосин, масла и их смеси.

Результаты контроля оценивают по наличию на контролируемом объекте валика магнитного порошка, видимого глазом или через лупу с 2–4 кратным увеличением, воспроизводимого каждый раз при повторном нанесении суспензии или порошка. Четкий, нерасплывшийся валик свидетельствует о дефекте, выходящем на поверхность, расплывшийся валик – о подповерхностном дефекте. Длина валика равна протяженности дефекта плюс погрешность, равная ширине валика. Магнитопорошковый метод позволяет выявлять трещины с шириной раскрытия 0,001 мм, глубиной 0,01 мм и более.

Для магнитопорошкового способа регистрации контроль на остаточной намагниченности имеет некоторые преимущества перед контролем в приложенном магнитном поле: возможность установки детали в любое требуемое положение для хорошего освещения поверхности и осмотра; возможность нанесения суспензии как путем полива, так и путем погружения в ванну с суспензией одновременно нескольких изделий; простота расшифровки результатов контроля, т.к. при контроле порошок в меньшей степени оседает по рискам, наклепу; местам грубой обработки поверхности и т.п.; меньшая возможность прижога деталей в местах их контакта с электрокарандашами, так как для остаточного намагничивания ток пропускают по детали кратковременно (0,01-1с). При контроле в приложенном магнитном поле сначала наносят порошок или суспензию на деталь, помешают ее, например, в соленоид и включают ток в обмотках. Медленно вытаскивая деталь из соленоида, наблюдают за распределением магнитного порошка на детали у выходного окна катушки.

Осаждение магнитного порошка не всегда указывает на наличие дефекта. Образование поля рассеяния мнимого дефекта может происходить, например, при структурной неоднородности, по границе раздела участков с резко отличающимися структурами. Осаждение порошка при этом неплотное, в виде широкой полосы с размытыми границами. При одном и том же способе

намагничивания осаждение порошка происходит на всех деталях и в одних и тех же местах. Знание конструктивных особенностей деталей и технологии изготовления позволяет распознать такой мнимый дефект.

Магнитопорошковую дефектоскопию проводят при температуре не ниже 10°C и не выше 40°C на специально оборудованном участке. Контроль осуществляют с помощью универсальных или специализированных дефектоскопов, позволяющих получать необходимые поля и создавать оптимальные условия контроля. В комплект дефектоскопа входят:

- намагничивающие устройства
- устройства для перемещения деталей на позиции контроля
- приспособления для обработки деталей индикаторными составами
- осветительные и измерительные устройства.

Современные дефектоскопы комплектуются также устройствами для размагничивания суспензий и изделий.

При проведении контроля оператору необходимо соблюдать определенные требования безопасности, так как для намагничивания деталей, например, циркулярным способом через них пропускаются большие токи.

Физические основы магнитографического способа регистрации дефектов

Магнитографический способ регистрации дефектов заключается в записи магнитных полей рассеяния над дефектом на магнитную ленту путем намагничивания контролируемого участка изделия вместе с прижатой к его поверхности магнитной лентой и в последующем воспроизведении и расшифровке полученной магнитной записи. При магнитографическом контроле изделия намагничивают с помощью электромагнитов, реже применяют циркулярное намагничивание. Для обнаружения внутренних дефектов намагничивание производят постоянным током, а для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов переменным током.

Для примера на рис. 8.9 показана схема регистрации дефектов сварных швов магнитографическим методом: сварной шов 1 с дефектом 2 находится в детали 3; поле рассеяния от дефекта 2 фиксируется магнитной лентой 4, наложенной на сварной шов 1 и прижатой к нему резиновым поясом (на рисунке не показан). Намагничивающее поле создается постоянным электромагнитом 6 с роликами 5. Последние служат для облегчения перемещения электромагнита вдоль сварного шва.

Магнитная лента, применяемая для регистрации полей рассеяния, аналогична применяемой в звукозаписи и, как правило, состоит из слоя

магнитного порошка оксида железа, взвешенного в лаке, и немагнитной основы из ацетилцеллюлозы, полиэфиров или лавсана. Разработаны также специально для магнитографического контроля металлические ленты.

Считывание записи на магнитной ленте осуществляют с помощью кольцевой воспроизводящей головки, схема которой показана на рис. 8.10.

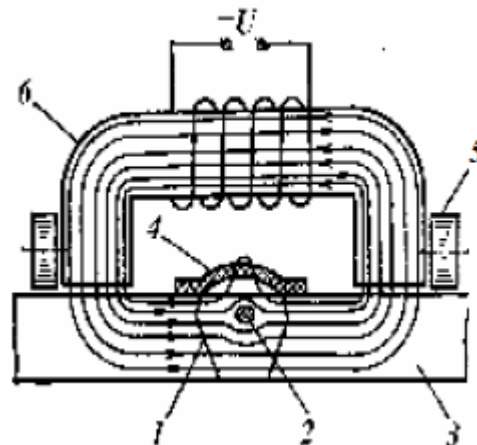


Рис. 8.9 Схема намагничивания сварного шва вместе с магнитной лентой:
1 – сварной шов; 2 – дефект; 3 – летать; 4 – магнитная лента; 5 – ролики;
6 – электромагнит

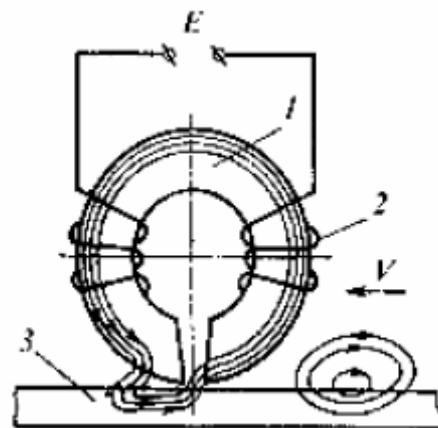


Рис. 8.10 Схема кольцевой воспроизводящей головки: 1 – магнитная головка;
2 – две катушки; 3 – магнитная лента

Магнитографией уверенно выявляются плоскостные дефекты (трещины, непровары), а также протяженные дефекты в виде цепочки шлака, ориентированные поперек направления магнитного потока. Чувствительность магнитографического метода к поверхностным дефектам такая же или несколько хуже, чем у магнитопорошкового. С увеличением глубины залегания дефекта его выявляемость ухудшается (практически возможно

обнаружение дефекта с вертикальным размером не менее 10-15% толщины изделия на глубине залегания до 20-25 мм). Округлые внутренние дефекты выявляются значительно хуже. Уверенно обнаруживаются внутренние плоскостные дефекты, когда их вертикальный размер составляет 8 % – 10% толщины сварного шва; внутренние округлые дефекты возможно обнаружить только при 20%.

Способы размагничивания объектов

После контроля изделие необходимо размагнитить, так как остаточная намагниченность может вызвать нежелательные последствия. Например, поверхности плохо размагниченных подшипников, других вращающихся и соприкасающихся при работе деталей притягивают ферромагнитные продукты износа, что вызывает ускоренный выход деталей из строя. При быстром вращении намагниченных деталей в соседних массивных деталях могут возбуждаться значительные вихревые токи. Неразмагниченные детали могут нарушить ход часов и тому подобных механизмов.

Любое размагничивание (кроме нагревания контролируемого объекта выше температуры Кюри) сводится к периодическому изменению величины и направления магнитного поля, в котором находится контролируемый объект, с постепенным уменьшением этого поля до нуля. На рис. 8.11 представлен график изменения индукции в детали при размагничивании.

Когда напряженность размагничивающего поля достигнет нулевого значения, остаточная индукция в детали будет также близка к нулю.

Обычно применяют следующие способы размагничивания:

- медленное протаскивание намагниченного КО через отверстие катушки, питаемой переменным током частоты 50 Гц. Деталь удаляют на расстояние не менее 1 м от катушки. В этом случае переменное поле, обладая ограниченной глубиной проникновения, эффективно размагничивает только поверхностный слой детали;
- пропускание переменного тока, равного намагничивающему, непосредственно через деталь с постепенным уменьшением его до нуля;
- коммутацию постоянного тока в соленоиде или в обмотках электромагнита с постепенным снижением тока до нуля;
- использование электромагнита, питаемого переменным током, постепенно снижаемым до нуля.

Лучший результат достигается с использованием тех же средств, что применялись при намагничивании. Начальное поле размагничивания должно

быть не меньше поля, действовавшего при намагничивании. Ток не должен выключаться, когда деталь находится в сфере влияния поля; направления намагничивающего и размагничивающего полей должны совпадать.

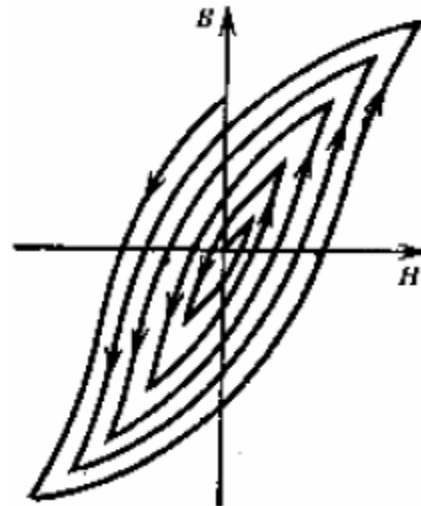


Рис. 8.11 График изменения индукции в детали при размагничивании

Для качественного контроля размагничивания можно использовать притяжение малых магнитных масс.

Магнитные преобразователи

В подавляющем большинстве случаев при магнитном контроле приходится иметь дело с измерением или индикацией магнитных полей вблизи поверхности изделий. Для этого применяют различные магнитные преобразователи, из которых наиболее широкое распространение получили индукционные, феррозондовые, холловские и магниторезистивные.

Пассивный индукционный преобразователь и физические основы его работы

Пассивный индукционный преобразователь представляет собой катушку (контур) с числом витков w . В соответствии со знаком электромагнитной индукции на концах катушки возникает мгновенная электродвижущая сила (ЭДС)

$$e = -wd\Phi/dt$$

где $d\Phi$ - изменение за малое время dt магнитного потока через один виток катушки, Вб:

$$\Phi = BS \cos \alpha = \mu_0 \mu HS \cos \alpha$$

где H - модуль напряженности магнитного поля; α – угол между вектором H и нормалью к плоскости катушки; S - площадь катушки. Потокосцеплением или полным магнитным потоком называется величина

$$\Psi = w\Phi$$

где Φ – магнитный поток через один виток катушки и ограниченный ее контуром.

Из формулы следует, что пассивный индукционный преобразователь не может быть использован для измерений постоянных и однородных полей [можно, правда, осуществить условие $S=S(t)$, $\alpha=\alpha(t)$, либо использовать сердечник с $\mu_{\text{т}}=\mu_{\text{т}}(t)$, но во всех этих случаях индукционный преобразователь становится активным]. Если $H = H(x)$, то при движении преобразователя относительно этого поля

$$e = -A \frac{dH(x)}{dt} = -A \frac{dH}{dx} \frac{dx}{dt}$$

где A - коэффициент пропорциональности; т.е. возникающая ЭДС пропорциональна скорости относительного движения катушки и градиенту поля.

Коэффициент A увеличивается при использовании катушек с сердечниками, изготовленными из материалов с высокой магнитной проницаемостью. Это позволяет уменьшить габариты индукционных преобразователей (уменьшить S или w), однако характеристика преобразователя становится нелинейной, кроме того следует помнить, что $\mu_{\text{т}}$ (проницаемость сердечника) во многом определяется размерами сердечника.

Конструктивно индукционные преобразователи магнитного поля представляют собой катушки соответствующих размеров и подходящей конфигурации, с сердечниками или без них, движущиеся с достаточной скоростью вблизи поверхности труб. К числу их преимуществ относится возможность изготовления и использования преобразователей с очень большой шириной полосы, контролируемой одним преобразователем (рис. 8.12), использующихся в магнитной диагностике труб и листов. Катушка преобразователя в этом случае должна располагаться как можно ближе к поверхности трубы и иметь небольшую толщину. Чувствительность пассивного преобразователя выбирают исходя из заданного рабочего диапазона измерительного устройства и шумов усилительного каскада, с которым непосредственно согласуется преобразователь.

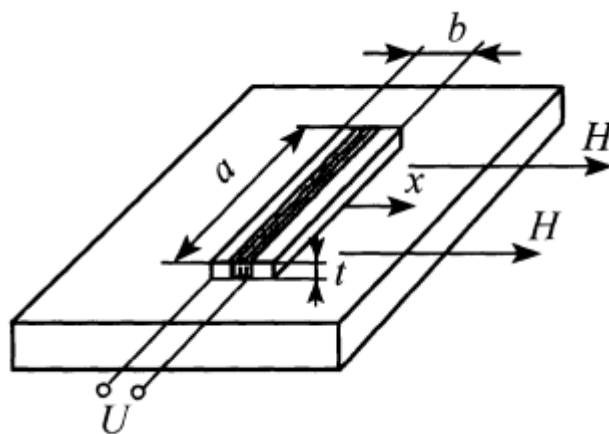


Рис. 8.12. Пассивный индукционный преобразователь

Магнитная индукционная головка

Для считывания магнитных полей можно применять индукционные магнитные головки. Существует несколько разновидностей головок. Наиболее широкое применение получили кольцевые магнитные головки, обладающие большим коэффициентом преобразования (рис. 8.13). Они состоят в основном из сердечника и обмотки.

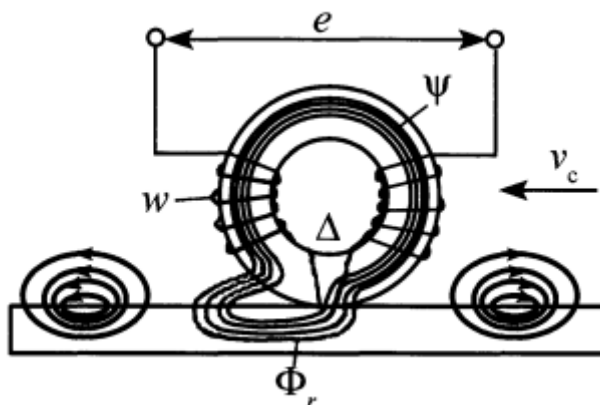


Рис. 8.13 Кольцевая магнитная головка

Сердечник головки собирается из двух полуколец, склеенных в пакеты из тонких (0,1 ... 0,2 мм) пластин магнитомягкого материала с очень высокой магнитной проницаемостью ($\mu_r = 50\,000 \dots 100\,000$ Гн/м). Обычно в качестве такого материала используют железоникелевые сплавы 50НХС, 80НХС, 79НМА и др. В отдельных случаях в головках применяют ферритовые сердечники. Толщину набора сердечника выбирают в зависимости от назначения головки.

Обмотка головки состоит либо из двух катушек с большим числом витков тонкого эмалированного провода, надетых на каждое полукольцо сердечника и соединенных последовательно, либо из одной общей катушки.

Между передними утонченными концами сердечника головки имеется немагнитный рабочий зазор, образованный прокладкой из тонкой (5 ... 20 мкм) бронзовой фольги. Вторые концы полуколец сердечника плотно подгоняются один к другому.

Индукционные магнитные головки предназначены для преобразования магнитных полей в электрические сигналы и находят применение в магнитографической дефектоскопии.

Принцип работы индукционной магнитной головки заключается в замыкании большей части внешнего магнитного потока Φ , создаваемого намагниченными отпечатками на трубе, через ферромагнитный сердечник головки. Полюсные грани рабочего зазора головки должны быть ориентированы в направлении поляризации граней дефекта.

Замыкание, шунтирование внешнего магнитного потока трубы через сердечник головки обуславливаются, с одной стороны, большим магнитным сопротивлением R_0 ее рабочего зазора и, с другой, весьма малым магнитным сопротивлением R_M сердечника, изготовленного из материала с высокой магнитной проницаемостью.

Магнитное потокосцепление Ψ , замыкающееся в процессе сканирования через сердечник головки, пронизывает витки обмотки и возбуждает в ней ЭДС электромагнитной индукции. Чтобы получить большую отдачу сигналов, стремятся обеспечить как можно больший коэффициент шунтирования головки.

Из вышеприведенного выражения следует, что при постоянстве коэффициента шунтирования, числа витков обмотки и скорости сканирования электрические сигналы, возникающие в головке, зависят главным образом от намагниченности отпечатков полей дефектов. Основными показателями индукционных магнитных головок являются ширина рабочего зазора, высота пакета сердечника, число витков обмотки и индуктивность. Ширина рабочего зазора обуславливает частотную характеристику и разрешающую способность магнитных головок. Толщину сердечника головки выбирают в зависимости от ширины считываемой дорожки на трубе. В аппаратуре для магнитной диагностики применяют головки с толщиной сердечника 1 мм.

Феррозондовый преобразователь и физические основы его работы

Феррозондовые преобразователи - устройства для измерения напряженности магнитного поля, действие которых основано на нелинейности кривых намагничивания сердечников из магнитных материалов. Простейший феррозонд (ферроэлемент) состоит из сердечника с двумя обмотками – возбуждения и индикаторной (в принципе, возбуждение и индикацию можно

осуществить одной обмоткой). С помощью первой обмотки создается поле возбуждения $H_B(t)$, в сердечнике возникает индукция $B(t)$, которая индуцирует магнитную ЭДС:

$$e = -w_{II} S \frac{dB}{dH_B} \frac{dH_B}{dt}$$

где w_{II} число витков измерительной обмотки; S - площадь сердечника.

Определяемая ЭДС содержит только нечетные гармоники. При воздействии на сердечник постоянного (измеряемого) поля H_0 в спектре ЭДС появляются четные гармоники, которые (обычно вторая) служат для определения H_0 . При $H_0 \ll H_B$, $\mu_\Phi \ll \mu$ и некоторых других допущениях

$$E_2 = 8\mu_0 w_{II} S \mu_\Phi f H_0$$

где E_2 - амплитуда ЭДС второй гармоники; f - частота поля возбуждения.

Амплитуда поля возбуждения (максимальная напряженность поля), при которой наблюдается максимальная чувствительность

$$H_{\max} = \frac{\sqrt{2} B_{\max}}{\mu_\Phi}$$

Выбором μ_Φ (размеров сердечника) и H_{\max} добиваются необходимой чувствительности либо необходимого диапазона измеряемых полей.

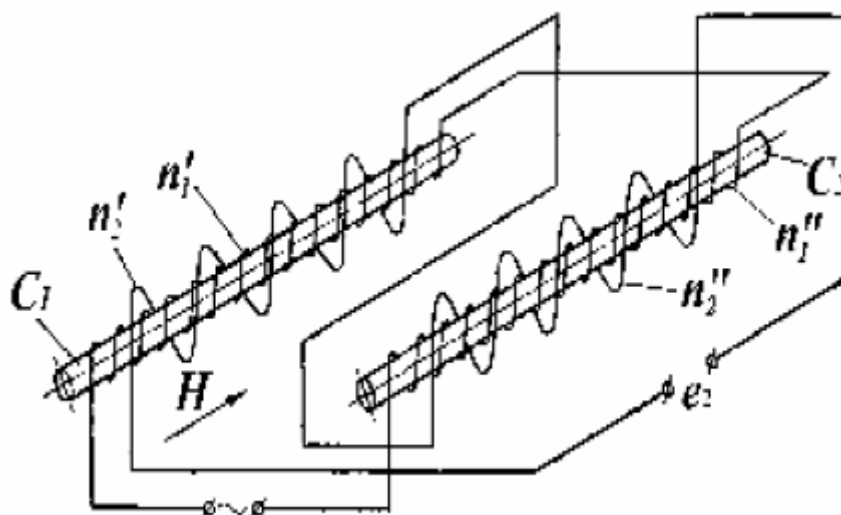


Рис. 8.14 Схема феррозонда

Существуют феррозонды различных типов и модификаций. Однако при неразрушающем контроле наибольшее распространение получили дифференциальные феррозонды с продольным возбуждением. Конструктивно

(рис. 8.14) они представляют собой два пермалловых сердечника C_1 и C_2 с первичными обмотками возбуждения n'_1, n''_1 и вторичными измерительными обмотками n'_2, n''_2 на каждом.

В феррозонде-полимере питаемые переменным током первичные обмотки обоих сердечников соединены дифференциально, а измерительные - последовательно. В феррозондах-градиентометрах, наоборот, первичные обмотки соединены последовательно, а вторичные – встречно. Ток возбуждения в первичных обмотках выбирают таким образом, чтобы феррозонд работал на линейной части своей характеристики.

При наличии измеряемого поля или градиента поля в индикаторной цепи феррозонда появляются четные (относительно частоты поля возбуждения) гармоники. Как правило, в феррозондовой дефектоскопической и магнитометрической аппаратуре используется вторая гармоника поля возбуждения. Схема работы феррозондов показана на рис. 8.15д.

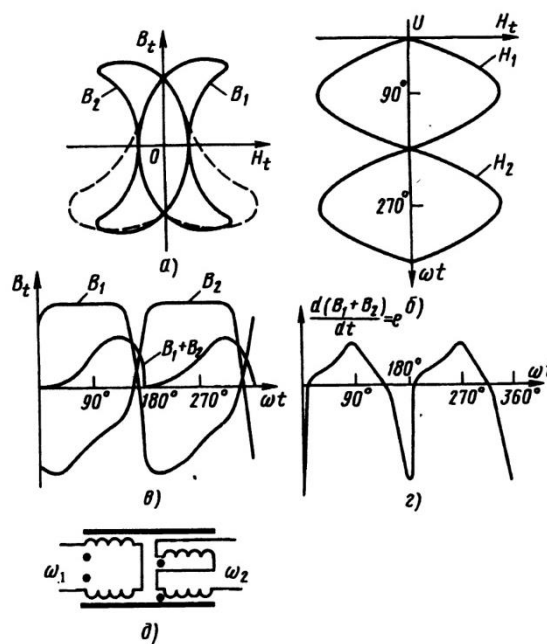


Рис. 8.15 Схема работы феррозондов

Если сердечник феррозонда поместить в одновременно действующие переменное и постоянное магнитные поля, то его цикл перемагничивания станет несимметричным и более широким в той части, в которой эти поля направлены встречно. На рис. 8.15 показаны частные динамические циклы перемагничивания двух сердечников феррозондов при встречном включении обмоток возбуждения (рис. 8.15а), питаемых синусоидальным током (рис. 8.15б). На рис. 8.15в приведены кривые индукции этих сердечников, на рис.

8.15г – кривая $d(B_1 + B_2)dt$, пропорциональная суммарной ЭДС во вторичных измерительных обмотках.

Как видно из сравнения временных кривых напряженности поля возбуждения и ЭДС, последняя содержит четные гармоники, в основном вторую. Практически невозможно получить совершенно одинаковые два сердечника и обмотки, поэтому выходная ЭДС кроме четных составляющих содержит и ЭДС основной частоты. Для исключения нечетных гармоник на выходе обмотки помещают селективный усилитель.

Физические основы работы преобразователей Холла

Преобразователи Холла работают по принципу возникновения ЭДС в результате искривления пути носителей тока в металлах и полупроводниках, находящихся в магнитном поле под действием силы Лоренца.

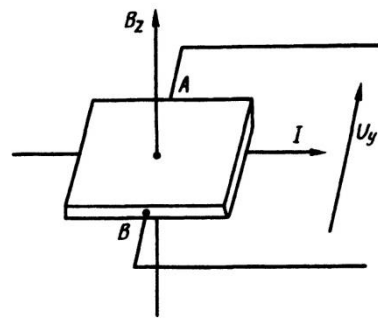


Рис. 8.16 Схема работы преобразователя Холла

Напряжение (В) на выходе преобразователя U_y при поперечном эффекте Холла

$$U_y = -\frac{R_H}{h} I_x B_z$$

где R_H - постоянная Холла, Ом•м/Тл; h - толщина холловской пластины, м; I_x - управляющий ток преобразователя Холла, А; B_z - магнитная индукция, Тл.

На рис. 8.16 показаны направления тока I , индукции магнитного поля B_z и ЭДС напряжения U_y в преобразователе Холла.

Серийно выпускаются кремниевые, германиевые и арсенид-галлиевые преобразователи Холла.

Физические основы работы магниторезисторов

В магниторезисторах используется эффект Гаусса, суть которого заключается в изменении сопротивления проводника или полупроводника с электрическим током при внесении их в магнитное поле. Магниторезисторы изготавливают из материалов с высокой чувствительностью к эффекту Гаусса; к

ним относятся антимония индия (InSb), арсенид индия (InAs), эвтектические сплавы типа InSb-NiSb и InSb-GaSb, а также германий (Ge), теллурий (HgTe) и селенид ртути (HgSe), антимонид и арсенид галлия (GaSb, GaAs) и др.

Приращение удельного электрического сопротивления $\Delta\rho$ приближенно определяется по формуле

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{AB^2}{1 + \mu^2 B^2}$$

где A - коэффициент пропорциональности; в малых полях A зависит от B квадратично, а затем приближается к максимальному значению. Чувствительность по напряжению магниторезисторов к слабым магнитным полям меньше, чем у преобразователей Холла. Коэффициент передачи преобразователей Холла при полях с индукцией меньше 0,1 Тл изменяется по квадратичному закону, а в области $> 1,0$ Тл (наступает насыщение) он несколько увеличивается. Магниторезисторы имеют более высокий коэффициент передачи в полях с индукцией выше 0,2 Тл, поэтому ими следует пользоваться при измерении сильных магнитных полей.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Из каких материалов изготовлены изделия, подвергаемые магнитным методам НК?
2. Какое расположение дефектов по отношению к направлению магнитного поля обеспечивает их наилучшую выявляемость?
3. Чем отличаются способы обнаружения дефектов по остаточной намагниченности и способы обнаружения дефектов в приложенном магнитном поле?
4. Какая технологическая операция является обязательной после выполнения контроля магнитными методами НК?
5. Перечислите виды намагничивания материалов при выполнении НК магнитными методами?
6. Что является признаком наличия дефекта при выполнении НК магнитопорошковым методом?
7. Какие два способа нанесения порошка на деталь? Чем они отличаются?
8. С какой целью в магнитный порошок добавляют алюминиевую пудру?
9. Для чего в магнитные суспензии вводят люминофоры?
10. Какой материал используется для регистрации дефектов при выполнении НК магнитографическим методом?
11. Как термически размагнитить материал?
12. Каким способом производится размагничивание изделий?
13. Запишите формулу, которая связывает эдс на концах катушки и магнитный поток, охватываемый катушкой.
14. Какой формулой выражается полный магнитный поток (потокосцепление)?
15. Какие поля не может измерить пассивный индукционный преобразователь? Какие поля может?
16. Магнитная индукционная головка является активным или пассивным преобразователем?
17. Для чего предназначены феррозондовые преобразователи?
18. Какая гармоника используется при измерении напряженности магнитного поля в феррозондовых преобразователях?
19. Действие какой силы используется в преобразователях Холла?
20. Напряжение на выходе преобразователя Холла связано с магнитной индукцией: линейной зависимостью, квадратичной зависимостью или кубической?
21. Какое физическое явление используется в магниторезисторах?

22. В каких полях рекомендуется использовать магниторезисторы, а в каких преобразователи Холла?

Уровень курса

1. Магнитное поле над дефектом
2. Способы намагничивания объекта.
3. Физические основы регистрации дефектов с помощью магнитного порошка.
4. Физические основы магнитографического способа регистрации дефектов.
5. Способы размагничивания объектов.
6. Пассивный индукционный преобразователь и физические основы его работы.
7. Феррозондовый преобразователь и физические основы его работы
8. Физические основы работы преобразователей Холла
9. Физические основы работы магниторезисторов.

Лекція № 9

Тема: Физические основы вихретокового вида неразрушающего контроля

Оглавление

| | |
|---|----|
| Вихревые токи в дефектоскопии | 3 |
| Токи Фуко | 3 |
| Использование вихревых токов для проведения неразрушающего контроля | 6 |
| Общая характеристика вихретоковых методов НК..... | 10 |
| Классификация и применение вихретоковых преобразователей (ВТП) | 12 |
| Накладные ВТП..... | 12 |
| Проходные ВТП | 13 |
| Комбинированные преобразователи..... | 14 |
| Экранные ВТП..... | 15 |
| Трансформаторные и параметрические ВТП..... | 15 |
| Область применения | 16 |
| Конструктивные и схемотехнические особенности построения ВТП | 17 |
| Контрольные вопросы по теме | 20 |
| Уровень модуля..... | 20 |
| Уровень курса..... | 21 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. - М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. /В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. - М.: Машиностроение, 2004. - 832 с.: ил.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

<https://www.youtube.com/watch?v=qpgcD5k1494>

Вихревые токи в дефектоскопии

Вихретоковый метод НК основывается на физическом явлении, которое состоит в появлении индукционных токов в электропроводящих материалах под действием изменяющегося внешнего магнитного поля. Возникающие в материале токи имеют форму вихря, вследствие чего называются вихревыми или «токами Фуко», по имени ученого, детально исследовавшим это явление. Само явление было открыто в 1928г французским учёным Д. Ф. Араго, и впоследствии было объяснено М.Фарадеем как проявление закона электромагнитной индукции.

Токи Фуко

Токи Фуко (в честь Фуко, Жан Бернар Леон) — это вихревые замкнутые электрические токи в массивном проводнике, которые возникают при изменении пронизывающего его магнитного потока. Вихревые токи являются индукционными токами и образуются в проводящем теле либо вследствие изменения во времени магнитного поля, в котором находится тело, либо вследствие движения тела в магнитном поле, приводящего к изменению магнитного потока через тело или какую-либо его часть. Величина токов Фуко тем больше, чем быстрее меняется магнитный поток.

В отличие от электрического тока в проводах, текущего по точно определённым путям, вихревые токи замыкаются непосредственно в проводящей массе, образуя вихреобразные контуры. Эти контуры тока взаимодействуют с породившим их магнитным потоком. Согласно правилу Ленца, магнитное поле вихревых токов направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующего эти вихревые токи.

Вихревые токи приводят к неравномерному распределению магнитного потока по сечению магнитопровода. Это объясняется тем, что в центре сечения магнитопровода намагничивающая сила вихревых токов, направленная навстречу основному потоку, является наибольшей, так как эта часть сечения охватывается наибольшим числом контуров вихревого тока. Такое «вытеснение» потока из середины сечения магнитопровода выражено тем резче, чем выше частота переменного тока и чем больше магнитная проницаемость ферромагнетика. При высоких частотах поток проходит лишь в тонком поверхностном слое сердечника. Это вызывает уменьшение кажущейся (средней по сечению) магнитной проницаемости. Явление вытеснения из ферромагнетика магнитного потока, изменяющегося с большой частотой, аналогично электрическому скин-эффекту и называемому магнитным скин-эффектом.

Глубина проникновения вихревых токов может быть рассчитана следующим образом:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}},$$

где δ – глубина проникновения (м), f – частота (Гц), μ – магнитная проницаемость материала (Гн/м), и σ – электрическая проводимость материала (См/м).

В соответствии с законом Джоуля - Ленца вихревые токи нагревают проводники, в которых они возникли. Поэтому вихревые токи приводят к потерям энергии (потери на вихревые токи) в магнитопроводах (в сердечниках трансформаторов и катушек переменного тока, в магнитных цепях машин).

При определенных допущениях (однородный материал, однородное магнитное поле, отсутствие скин-эффекта и т.п.) потеря мощности на вихревые токи в единице массы тонкого листа или в проводе может быть выражена следующей формулой:

$$P = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6k\rho D},$$

где

P – мощность, теряемая на единицу массы (Вт/кг),

B_p – максимальное значение индукции магнитного поля (Тл),

d – толщина листа или диаметр проволоки (м),

f – частота (Гц),

k – постоянная, равная либо 1 для тонкого листа, либо 2 для проволоки,

ρ – удельное сопротивление материала (Ом·м),

D – плотность материала (кг/м³).

Для уменьшения потерь энергии на вихревые токи (и вредного нагрева магнитопроводов) и уменьшения эффекта «вытеснения» магнитного потока из ферромагнетиков магнитопроводы машин и аппаратов переменного тока делают не из сплошного куска ферромагнетика (электротехнической стали), а из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Такое деление на пластины, расположенные перпендикулярно направлению вихревых токов, ограничивает возможные контуры путей вихревых токов, что сильно уменьшает величину этих токов. При очень высоких частотах применение ферромагнетиков для магнитопроводов нецелесообразно; в этих случаях их делают из магнитодиэлектриков, в которых вихревые токи практически не возникают из-за очень большого сопротивления этих материалов.

При движении проводящего тела в магнитном поле индуцированные вихревые токи обуславливают заметное механическое взаимодействие тела с полем. Токи Фуко, как и индукционные токи в простых линейных проводниках, имеют направление, которое подчиняется правилу Ленца: их магнитное поле направлено так, чтобы быть препятствием изменению магнитного потока, который вызывает вихревые токи. Например, если между полюсами невключенного электромагнита массивный медный маятник совершает практически незатухающие колебания (рис. 9.1), то при включении тока он начинает сильно тормозить и очень быстро останавливается. Этот опыт объясняется тем, что возникшие токи Фуко имеют направление, при котором действующие на них со стороны магнитного поля силы оказывают тормозящее действие на маятник и он быстро останавливается. Этот факт практически применяется для успокоения (демпфирования) подвижных частей различных приборов и механизмов. Если сделать радиальные вырезы в описанном маятнике, то вихревые токи ослабляются и торможение почти отсутствует.

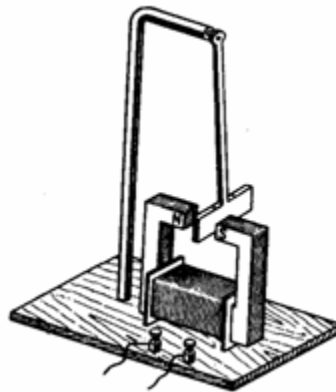


Рис. 9.1. Опыт с маятником для демонстрации действия токов Фуко

Вихревые токи возникают и в самом проводнике, по которому течёт переменный ток, что приводит к неравномерному распределению тока по сечению проводника. В моменты увеличения тока в проводнике индукционные вихревые токи направлены у поверхности проводника по первичному электрическому току, а у оси проводника — навстречу току. В результате внутри проводника ток уменьшится, а у поверхности увеличится. Токи высокой частоты практически текут в тонком слое у поверхности проводника, внутри же проводника тока нет. Это явление называется электрическим скин-эффектом.

Вихревые токи применяются для пайки, плавки и поверхностной закалки металлов, а их силовое действие используется в успокоителях

колебаний подвижных частей приборов и аппаратов, в индукционных тормозах (в которых массивный металлический диск вращается в поле электромагнитов) и т. п.

Использование вихревых токов для проведения неразрушающего контроля

Вихревые токи или токи Фуко — это вихревые индукционные токи, возникающие в массивных проводниках при изменении пронизывающего их магнитного потока.

При установке преобразователя на деталь переменное магнитное поле вихретокового преобразователя с магнитным потоком Φ_0 , созданным катушкой индуктивности, согласно закону электромагнитной индукции, вызывает образование в поверхностных слоях детали вихревые токи i_{e1} . Вихревые токи протекают в той же плоскости, что и в витках катушки. Магнитный поток Φ_{B1} , вызванный образовавшимися вихревыми токами i_{e1} на поверхности детали, направлен навстречу потоку Φ_0 .

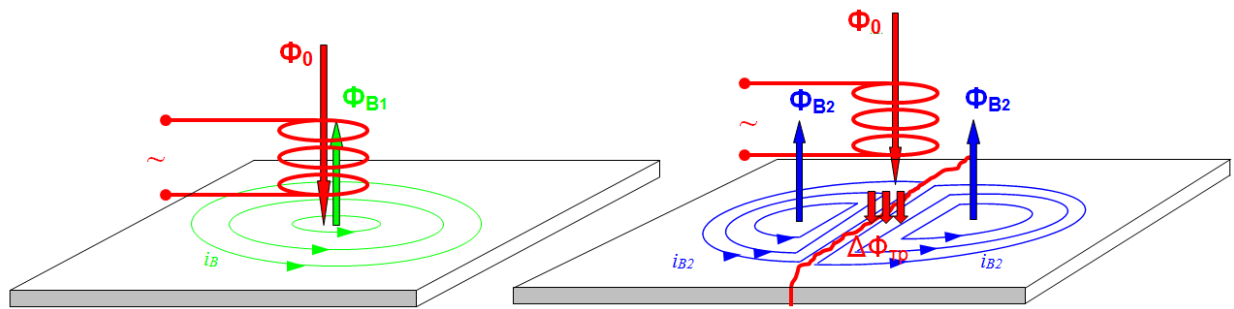


Схема возбуждения вихревых токов и формирования сигнала вихретокового преобразователя.

Рис. 9.2 Схема возбуждения вихревых токов и формирования сигнала вихретокового преобразователя

Если установить катушку преобразователя над трещиной, то наличие трещины эквивалентно локальному скачкообразному уменьшению электропроводности материала детали. Поэтому наличие трещины под преобразователем приведёт к уменьшению плотности вихревых токов i_{e2} в этом месте по сравнению с плотностью вихревых токов i_{e1} в сплошном материале детали. Это вызовет, в свою очередь, изменение потока магнитной индукции с величины Φ_{B1} до величины Φ_{B2} .

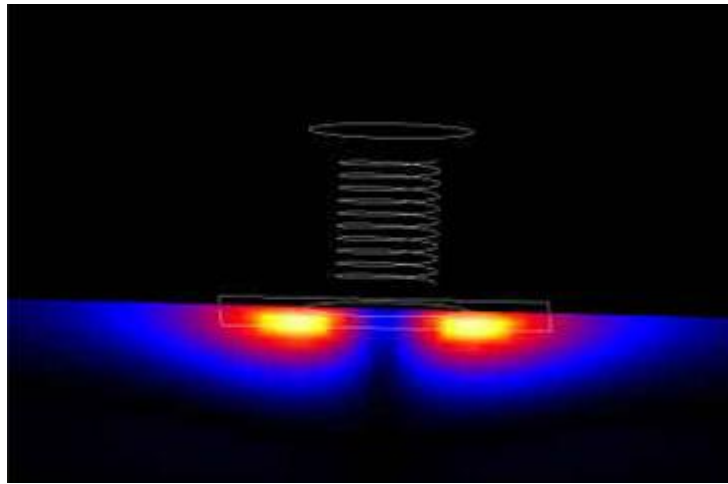


Рис 9.3 Распределение вихревых токов под преобразователем

Распределение вихревых токов на поверхности детали под преобразователем носит локальный характер - они наводятся лишь непосредственно под преобразователем. Поэтому для выполнения контроля необходимо перемещать преобразователь по поверхности детали именно в тех зонах, где ожидается появление дефектов.

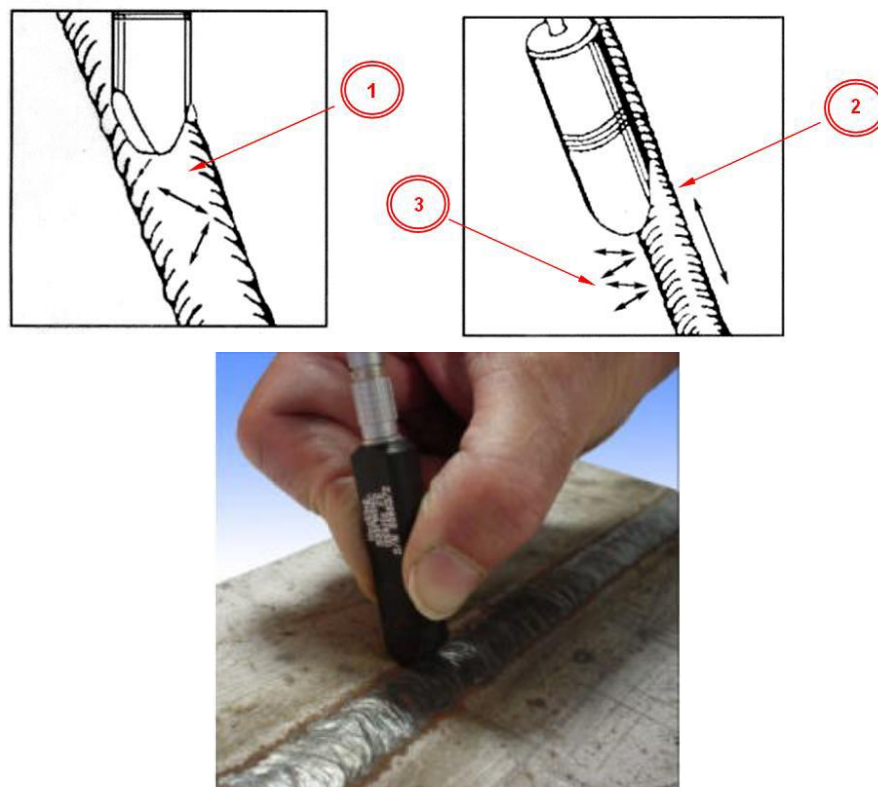


Рис 9.4 Вихретоковый контроль стыкового сварного соединения

Для сварного соединения с наличием выпуклости, как правило, выделяется три зоны контроля:

1 – зона выпуклости сварного шва;

2 – зона сопряжения выпуклости сварного шва и основного металла;

3 – зона основного металла в пределах зоны термического влияния.

Сканирование осуществляют перпендикулярно направлению ожидаемого развития дефекта.

Только при невозможности такого сканирования допускается проведение контроля со сканированием под углом к направлению предполагаемого дефекта. При неизвестной ориентации возможных дефектов зону контроля необходимо сканировать в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Скорость сканирования при проведении контроля определяется техническими характеристиками применяемого дефектоскопа. Как правило, скорость ручного контроля должна быть не менее 5-10 мм/с, но не более 100 мм/с.

Как правило, шероховатость поверхности должна быть не более Rz 40. Тем не менее, при проведении вихретокового контроля шероховатость контролируемой поверхности может быть любой.



Рис 9.5 Проведение вихретокового контроля по грубой поверхности

С ухудшением качества поверхности увеличивается минимальный размер выявляемого дефекта. Но при проведении визуального осмотра на грубой поверхности могут быть незаметны даже большие трещины, т. к. они могут быть скрыты загрязнениями и продуктами коррозии. Сюда, например, можно отнести контроль тележек и колёс вагонов ж/д транспорта, магистральные трубопроводы в процессе эксплуатации и др.

Размер выявляемых дефектов в основном зависит от размера катушки индуктивности преобразователя, типа преобразователя, шероховатости поверхности, толщины немагнитного покрытия, ориентации дефекта относительно перемещения преобразователя, типа используемой аппаратуры, квалификации специалиста.

Согласно СТБ ЕН 1711-2006 минимальный размер дефекта, который можно выявить с помощью вихретокового контроля в сварном соединении из

ферромагнитного материала составляет по глубине 1 мм и по длине 5 мм при ширине раскрытия не видимой глазом.

Первым преимуществом вихретокового метода является возможность проведения контроля по грубой поверхности, например, Rz 320.

Другое преимущество - возможность проведения контроля по поверхности с немагнитным покрытием до 2 мм.

Третье преимущество - высокая скорость проведения контроля по отношению к магнитопорошковому или капиллярному методу. Таким образом, при больших объёмах контроля или, например, сварных соединений в сжатые сроки вихретоковый метод можно использовать совместно с магнитопорошковым и капиллярным методом. Первоначально проводится контроль вихретоковым методом. В случае подозрения на дефект производится дополнительная зачистка участка поверхности, визуальный осмотр и проведение повторного контроля - магнитопорошковым или капиллярным методом с целью подтверждения наличия дефекта.

Четвёртым преимуществом является то, что можно проводить контроль в труднодоступных местах. Например, в таких местах, где нет возможности или затруднения в применении капиллярного или магнитопорошкового контроля (отверстия малого диаметра, днища глухих отверстий, стаканов и др.).



Рис. 9.6 Проведение вихретокового контроля в труднодоступных местах с использованием преобразователей изогнутой формы.

Ферромагнитные свойства материала оказывают существенное влияние на глубину проникновения вихревых токов. Общепринято, что вихретоковым методом, так же как и магнитопорошковым методом в ферромагнитных материалах, выявляются поверхностные дефекты. Имеется вероятность выявления неглубоко залегающих дефектов до 1 ÷ 2 мм в ферромагнитных материалах. В немагнитных материалах глубина обнаружения дефектов может

составлять порядка $5 \div 6$ мм (титановые и алюминиевые сплавы, немагнитные коррозионно-стойкие стали).

Общая характеристика вихретоковых методов НК

Вихретоковые методы (ВТМ) основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Плотность вихревых токов в объекте зависит от геометрических и электромагнитных параметров объекта, а также от взаимного расположения измерительного вихретокового преобразователя (ВТП) и объекта. В качестве преобразователя используют обычно индуктивные катушки (одну или несколько). Синусоидальный (или импульсный) ток, действующий в катушках ВТП, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте (рис. 9.7). Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС или изменяя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на зажимах катушки или ее сопротивление, получают информацию о свойствах объекта и о положении преобразователя относительно него.

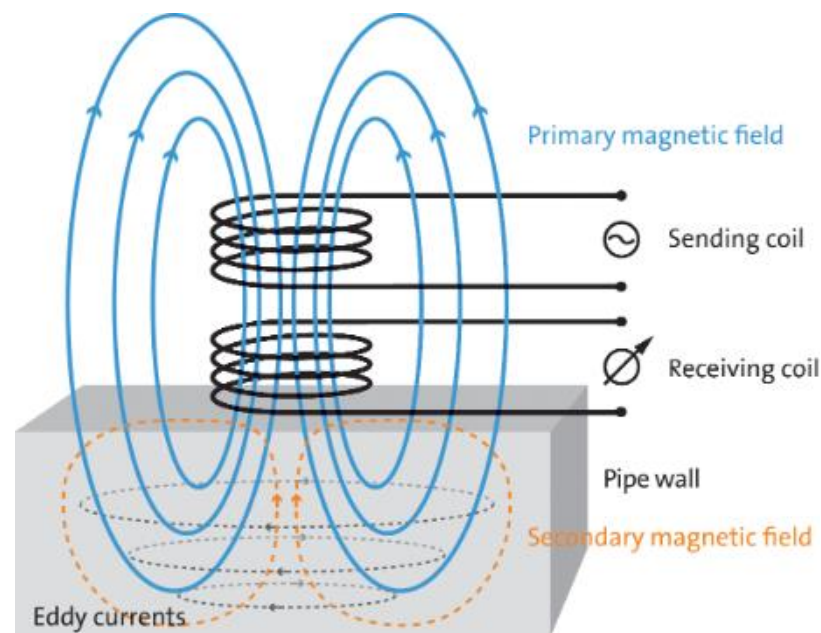


Рис 9.7 Взаимодействие внешнего электромагнитного поля и вихревых токов

ЭДС (или сопротивление) преобразователя зависит от многих параметров объекта контроля, т.е. информация, представляемая сигналом преобразователя, является многопараметровой. Это определяет как преимущество, так и трудности реализации вихретоковых методов (ВТМ). С одной стороны, ВТМ позволяют осуществить многопараметровый контроль; с другой, требуются специальные приемы для разделения информации об

отдельных параметрах объекта. При контроле одного из параметров влияние остальных на сигнал преобразователя становится мешающим, поэтому это влияние необходимо подавлять.

Особенность вихретокового контроля состоит в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта. Их взаимодействие происходит обычно на расстояниях, достаточных для свободного движения преобразователя относительно объекта (от долей миллиметра до нескольких миллиметров). Поэтому этими методами можно получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов.

Получение первичной информации в виде электрических сигналов, бесконтактность и высокая производительность определяют широкие возможности автоматизации вихретокового контроля.

Одна из особенностей ВТМ состоит в том, что на сигналы преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами.

Простота конструкции преобразователя – еще одно преимущество ВТМ. В большинстве случаев катушки помещают в предохранительный корпус и заливают компаундами. Благодаря этому они устойчивы к механическим и атмосферным воздействиям, могут работать в агрессивных средах, в широком интервале температур и давлений.

ВТМ основаны на возбуждении вихревых токов, а поэтому применяются в основном для контроля качества электропроводящих объектов: металлов, сплавов, графита, полупроводников. Им свойственна малая глубина зоны контроля, определяемая глубиной проникновения электромагнитного поля в контролируемую среду.

Несмотря на указанные ограничения, ВТМ широко применяют для дефектоскопии, определения размеров и структуроскопии материалов и изделий.

В дефектоскопии с помощью ВТМ обнаруживают дефекты типа несплошностей, выходящих на поверхность или залегающих на небольшой глубине (в электропроводящих листах, прутках, трубах, проволоке, железнодорожных рельсах, мелких деталях и т.д.), например разнообразные трещины, расслоения, закаты, плены, раковины, неметаллические включения и т.д. При благоприятных условиях и малом влиянии мешающих факторов удается выявить трещины глубиной 0,1 ... 0,2 мм, протяженностью 1 ... 2 мм (при использовании накладного преобразователя) или протяженностью около 1 мм и глубиной 1 ... 5 % от диаметра контролируемой проволоки или прутка (при использовании преобразователя проходного).

ВТМ позволяют успешно решать задачи контроля размеров изделий. Этими методами измеряют диаметр проволоки, прутков и труб, толщину металлических листов и стенок труб при одностороннем доступе к объекту, толщину электропроводящих (например, гальванических) и диэлектрических (например, лакокрасочных) покрытий на электропроводящих основаниях, толщину слоев многослойных структур, содержащих электропроводящие слои. Измеряемые толщины могут изменяться в пределах от микрометров до десятков миллиметров. Для большинства приборов погрешность измерения 2 ... 5%. Минимальная площадь зоны контроля может быть доведена до 1 мм², что позволяет измерять толщину покрытия на малых объектах сложной конфигурации. С помощью ВТМ измеряют зазоры, перемещения и вибрации в машинах и механизмах.

Структурное состояние металлов и сплавов влияет на их электрические и магнитные характеристики. Благодаря этому оказывается возможным контролировать не только однородность химического состава, но и структуру металлов и сплавов, а также определять механические напряжения. Широко применяют вихретоковые измерители удельной электрической проводимости и другие приборы для сортировки металлических материалов и графитов по маркам (по химическому составу). С помощью вихретоковых приборов контролируют качество термической и химико-термической обработки деталей, состояние поверхностных слоев после механической обработки (шлифование, наклеп), обнаруживают остаточные механические напряжения, выявляют усталостные трещины в металлах на ранних стадиях их развития, обнаруживают наличие α -фазы и т.д.

Классификация и применение вихретоковых преобразователей (ВТП)

По рабочему положению относительно объекта контроля преобразователи делят на проходные, накладные и комбинированные.

Накладные ВТП

Накладные ВТП обычно представляют собой одну или несколько катушек, к торцам которых подводится поверхность объекта (рис. 9.8). Катушки таких преобразователей могут быть круглыми коаксиальными (рис. 9.8, а), прямоугольными (рис. 9.8, б), прямоугольными крестообразными (рис. 9.8, в), с взаимно перпендикулярными осями (рис. 9.8, г) и др.

Накладные преобразователи выполняют с ферромагнитными сердечниками или без них. Благодаря ферромагнитному сердечнику (обычно ферритовому) повышается абсолютная чувствительность преобразователя и

уменьшается зона контроля за счет локализации магнитного потока. На рис. 9.9 приведены некоторые типы преобразователей с сердечниками.

Проходные ВТП

Проходные ВТП делят на наружные, внутренние, погружные. Отличительная особенность проходных ВТП в том, что в процессе контроля они проходят либо снаружи объекта, охватывая его (наружные, рис. 9.10, а–в), либо внутри объекта (внутренние, рис. 9.10, г, д), либо погружаются в жидкий объект (погружные, рис. 9.10, е, ж). Обычно проходные ВТП имеют однородное магнитное поле в зоне контроля, в результате чего радиальные смещения однородного объекта контроля не влияют на выходной сигнал преобразователя. Для этого длина L_B возбуждающей обмотки должна не менее чем в 3 ... 4 раза превышать ее диаметр D_B а длина L_M измерительной обмотки, размещенной в середине обмотки возбуждающей, должна быть значительно меньше длины последней. Однородное поле получают также, применяя возбуждающую обмотку, выполненную в виде колец Гельмгольца, а измерительную в виде короткой катушки, причем $L_M \ll 2d$, $D_M < 2d$ (рис. 9.10, в).

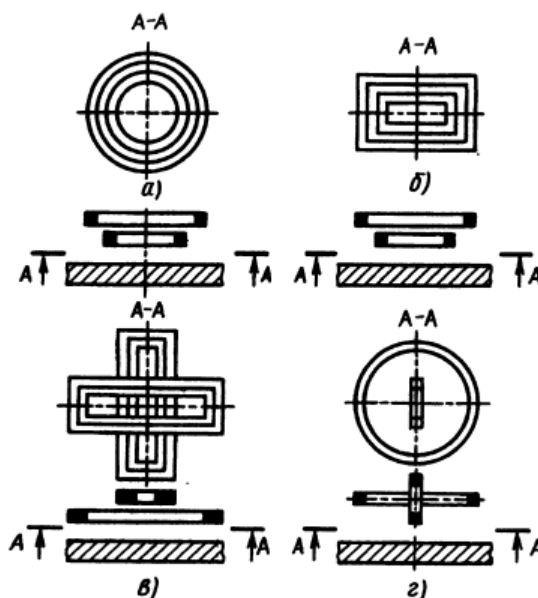


Рис. 9.8. Накладные преобразователи

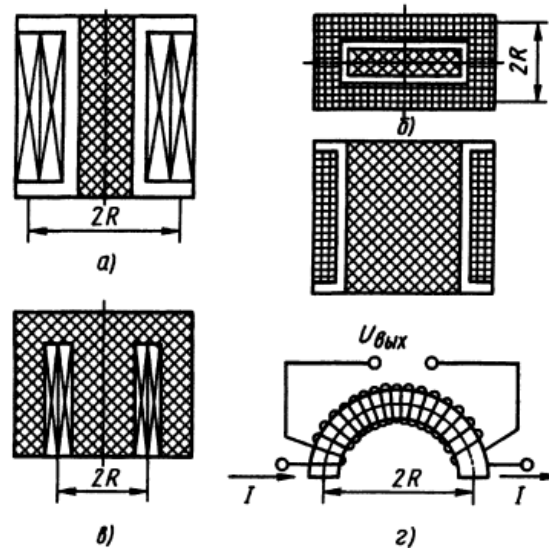


Рис. 9.9 Накладные преобразователи с сердечниками:

- а) – цилиндрическим; б) – прямоугольным; в) – полуброневое типа;
- г) – в виде полутороида

Комбинированные преобразователи

Комбинированные преобразователи представляют собой комбинацию накладных и проходных ВТП. На рис. 9.11, а показаны некоторые разновидности комбинированных ВТП. К ним относятся также ВТП в виде линейно-протяженных витков или рамок, которые можно условно назвать линейными (рис. 9.11, б).

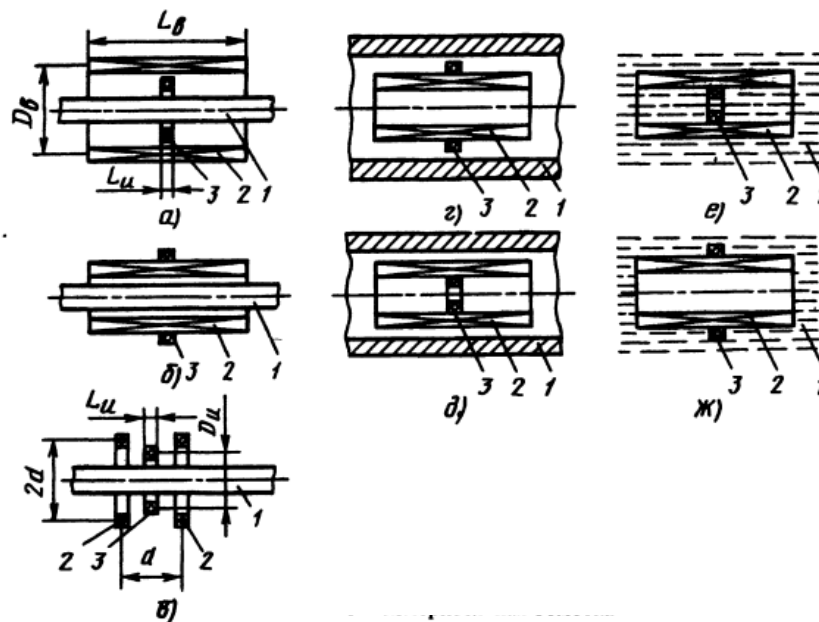


Рис. 9.10. Проходные ВТП:

1 – объект контроля; 2 – возбуждающая обмотка; 3 – измерительная обмотка

Экранные ВТП

Особую разновидность представляют собой экранные ВТП, отличающиеся тем, что их возбуждающие и измерительные обмотки разделены контролируемым объектом. Различают накладные экранные (рис. 9.12, а) и проходные экранные ВТП соответственно преобразователи первого и второго типов (рис. 9.12, б, в).

Трансформаторные и параметрические ВТП

По виду преобразования параметров объекта в выходной сигнал ВТП делят на трансформаторные и параметрические. В трансформаторных, имеющих как минимум две обмотки (возбуждающую и измерительную), параметры объекта контроля преобразуются в напряжение измерительной обмотки, а в параметрических, имеющих, как правило, одну обмотку, в комплексное сопротивление. Преимущество параметрических ВТП заключается в их простоте, а недостаток, который в трансформаторных ВТП выражен значительно слабее, в зависимости выходного сигнала от температуры преобразователя.

По способу соединения обмоток различают абсолютные и дифференциальные ВТП.

Выходной сигнал абсолютного ВТП определяется абсолютным значением параметров объекта, а дифференциального приращениями этих параметров. На рис. 9.13 приведены схемы проходных трансформаторных ВТП (на рис. 9.13а показана схема абсолютного ВТП, а на рис. 9.13б дифференциального).

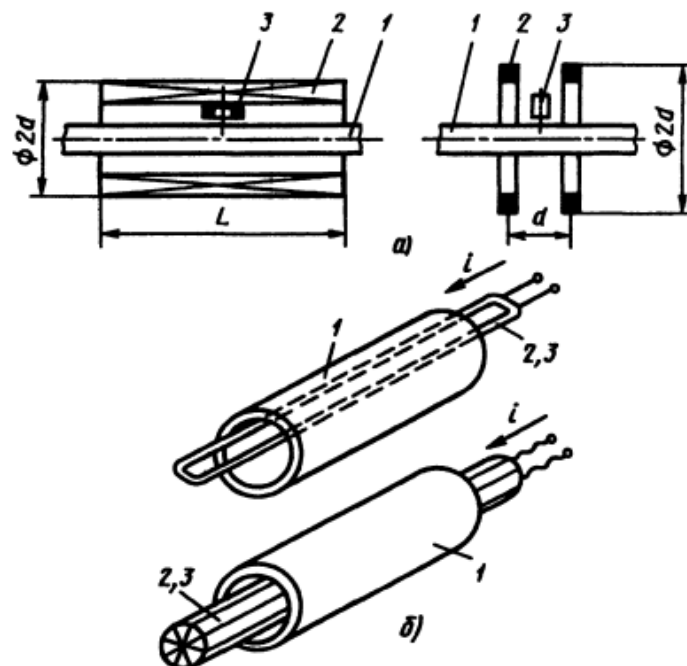


Рис. 9.11 Комбинированные ВТП (позиция см. на рис. 9.10):

а – с проходной возбуждающей и накладной измерительными обмотками;
б– линейные

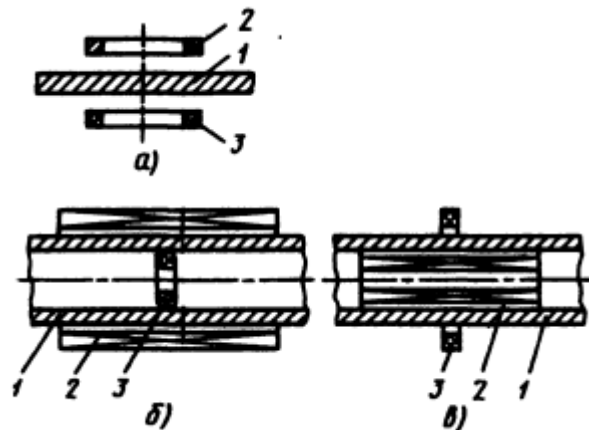


Рис. 9.12. Накладной (а) и проходные экранные ВТП первого (б) и второго (в) типов (позиции см. на рис. 9.10)

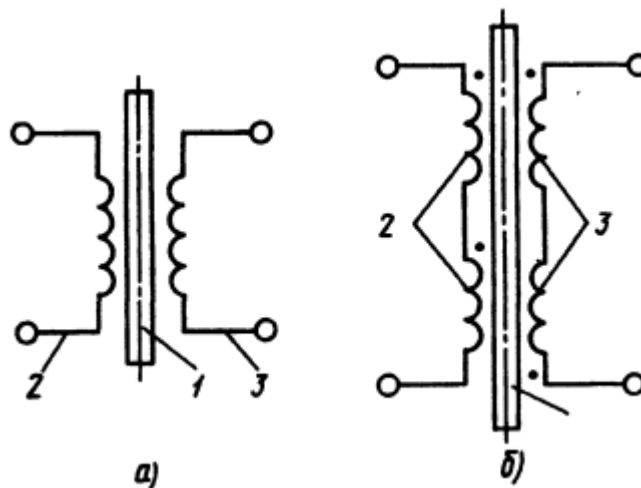


Рис. 9.13. Схемы проходных трансформаторных ВТП (позиции см. на рис. 9.10)

Область применения

Накладными ВТП контролируют в основном объекты с плоскими поверхностями и объекты сложной формы. Эти преобразователи применяют также, когда требуется обеспечить локальность и высокую чувствительность контроля. Наружными проходными ВТП контролируют линейно-протяженные объекты (проволоку, прутки, трубы и т.д.); применяют их и при массовом контроле мелких изделий. Внутренними проходными ВТП контролируют внутренние поверхности труб, а также стенки отверстий в различных деталях. Проходные ВТП дают интегральную оценку

контролируемых параметров по периметру объекта, поэтому они обладают меньшей чувствительностью к локальным вариациям его свойств.

Погружные ВТП применяют для контроля жидких сред, экранные накладные для контроля листов, фольги, тонких пленок, а экранные проходные для контроля труб.

Конструктивные и схемотехнические особенности построения ВТП

С помощью дифференциальных ВТП «самосравнения» можно резко повысить отношение сигнал/помеха в дефектоскопии. При этом обмотки преобразователя размещают так, чтобы их сигналы исходили от близкорасположенных участков контроля одного объекта. Это позволяет уменьшить влияние плавных изменений электрофизических и геометрических параметров объектов. При использовании проходных преобразователей с однородным магнитным полем в зоне контроля значительно уменьшается влияние радиальных перемещений объекта. Применяя экранные накладные преобразователи, можно практически исключить влияние смещений объекта между возбуждающей и измерительной обмотками. Преобразователи с взаимно перпендикулярными осями обмоток (см. рис. 9.14, г) нечувствительны к изменению электрофизических характеристик однородных объектов. При нарушении однородности объекта, например при появлении трещин, на выходе такого преобразователя возникает сигнал. Аналогично работают и комбинированные преобразователи (см. рис. 9.11, а, б). Они также могут быть применены для дефектоскопии. Их недостаток заключается в сильном влиянии перекосов осей преобразователей относительно поверхности объектов контроля.

Чтобы уменьшить влияние края объекта на сигналы ВТП, применяют концентраторы магнитного поля в виде ферритовых сердечников (рис. 9.9) и электропроводящие неферромагнитные экраны, вытесняющие магнитное поле из занятой ими зоны. При размещении экранов в торцах проходных преобразователей влияние краев объектов контроля уменьшается, но при этом ухудшается однородность поля в зоне контроля. Специальные экраны с отверстиями могут служить «масками», при этом отверстие служит источником магнитного поля, возбуждающего вихревые токи в объекте. При использовании «масок» значительно снижается чувствительность ВТП, но повышается их локальность. Повышения локальности ВТП добиваются также комбинацией кольцевых ферромагнитных сердечников с электропроводящими неферромагнитными (обычно медными) вставками и короткозамкнутыми витками, вытесняющими магнитный поток из

сердечников в зону контроля (рис. 9.14, а, б). Кольцевые ферритовые сердечники служат также основой щелевых ВТП, применяемых для контроля проволоки (рис. 9.14, в, г). Для ослабления влияния радиальных перемещений объекта контроля на сигналы ВТП применяют экранирование магнитопровода вблизи щели с целью повышения однородности магнитного поля в щели.

Трансформаторные ВТП обычно включают по дифференциальной схеме. При этом возможны схема сравнения со стандартным образцом и схема «самосравнения». В первом случае рабочий и образцовый ВТП не связаны индуктивно и имеют независимые измерительные и возбуждающие обмотки. Во втором возбуждающая обмотка часто служит общей для двух измерительных. При включении ВТП по дифференциальной схеме повышается стабильность работы прибора. Однако в ряде случаев измерительную обмотку включают последовательно с компенсатором, представляющим собой регулятор амплитуды и фазы напряжения. При этом компенсатор выполняет роль образцового ВТП: когда рабочий ВТП контролирует стандартный образец, то компенсатором устанавливается требуемое напряжение компенсации. Такая схема позволяет устранить нестабильность, связанную с разогревом стандартного образца вихревыми токами

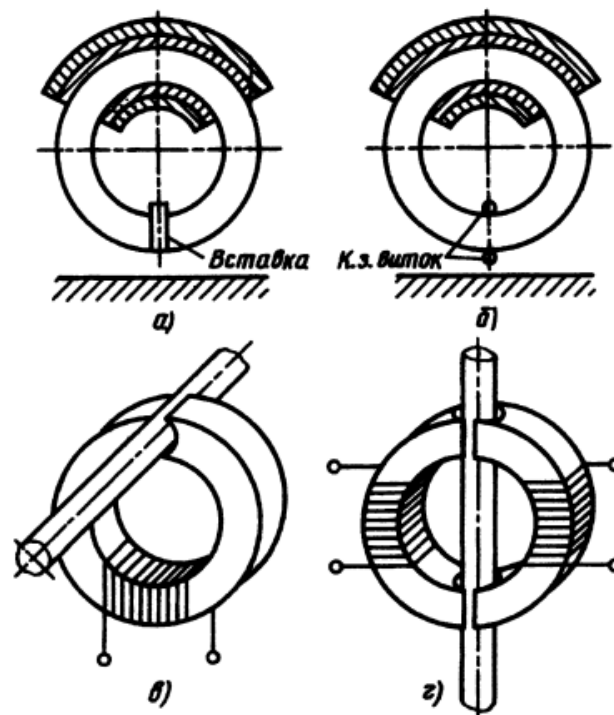


Рис. 9.14. Преобразователи с кольцевыми сердечниками;

- а) – с медной вставкой (экраном) в зазоре; б) – с короткозамкнутым витком;
в), г) – с зазорами для контроля проволоки.

При использовании дифференциальной схемы обычно не исключается применение компенсатора, который в этом случае необходим для компенсации напряжения, вызванного неидентичностью рабочего и образцового ВТП, он включается последовательно со встречно-включенными измерительными обмотками.

Компенсаторы часто выполняют в виде разнообразных фазорегуляторов и аттенуаторов пассивных (RC и LC – типов) и активных. Эффективны компенсаторы в виде регуляторов действительной и мнимой составляющих вектора компенсирующего напряжения.

Параметрические ВТП включают в схему, преобразующую изменение их комплексного сопротивления в изменение амплитуды и фазы (или частоты) напряжения. При включении параметрических ВТП в резонансные контуры, а также в контуры автогенераторов абсолютная чувствительность устройства повышается. Часто параметрические ВТП включают в мостовые схемы, где два плеча моста образуются обмотками рабочего и образцового ВТП, а два других резисторами. Подбирая параметры элементов моста, можно добиться уменьшения влияния мешающего фактора на сигналы ВТП, а также высокой чувствительности к контролируемому параметру даже при малой добротности катушки ВТП.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Как связаны потери на токи Фуко с частотой внешнего поля?
2. Как связаны потери на токи Фуко с удельным сопротивлением материала?
3. Как направлено магнитное поле вихревых токов по отношению к изменению магнитного потока, индуцирующего эти вихревые токи?
4. Где концентрируются вихревые токи?
5. Наличие дефекта в виде трещины поверхностного слоя приводит к уменьшению или увеличению плотности вихревых токов?
6. В каком направлении проводится сканирование детали вихретоковым методом, если известно направление ожидаемого развития дефекта?
7. Какие дефекты выявляются вихретоковым методом НК: поверхностные или объемные?
8. От каких факторов зависит плотность вихревых токов?
9. Какие электрические параметры несут информацию о свойствах объекта и его положении относительно преобразователя, если в качестве вихревого токового преобразователя используется катушка индуктивности?
10. Какого типа дефекты выявляются при помощи вихретокового метода?
11. Какие геометрические размеры объекта могут быть измерены вихретоковым методом?
12. Применяется ли ВТМ для определения структурного состояния металлов?
13. Применяется ли ВТМ для определения структурного состояния диэлектрических материалов?
14. Отличия в величине какого физического свойства металлических материалов и графитов используется для их сортировки вихретоковым методом?
15. Как разделяются вихретоковые преобразователи по рабочему положению относительно объекта контроля?
16. Какие виды форм имеют применяемые накладные вихретоковые преобразователи?
17. На какие виды разделяются проходные вихретоковые преобразователи?
18. Чем отличается конструкция экранных вихретоковых преобразователей?
19. Какая схема используется для измерения комплексного сопротивления катушки параметрического вихретокового преобразователя?

Уровень курса

1. Вихревые токи, их свойства.
2. Использование свойств вихревых токов для выявления дефектов.

Лекція № 10

Тема: Физические основы радиоволнового вида неразрушающего контроля. Основы СВЧ-техники.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Радиоволны..... | 3 |
| Особенности радиоволн СВЧ–диапазона..... | 4 |
| Параметры электромагнитной волны и среды распространения | 5 |
| Отраженная и стоячая электромагнитная волна. Параметры, характеризующие отражение..... | 6 |
| Поляризация электромагнитной волны | 6 |
| Взаимодействие радиоволн с диэлектрическим слоем..... | 9 |
| Рассеяние радиоволн | 10 |
| Источники и приемники радиоволнового излучения СВЧ, элементы техники СВЧ..... | 10 |
| Источники | 10 |
| Направляющие системы..... | 10 |
| Передающие и приемные антенны..... | 12 |
| Развязывающие элементы | 13 |
| Приемники радиоволн СВЧ..... | 14 |
| Контрольные вопросы по теме | 17 |
| Уровень модуля..... | 17 |
| Уровень курса..... | 18 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 3: Радиоволновой контроль. /В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.: ил.

3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

Радиоволны

Радиоволны – это широкий спектр электромагнитного излучения, подчиняющегося общеизвестным законам электродинамики и, по мере укорочения длины волны, – оптическим. Радиоволны могут быть как естественного происхождения, т.е. собственное излучение нагретых сред (подобно инфракрасному излучению) и искусственные радиоволны, создаваемые генераторами электромагнитных колебаний. Весь электромагнитный спектр можно представить следующим образом (рис. 14.1).

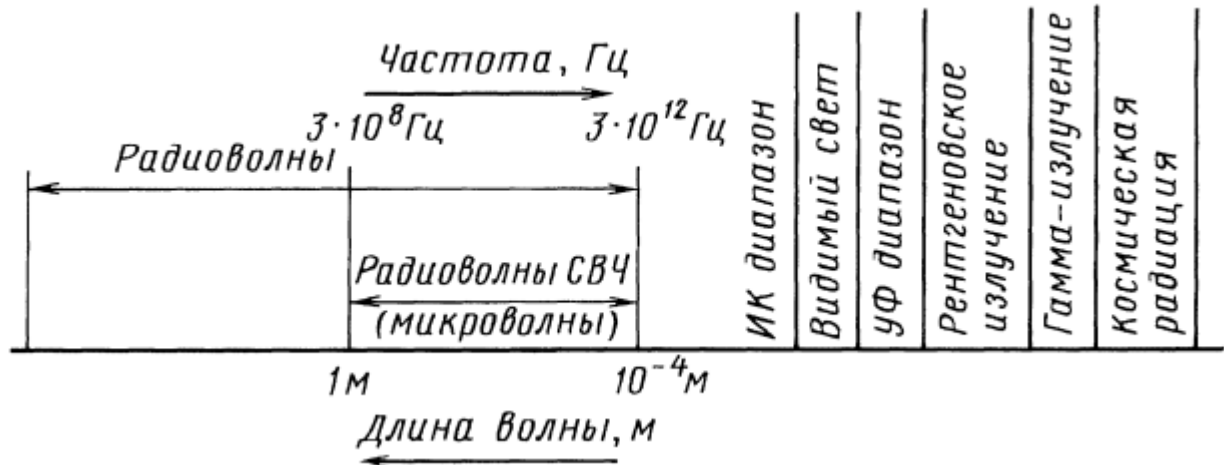


Рис. 14.1. Электромагнитный спектр

СВЧ-диапазон радиоволн в связи со спецификой техники разбит на поддиапазоны. Принято следующее деление: метровый, дециметровый, сантиметровый (10 – 1 см), миллиметровый (10 – 1 мм) и субмиллиметровый (1 – 0,1 мм) поддиапазоны.

В соответствии с международными стандартами каждому микроволновому поддиапазону присвоена определенная латинская буква:

UHF – от 0.3 до 1 ГГц

L – от 1 до 2 ГГц

S – от 2 до 4 ГГц

C – от 4 до 8 ГГц

X – от 8 до 12 ГГц

Ku – от 12 до 18 ГГц

K – от 18 до 27 ГГц

Ka – от 27 до 40 ГГц

V – от 40 до 75 ГГц

W – от 75 до 110 ГГц

mm – от 110 до 300 ГГц

Любая радиоволна характеризуется длиной волны или частотой, интенсивностью, амплитудой, фазой, поляризацией и типом волны.

Особенности радиоволн СВЧ–диапазона

Радиоволновые методы основаны на использовании взаимодействия радиоизлучений с материалами контролируемых изделий. Это взаимодействие может носить характер взаимодействия только падающей волны (процессы поглощения, дифракции, отражения, преломления, относящиеся к классу радиооптических процессов) или взаимодействия падающей и отраженной волн (интерференционные процессы, относящиеся к области радиоголографии). Кроме того, в радиоволновых методах могут использоваться специфические резонансные эффекты взаимодействия радиоволнового излучения (электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс и др.). Использование радиоволн перспективно по двум причинам: расширение области применения диэлектрических, полупроводниковых, ферритовых и композиционных материалов, контроль которых другими методами менее эффективен; возможности использования особенностей радиоволн СВЧ–диапазона. К числу этих особенностей относятся следующие:

1. СВЧ–диапазон обеспечен большим перепадом мощностей генерируемых волн, что позволяет контролировать материалы и среды различной степени прозрачности, от весьма тонких до таких, как мощные бетонные основания.

2. Радиоволны СВЧ легко могут быть генерированы в виде когерентных поляризованных гармонических колебаний (волн), а это дает возможность обеспечивать высокую чувствительность и точность контроля, используя интерференционные явления, возникающие при взаимодействии когерентных волн с диэлектрическим слоем.

3. С помощью радиоволн СВЧ можно осуществить бесконтактный контроль качества при одностороннем расположении аппаратуры по отношению к объекту – способ контроля на отражение.

4. Радиоволны СВЧ могут быть остро сфокусированы, что позволяет обеспечить локальность контроля, минимальный краевой эффект, помехоустойчивость по отношению к близко расположенным предметам, исключить влияние температуры объекта контроля на измерительные датчики и т.п.

5. Информация о внутренней структуре, дефектах и геометрии содержится в большом числе параметров полезного СВЧ–сигнала: амплитуде, фазе, коэффициенте поляризации и т.д.

6. Применение радиоволн СВЧ обеспечивает весьма малую инерционность контроля, позволяя наблюдать и анализировать быстропротекающие процессы.

7. Аппаратура СВЧ-диапазона может быть выполнена достаточно компактной и удобной в эксплуатации.

8. При использовании резонансных радиоволновых СВЧ-методов имеется возможность многопараметрового контроля геометрии, состава и структуры материала в "здоровой" и "дефектной" зонах.

Преимущественная область применения методов и техники СВЧ –это контроль полуфабрикатов, изделий и конструкций из диэлектрических, композиционных, ферритовых и полупроводниковых материалов, в которых радиоволны распространяются. От металлических структур радиоволны полностью отражаются, поэтому их применение возможно только для контроля геометрических параметров и поверхностных дефектов, а для толщинометрии металлических лент, листов, проката требуется двухстороннее расположение датчиков аппаратуры по отношению к объекту контроля.

Параметры электромагнитной волны и среды распространения

Канал распространения колебаний СВЧ (двухпроводные линии, волноводы, свободное пространство) характеризуют *волновым сопротивлением* $z = \sqrt{\mu_a / \varepsilon_a}$, где μ_a и ε_a – соответственно абсолютная магнитная и диэлектрическая проницаемость среды. Для идеального диэлектрика оно вещественно и при $\varepsilon_a = 1$ равно $z_0 = 377$ Ом.

Отношение $\gamma / (\omega \varepsilon_a) = \operatorname{tg} \delta$ называют *тангенсом угла диэлектрических потерь* и относят к важнейшим параметрам диэлектриков.

Здесь γ – удельная электрическая проводимость; ω – угловая частота. На одной частоте ($\operatorname{tg} \delta < 0,01$) материал может считаться диэлектриком, на другой ($\operatorname{tg} \delta > 100$) – проводником.

При расчетах к идеальным диэлектрикам относят материалы, для которых $\operatorname{tg} \delta < 0,01$. На частотах, меньших $9 \cdot 10^6$ Гц, морскую воду относят к классу диэлектриков; на частотах, больших $9 \cdot 10^{10}$ Гц – к классу проводников. В промежуточной области $0,01 < \operatorname{tg} \delta < 100$ материал называют несовершенным диэлектриком/

С ростом частоты z увеличивается, и волны не могут глубоко проникать в проводник. Явление экранирования наружными слоями материала глубинных слоев от проникновения поля называют скин-эффектом. Он характеризуется глубиной проникновения плоской волны $\delta = \sqrt{2 / (\omega \mu_a)}$, на которой напряженность полей E и H уменьшается в e раз.

Скорость распространения электромагнитной волны в несовершенном диэлектрике зависит от частоты.

Отраженная и стоячая электромагнитная волна. Параметры, характеризующие отражение

При переходе электромагнитной волны из одной среды в другую по нормали к граничной поверхности формируется отраженная волна. При наложении обеих волн образуется стоячая волна, характеризующая коэффициентом стоячей волны по напряжению $k_{стU} = E_{\max} / E_{\min}$ или коэффициентом бегущей волны по напряжению $k_{\delta U} = 1 / k_{стU}$. Максимумы стоячей волны получаются там, где действующие значения напряженности падающей и отраженной волн складываются, а минимумы там, где они вычитаются.

$$k_{\delta U} = \frac{1}{k_{стU}} = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|}$$

где ρ – коэффициент отражения. В теории длинных линий этот коэффициент выражается через волновые сопротивления первой z_{c1} и второй z_{c2} сред:

$$\rho = (z_{c2} - z_{c1}) / (z_{c2} + z_{c1})$$

Поляризация электромагнитной волны

Электромагнитная волна представляет собой совокупность быстропеременных электрического E и магнитного H полей, распространяющихся в определенном направлении z .

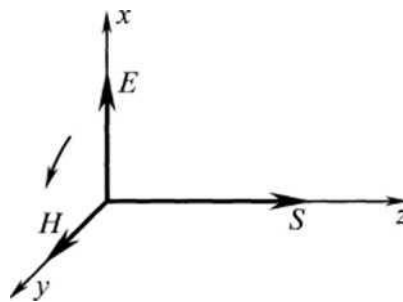


Рис. 14.2. Схема расположения векторов E , H и S в бегущей электромагнитной волне

При радиоволновом контроле диэлектрических материалов необходимо знать диэлектрическую проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ (обычно для диэлектриков магнитная проницаемость $\mu = 1$), для полупроводников и магнитных материалов необходимо учитывать ϵ и μ , для металлов в основном имеет значение величина проводимости γ .

В неограниченной диэлектрической среде без потерь $\mu = 1$; $\gamma = 0$, наличие магнитной составляющей поля связано с существованием электрической составляющей E , играющей основную роль в современных средствах контроля.

Одним из важнейших параметров электромагнитной волны является ее поляризация, определяемая ориентацией вектора E в пространстве по мере ее распространения. Волну называют естественной (неполяризованной), если вектор E принимает в плоскости, перпендикулярной к направлению ее распространения, в различные моменты времени различные направления, а конец его описывает окружность. Если при тех же условиях конец вектора описывает эллипс, то волну называют частично поляризованной по эллипсу. Когда вектор E равномерно вращается (влево и вправо) вокруг направления распространения, а конец его описывает эллипс, то волну называют поляризованной по эллипсу (влево и вправо) (рис. 14.3). В частных случаях эллипс вырождается в окружность (волна поляризована по кругу) или прямую линию (плоско поляризованная волна).

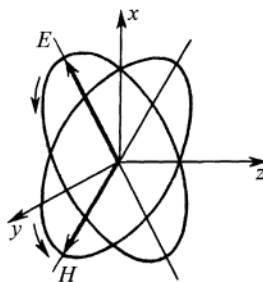


Рис. 14.3. Схема эллиптической поляризации

В свободной волне E и H софазны, т.е. они одновременно в одних и тех же точках пространства достигают максимального или минимального значения (рис. 14.4). Аналогичная картина получается, если вместо z отложить время t . Векторы E и H всегда образуют правый винт, что определяет направление распространения энергии и очень важно при анализе условий отражения.

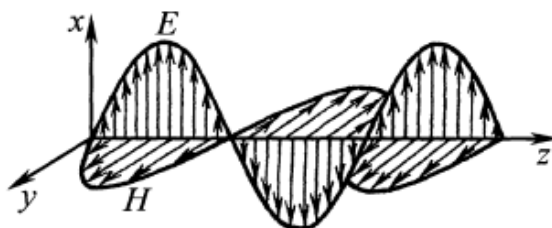


Рис. 14.4. Схема распространения плоскополяризованной электромагнитной волны

Поток энергии S ортогонален векторам E и H и совпадает с направлением распространения волн z . Поток энергии колеблется с удвоенной частотой по сравнению с E и H (рис. 14.5), принимая положительные значения.

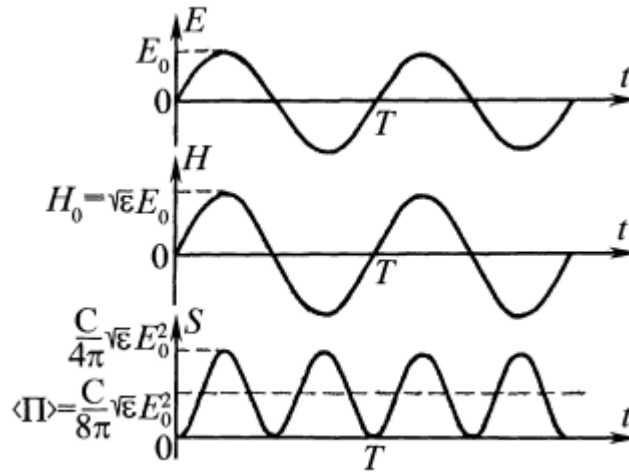


Рис. 14.5. Изменение во времени значений E , H и S в бегущей волне

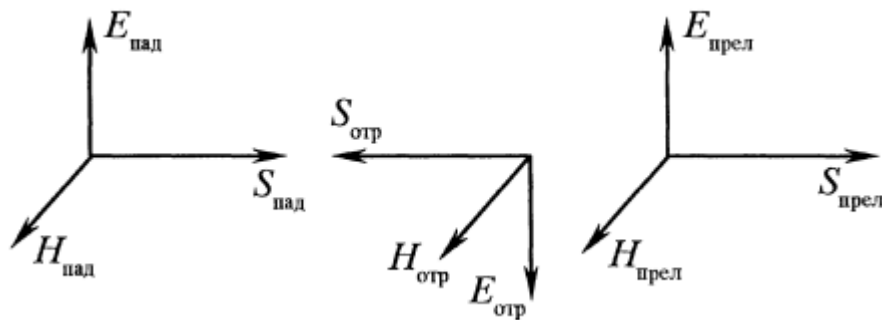


Рис. 14.6. Векторы E , H и S в падающей, отраженной и преломленной волнах при прохождении из среды оптически менее плотной в оптически более плотную ($n_2 > n_1$)

Плотность потока энергии пропорциональна квадрату амплитуды электрического поля. Это общее и важное положение, на котором фактически основана возможность регистрации распространяющихся электромагнитных волн различными приемниками, так как из-за инерционности приемники энергии СВЧ регистрируют средние значения квадрата амплитуды E^2 .

При наличии границы раздела появляется отраженная волна, взаимодействующая с падающей и образующая в первой среде (рис. 14.6) стоячую волну, для которой как во времени, так и в пространстве имеет место сдвиг фаз $\Delta\varphi = \pi/2$ между векторами E и H .

Узлы и пучности векторов E и H разнесены пространственно, и расстояние между ними равно $\lambda/4$. В любом узле вектор $S = [EH]$ обращается в нуль, т.е. энергия не распространяется вдоль z .

Измеряя расстояние между узлами (или пучностями) электрической напряженности, находят значения длины волны.

Взаимодействие радиоволн с диэлектрическим слоем

С точки зрения теоретической электродинамики задача контроля сред методами СВЧ может быть сформулирована в виде граничной задачи о взаимодействии конкретных типов электромагнитных волн определенного вида поляризации с ограниченными или полугограниченными в пространстве объемами этих сред, имеющими разнообразные геометрические формы, свойства поверхности и диэлектрические свойства, изменяющиеся при изменении структуры сред. Результаты взаимодействия зависят от геометрии объектов контроля, от значений их диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь, которые, в свою очередь, определяются химико-минералогическим составом, кристаллической структурой, степенью однородности, влагосодержанием материала объекта контроля.

Электромагнитная волна, падая на плоскую границу раздела сред, частично проходит через нее, продолжая распространяться в измененном направлении – преломляется, частично же отражается от границы, которая при этом служит источником обратной волны, поэтому в первой среде имеются падающая и отраженная волны, а во второй преломленная. Падение электромагнитной волны на тело ограниченных размеров представляет собой принципиально аналогичное, однако значительно более сложное явление, называемое дифракцией. Ни отраженная, ни преломленная волны здесь уже не могут быть плоскими.

В однородной среде радиоволны распространяются прямолинейно с постоянной скоростью. Скорость распространения

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

В оптике коэффициент преломления n определяется как отношение C к скорости света в среде:

$$n = \frac{C}{V} = \sqrt{\frac{\epsilon_a \mu_a}{\epsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{\epsilon\mu}$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, относительная магнитная проницаемость. Тогда будем иметь

$$n^2 = \varepsilon\mu$$

Так как большинство материалов, применяемых при работе с радиоволнами, имеет удельную магнитную проницаемость порядка единицы, то квадрат коэффициента преломления практически равен относительной диэлектрической проницаемости.

Если имеется ряд плоскостей, нормальных к оси Z , разделяющих пространство на области, заполненные средами с различными диэлектрическими постоянными, то внутри каждой среды мы можем представить поля в виде суммы двух волн, двигающихся вдоль положительного и отрицательного направления оси Z .

Реальные источники создают сферические волны, но на сравнительно большом расстоянии от источника малую часть фронта сферической волны можно считать плоской. Кроме того, получение практически плоской волны в СВЧ-диапазоне возможно путем использования специальных излучающих апертур (антенн).

Рассеяние радиоволн

При падении электромагнитной волны на какой-либо проводящий объект на его поверхности возникают электрические токи, или электрические заряды, если объект диэлектрический. В этом случае объект сам становится источником излучения электромагнитных колебаний. Энергия падающей на объект электромагнитной волны рассеивается во всех направлениях.

Локальные неоднородности и дефекты в протяженной среде, как правило, будут являться источником рассеяния и дифракции. Рассеивающие свойства объекта (дефекта) характеризуют эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР).

Источники и приемники радиоволнового излучения СВЧ, элементы техники СВЧ

Источники

Колебания СВЧ могут быть получены с помощью генераторов магнетронного типа, ламп обратной волны, отражательных клистронов, квантовомеханических генераторов и полупроводниковых приборов. Наибольшее применение находят клистроны, затем следуют магнетроны, лампы обратной волны и полупроводниковые генераторы.

Направляющие системы

В приборах, связанных с излучением радиоволн, энергия от генераторов к антенне или от антенны к приемнику передается с помощью направляющих

систем. Электромагнитные волны направляются проводящими или изолирующими поверхностями, образующими каналы электромагнитной энергии в пространстве между ними.

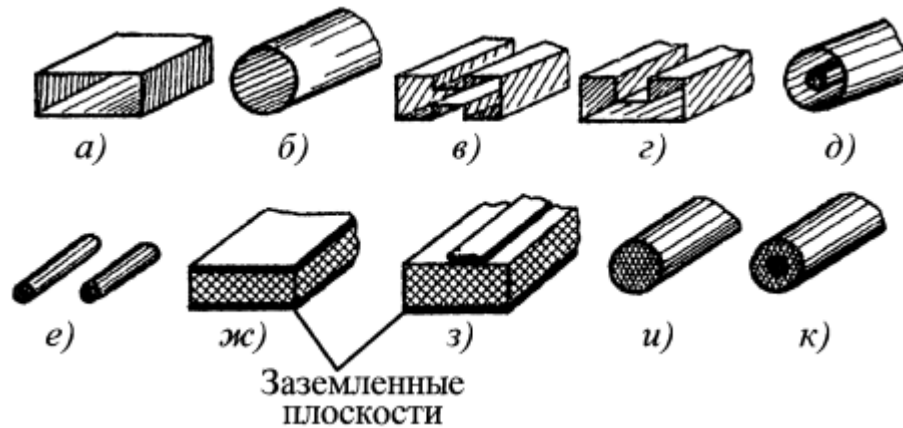


Рис. 14.7. Основные типы применяемых на практике направляющих систем:

а – прямоугольный волновод; б – круглый волновод; в,г – волноводы сложного профиля; д – коаксиальный волновод; е – двухпроводная линия; ж, з – полосковые линии; и, к – диэлектрические волноводы

На рис. 14.7 схематически изображены основные типы направляющих систем. На практике в приборах НК чаще всего используют прямоугольные волноводы.

По волноводу волна может распространяться в двух направлениях: от генератора к нагрузке и от нагрузки к генератору; первую волну называют падающей или прямой, вторую отраженной или обратной. Если нагрузка полностью потребляет переносимую падающей волной энергию, говорят, что она согласована с волноводом. Если нагрузка потребляет переносимую падающей волной энергию лишь частично (вследствие чего появляется отраженная волна), говорят, что нагрузка не полностью согласована с волноводом. Режим работы волновода определяется интерференцией падающей и отраженной волн (в данном случае одного основного типа колебаний). При этом поле в волноводе можно рассматривать как результат наложения полей двух волн: бегущей, участвующей в передаче энергии от генератора к нагрузке, и стоячей, не участвующей в передаче энергии.

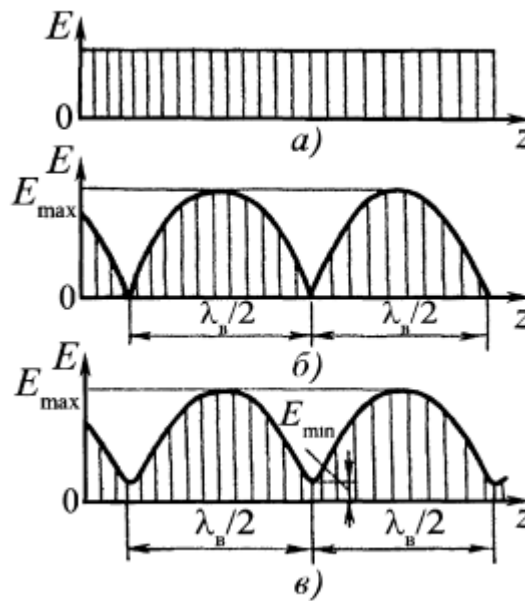


Рис. 14.8. Распределение амплитуд напряженности электрического поля вдоль оси волновода: а – в режиме бегущей волны; б – в режиме стоячей волны; в – в смешанном режиме

На рис. 14.8 показано распределение амплитуд напряженности электрического поля вдоль оси волновода для основного типа волн.

Передающие и приемные антенны

Для излучения и приема радиоволн используют антенны. Антенны диапазона СВЧ характеризуют апертурой – раскрывом (выраженным обычно через длину волны излучения), а также диаграммой направленности, КПД и другими параметрами.

Передающие антенны стремятся делать остронаправленными, чтобы получить высокую локальность контроля объектов. Приемные антенны должны обеспечивать наилучшие условия приема энергии радиоволн СВЧ, приходящих от ОК. Как передающие, так и приемные антенны, по возможности, должны быть согласованы с внешним пространством и волноводным трактом, чем достигаются оптимальные условия передачи электромагнитной энергии от генератора к ОК и от ОК к приемнику. Во многих случаях один и тот же тип антенны может быть использован и для излучения, и для приема.

Рупорная антенна представляет комбинацию отрезка волновода постоянного сечения и собственно рупора (рис. 14.9). Частный случай рупорной антенны открытый конец волновода.

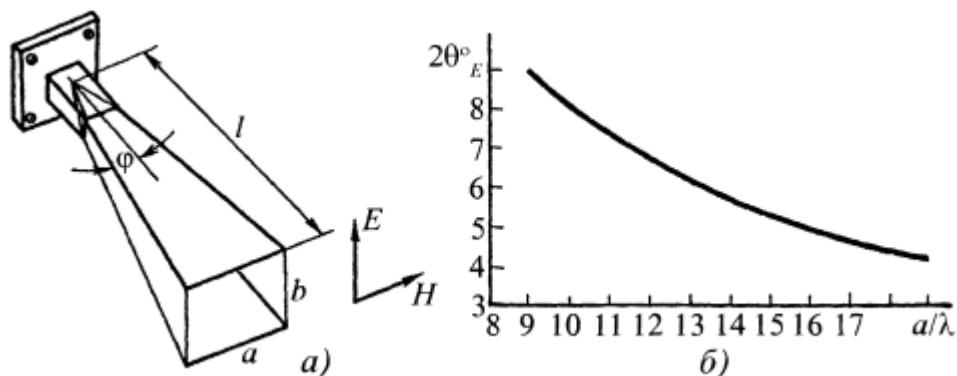


Рис. 14.9. Рупорная антенна (а) и зависимость ее ширины диаграммы направленности от размеров (б)

Рупорные антенны формируют на выходе сферическую волну, распространяющуюся вдоль оси рупора. Излучение рупорной антенны можно рассматривать как прохождение электромагнитных волн через отверстие в экране (раскрыв рупора) с учетом дифракции.

Фокусирующие антенны (эллиптические, линзовые, гиперболические и др.) используют в приборах НК значительно реже, поскольку они сложны в изготовлении, имеют крупные габаритные размеры и массу, нуждаются в первичном облучателе, как правило рупоре. Однако фокусирующие линзы нередко используют для компенсации дифракции простых рупорных антенн.

Развязывающие элементы

Для развязки различных участков волноводного тракта между собой и прежде всего для развязки генератора СВЧ с нагрузкой применяют различные развязывающие устройства: вентили, циркуляторы, аттенюаторы и т.п.

Основные характеристики **вентилей** – устройства для передачи энергии СВЧ только в одном направлении: полоса рабочих частот, вносимые потери в прямом направлении, затухание в обратном направлении, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) на входе в полосе рабочих частот, температурная зависимость параметров, а также габаритные размеры и масса. Качество развязки вентилей можно характеризовать вентильным отношением (добротностью) отношением мощности затухания обратной волны к мощности потерь прямой.

Фазовращатели широко используют в измерительных схемах, для фазовой автоподстройки, фазовой компенсации, установки фазы и т.д. В классических конструкциях в волновод вводят диэлектрическую пластину из высококачественного диэлектрика, что приводит к изменению фазовой постоянной волны на регулируемом участке волновода. Перемещать пластину можно вручную или с помощью электромеханического привода через

профилированный кулачковый механизм. Чем больше ε материала пластины, тем больше фазовый сдвиг проходящей волны. Обычно максимальный фазовый сдвиг в регулируемых фазовращателях достигает $180... 360^\circ$.

В конструкцию многих рассмотренных элементов волноводного тракта входят **поглощающие нагрузки**. Маломощные поглощающие нагрузки используют в таких устройствах, где требуется поглотить незначительную энергию (направленные ответвители, ослабители, маломощные циркуляторы). В качестве материала, обладающего большими поглощающими свойствами, часто применяют гетинаксовые пластины, покрытые с одной или с обеих сторон слоем графитовой или угольной суспензии.

На практике часто встречаются следующие **ответвления волноводов**: *T*-образные соединения из прямоугольных волноводов, двойные волноводные тройники, кольцевые волноводные мосты.

На рис. 14.10 показаны два вида волноводных ответвлений для волны в прямоугольном волноводе: *T*-образное типа *E* и *T*-образное типа *H*.

Существует несколько типов **направленных ответвителей**, широко используемых для отвода части энергии из основного волноводного тракта, измерения проходящей мощности, частоты и для других целей.

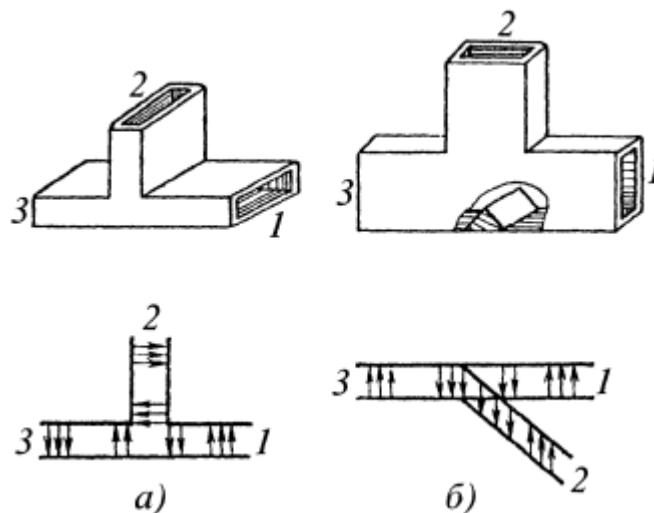


Рис. 14.10. Волноводные *T*-образные ответвления *E* (а) и *H*-типа (б):

1,3 – главный волновод; 2 – боковое ответвление

Приемники радиоволн СВЧ

В приборах СВЧ для неразрушающего контроля и при всех экспериментальных работах в диапазоне СВЧ необходимо прежде всего установить наличие сигнала, измерить, усилить и обработать его. Известны многочисленные методы обнаружения сигналов СВЧ, однако практически

наиболее распространены выпрямляющие устройства и термоэлектрические преобразователи.

Термоэлектрические преобразователи (термопары, терморезисторы, болометры и т.д.) широко используют для измерения тепловых величин. Их применение в технике СВЧ основано на тепловом действии энергии радиоволн СВЧ. Специфический вид термоэлектрического детектора – *болометр*, представляющий собой проводниковый или полупроводниковый резистор, который нагревается под воздействием излучения и вследствие этого изменяет свое сопротивление. Это изменение сопротивления может быть легко обнаружено с помощью соответствующих (например, мостовых) схем.

Термочувствительные полупроводниковые резисторы – *терморезисторы* предназначены для измерения мощности в диапазоне СВЧ. Они имеют вид маленькой бусинки из полупроводника диаметром около 0,4 мм, укрепленной между двумя тонкими проволочными выводами. Полупроводник образует сопротивление с очень большим отрицательным температурным коэффициентом. Высокая чувствительность к изменениям мощности нагрева делает терморезисторы пригодными для измерения мощности в диапазоне нескольких милливатт, однако это обстоятельство в свою очередь усложняет температурную компенсацию, особенно в случаях измерения очень малых мощностей.

Преобразовать сигналы СВЧ в постоянный ток или токи низкой частоты, которые могут быть измерены обычными методами, позволяют *полупроводниковые диоды*. Они могут быть использованы как детекторы или как преобразователи. Современные кристаллические детекторы являются наиболее чувствительными и доступными детектирующими устройствами, поэтому они широко применяются в измерительной аппаратуре. Важнейшие параметры кристаллического детектора вольт–амперная характеристика и чувствительность. Если напряжение сигнала достаточно мало и не выходит за пределы начального (квадратичного) участка вольт–амперной характеристики, то выпрямленный ток пропорционален квадрату приложенного напряжения. Поэтому детектор слабых сигналов называют квадратичным детектором.

Различают чувствительность детектора по току и по напряжению. Чувствительность по току/напряжению определяется как отношение выпрямленного тока/напряжения к поглощенной мощности высокой частоты. Типичная чувствительность по току составляет 0,1 ... 1,0 мкА/мкВт, по напряжению 10 ... 300 мкВ/мкВт.

Детекторные диоды помещают в специальные конструкции детекторные секции (головки). На рис. 14.11 приведена распространенная конструкция детекторной секции восьмимиллиметрового диапазона.

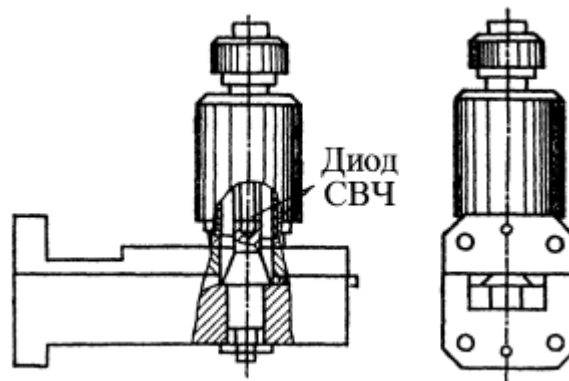


Рис. 14.11. Конструкция детекторной секции

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Распространение радиоволн подчиняется законам оптики или электродинамики?
2. Какой диапазон частот охватывают СВЧ–радиоволны?
3. Назовите поддиапазоны СВЧ–диапазона, квалифицированные по длине волны.
4. Какие параметры характеризуют радиоволну?
5. Какие физические процессы, связанные с распространением волн, используются для проведения неразрушающего контроля?
6. Каковы особенности радиоволн СВЧ–диапазона, которые позволяют эффективно их использовать для проведения НК?
7. Для контроля изделий из каких материалов в основном используется радиоволновой вид НК?
8. Эффективно ли использование радиоволнового вида НК для контроля металлических изделий? Почему?
9. Что такое волновое сопротивление?
10. Что называют тангенсом угла диэлектрических потерь по отношению к каналу распространения СВЧ–колебаний?
11. Что называется скин-эффектом в явлениях распространения СВЧ–радиоволн?
12. Зависит ли скорость распространения электромагнитной волны внутри несовершенного диэлектрика от длины волны?
13. Направлением какого вектора определяется поляризация радиоволны?
14. Какая волна называется неполяризованной?
15. Какое направление имеет поток энергии при распространении радиоволн?
16. Какой тип волны образуется в первой среде при отражении радиоволны от границы раздела двух сред?
17. Какие источники СВЧ–колебаний получили наибольшее распространение?
18. Какой тип антенн наиболее широко применяется при выполнении радиоволнового вида НК?
19. Может ли один и тот же тип антенны быть использован и для излучения и для приема?
20. Какой тип направляющих систем чаще всего используют в приборах НК на практике?

21. Какие термоэлектрические преобразователи применяют в технике СВЧ для приема радиоволн?
22. Используют ли полупроводниковые приборы для приема радиоволн СВЧ–диапазона?

Уровень курса

1. Природа радиоволн. Электромагнитный спектр и диапазоны радиоволн.
2. Особенности радиоволн СВЧ–диапазона, используемые для выполнения неразрушающего контроля.
3. Параметры электромагнитной волны и среды распространения.
4. Отраженная и стоячая электромагнитная волна. Параметры, характеризующие отражение.
5. Взаимодействие радиоволн с диэлектрическим слоем. Рассеяние радиоволн.
6. Источники радиоволнового излучения и направляющие системы.
7. Передающие и приемные антенны.
8. Развязывающие элементы СВЧ-техники.
9. Приемники радиоволн в неразрушающем контроле.

ЛЕКЦИЯ № 11

Тема: Радиоволновой вид неразрушающего контроля. Физические основы СВЧ-толщинометрии.

Оглавление

| | |
|---|----|
| Классификация методов и основные области применения радиоволнового контроля | 2 |
| СВЧ–толщинометрия | 2 |
| Геометрический метод | 2 |
| Амплитудно-фазовый метод | 5 |
| Амплитудно-фазовый метод при двухстороннем расположении антенн | 6 |
| Контроль толщины тонких металлических покрытий на прохождение | 7 |
| Частотно-фазовый метод..... | 7 |
| Контрольные вопросы по теме | 10 |
| Уровень модуля..... | 10 |
| Уровень курса..... | 10 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 3: Радиоволновой контроль. /В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.: ил.
3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

Классификация методов и основные области применения радиоволнового контроля

Классификация методов. По первичному информационному параметру различают следующие СВЧ-методы неразрушающего контроля: амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый, частотнофазовый, поляризационный, геометрический, временной. Первые пять методов основаны на регистрации одного или двух параметров волн, взаимодействующих с контролируемым объектом: амплитуды (интенсивности), модуля коэффициента отражения или прохождения, фазы, амплитуды и фазы, частоты (длины волны) и фазы, поляризации. Геометрический метод основан на регистрации пространственного положения максимума интенсивности радиоволнового пучка, прошедшего через объект или отраженного от его противоположной поверхности. Временной метод основан на регистрации времени прохождения волны (импульса) через объект. В зависимости от источника излучения методы разделяются на активные и пассивные. При пассивных методах предполагается собственное излучение как самих контролируемых тел, так и сред, расположенных за объектом контроля, в СВЧ-диапазоне. В неразрушающем контроле последние методы пока редко используются. При активных методах используются, как правило, маломощные источники СВЧ-излучения с интенсивностью до 1 Вт. По расположению датчиков относительно объекта контроля различают три основных варианта: одностороннее расположение, двухстороннее и под прямым углом оптических осей друг к другу (способ фиксации параметров рассеянного излучения). Резонансные СВЧ-методы делятся по виду резонансного эффекта (электронный парамагнитный, ядерный магнитный, ферромагнитный, ядерный квадрупольный) и по характеру изменения магнитного поля (с постоянным или меняющимся магнитным полем).

СВЧ-толщинометрия

Методы СВЧ-толщинометрии используются для контроля толщины диэлектрических покрытий на любой металлической основе, на диэлектрической основе (при разнице диэлектрических свойств основы и покрытия), для толщинометрии диэлектрических слоев и металлических листов и проката. В практике неразрушающего контроля толщины наибольшее применение нашли методы: геометрический, амплитудно-фазовый, частотно-фазовый и поляризационный (эллипсометрический).

Геометрический метод

Если направить оптическую ось радиоволнового пучка, совпадающую с максимумом распределения интенсивности в поперечном сечении, под углом

θ к нормали поверхности плоского диэлектрического слоя толщиной h (рис. 1), то расстояние между точками "входа" пучка и "выхода", будет связано определенной зависимостью с толщиной слоя h . В геометрическом методе информация о толщине содержится в геометрическом параметре l . Если вводить пучок в слой без преломления, а угол θ выбрать равным $\arctg 0.5$, то получим $h = l$.

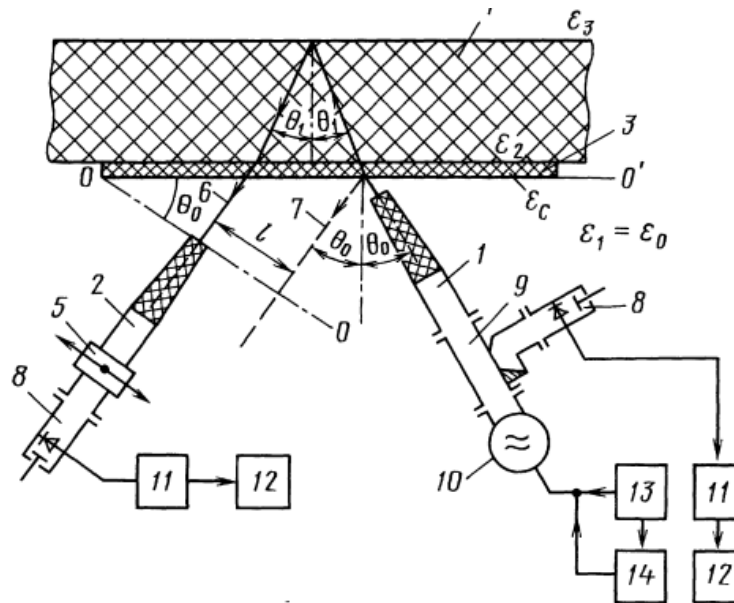


Рис. 1. Блок-схема геометрического метода измерений толщины:

- 1 – передающая антенна (излучатель); 2 – приемно-индикаторная антенна;
 3 – согласующая диэлектрическая пластина; 4 – контролируемый слой;
 5 – механизм перемещения приемно-индикаторной антенны; 6 – оптическая ось пучка, отраженного от задней поверхности слоя; 7 – то же, но от передней поверхности без согласующей пластины; 8 – детекторная секция;
 9 – направленный ответвитель; 10 – генератор СВЧ; 11 – усилитель НЧ;
 12 – индикатор; 13 – источник питания; 14 – модулятор

Чем больше поперечные размеры применяемых пучков, чем больше их угловая расходимость, а также чем меньше при этом толщина диэлектрического слоя, тем сильнее проявляется взаимодействие отраженных пучков, приводящее к амплитудно-фазовым искажениям за счет интерференции в пространстве взаимодействия. Эти искажения приводят к значительной погрешности фиксации максимума отраженного от задней границы раздела пучка и, следовательно, к снижению точности определения толщины геометрическим методом. Для устранения этого явления используется согласование граничащих сред путем введения промежуточного слоя с параметрами, определенными выражением $\epsilon_c = \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2}$. Согласующий слой увеличивает прозрачность передней границы раздела и, частично или

полностью устраняя первый отраженный пучок, приводит к повышению точности измерений, чувствительности контроля толщины. При параллельной (вертикальной) поляризации согласование сохраняется практически в области углов падения от 0 до 50°, что очень важно при использовании расходящихся радиоволновых пучков.

Точность геометрического метода зависит от следующих трех основных источников погрешности: изменения диэлектрических свойств материала слоя, ошибки измерения смещения максимума отраженного пучка и ошибки измерения угла падения первичного пучка. Если инструментальную погрешность геометрического метода свести к нулю, то получим предельную относительную точность определения толщины, равную относительному изменению среднего значения показателя преломления измеряемой среды, т.е.

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta n}{n}$$

Для снижения инструментальной ошибки должны быть выполнены следующие условия: сужение падающего радиоволнового пучка, обеспечение большей направленности приемной антенны при возможно меньшей площади раскрыва, а также уменьшение длины датчиков и зазора между ними и контролируемым слоем. Реально достижимая относительная точность определения толщины геометрическим методом для сравнительно однородных диэлектрических сред лежит в пределах 3 ... 5 %.

Критерием оценки пригодности антенн для геометрического метода являются параметры: начальные размеры пучка, определяемые геометрическими размерами раскрыва; угол расходимости пучка; площадь поперечного сечения пучка на определенном расстоянии от раскрыва; форма распределения интенсивности в плоскости поперечного сечения.

Геометрический метод является абсолютным методом, позволяя контролировать толщину плоских слоев практически от нуля до значений, ограничиваемых заложенным в аппаратуре динамическим энергетическим диапазоном. Метод реализован в приборах, предназначенных для контроля толщины огнеупорных футеровок действующих стекловаренных печей.

Практически полученная точность определения толщины $\pm 10 \dots 15 \%$ объясняется существенными изменениями в структуре огнеупоров, что приводит, соответственно, к непостоянству показателя преломления n_2 . Геометрический метод позволяет также измерить толщину слоя, не зная показателя преломления, если задать разные углы падения θ_1 и θ_2 . В результате имеем

$$h = l_1 l_2 \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2}{l_1^2 \sin^2 2\theta_2 - l_2^2 \sin^2 2\theta_1}}$$

Амплитудно-фазовий метод

В амплитудно-фазовом методі використовується функціональна зв'язь між коефіцієнтом відбиття від діелектричного шару і його товщиною. Контроль зміни величини коефіцієнта відбиття, як правило, проводиться з допомогою введення додаткового опорного сигналу тієї ж довжини хвилі. Тому, використовуючи високочувствительні мостові СВЧ-схеми, здійснюють одночасний контроль модуля і фази коефіцієнта відбиття, несучих інформацію про зміну товщини шару.

В загальному вигляді амплитудно-фазовий метод є відносним. Вимірювання товщини може бути достовірним з високою чутливістю в межах лінійного ділянки осцилюючої кривої, а також при умові апріорного знання області вимірюваних товщин. Для усунення неоднозначності контролю застосовують наступні способи:

- неперервне вимірювання коефіцієнта відбиття і підрахунок кількості максимумів (мінімумів) результуючої інтерференційної кривої;
- використання двох робочих довжин хвиль, на одній з яких товщина визначається грубо, а на другій більш точно;
- застосування фазової модуляції корисного сигналу з метою визначення крутизни лінійного ділянки інтерференційної кривої.

Точність вимірювань амплитудно-фазовим методом може бути дуже високою, але не вище межі, обумовленої відносною величиною розкиду діелектричних властивостей матеріалу шару, вираженої через відношення $\Delta n_2/n_2$. Відносна похибка вимірювань товщини для достатньо однорідних діелектриків становить 1...3 %. Переходячи до абсолютних величин, це буде 50 ... 100 мкм на довжину хвилі 3 см і 20...30 мкм в восьмиміліметровому діапазоні. Амплитудно-фазовий метод реалізований в ряду СВЧ-товщиномірів: для контролю теплозахисних покриттів товщиною 2 ... 16 мм на металевих корпусах з похибкою $\pm 0,1$ мм на частоті 9,3 ГГц; для контролю різновисотності теплозахисного покриття на склопластикових корпусах; для контролю товщини скляних пліт при виробництві технічного скла.

Принцип дії приладів оснований на порівнянні в мостовій схемі (на подвійному хвильоводному трійнику) двох сигналів: опорного, створюваного зразковим плечем моста, і вимірюваного, пропорційного коефіцієнту відбиття від контролюваного діелектричного шару.

Прилади дають хороші результати при контролі товщини антикорозійних покриттів в заводських умовах нафтогазових сталевих труб великого діаметра.

При реализации амплитудно-фазового метода наибольшее распространение получили схемы с двойным Т-образным волноводным тройником. Основной принцип получения информации заключается в следующем. В одно из Н-плеч тройника поступает энергия СВЧ, которая делится пополам между измерительным и опорным плечами. В измерительное плечо подключается приемно-передающая антенна, а в опорное переменный аттенуатор и короткозамыкающий поршень для регулировки амплитуды и фазы опорной волны. Волны, отраженные от конца опорного плеча и объекта контроля, взаимодействуют в плече Е, в результате чего происходит их сравнение по амплитуде и фазе. При номинальной измеряемой толщине h проводят балансировку прибора таким образом, чтобы в плече Е сигнал отсутствовал. Отклонение толщины от номинала приводит к разбалансу схемы и появлению сигнала, пропорционального изменению толщины.

Амплитудно-фазовый метод при двухстороннем расположении антенн

Амплитудно-фазовый метод широко применяют для бесконтактного автоматизированного контроля толщины металлических лент, полос, проката при двухстороннем расположении антенн датчика относительно объекта контроля (рис. 2).

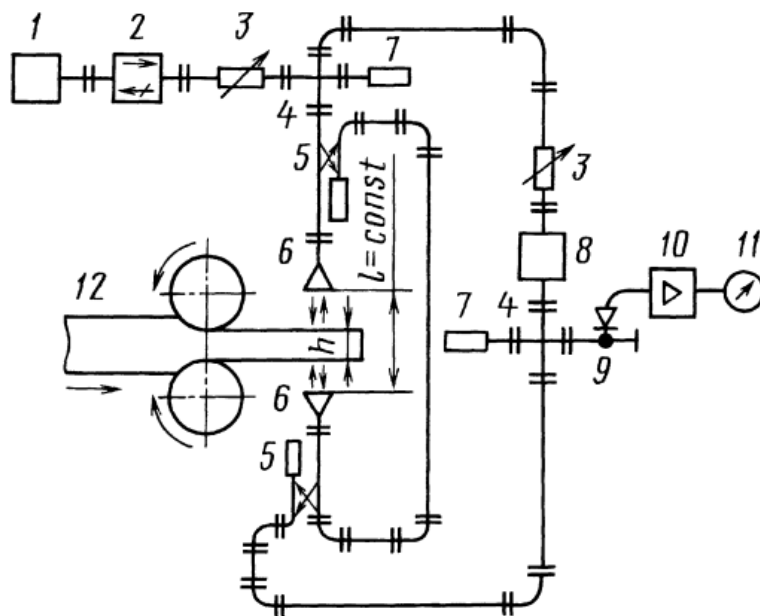


Рис. 2. Схема контроля толщины металлического листа:

- 1 – генератор; 2 – вентиль; 3 – аттенуатор; 4 – двойной тройник;
 5 – направленный ответвитель; 6 – приемно-передающая антенна;
 7 – нагрузка; 8 – фазовращатель; 9 – детекторная секция; 10 – усилитель;
 11 – индикатор; 12 – прокатываемый металлический лист

Волна от СВЧ-генератора проходит одинаковый путь при номинальной толщине листа до схемы сравнения с опорным сигналом той же длины волны. В таком устройстве проявляются все преимущества СВЧ-метода: одинаковая точность при измерении листов различной толщины; не влияет состав или изменения свойств металла; за счет бесконтактности процесса контроля могут подвергаться испытаниям листы, нагретые до высокой температуры; применение широких пучков устраняет влияние неровностей поверхности листа.

Применение рупорно-линзовых антенн позволяет получить высокие значения коэффициента стоячей волны $K_{СВ} = 120$ и обеспечить точность до 1 % в диапазоне длин волн 3,2 ... 10 см при поперечных перемещениях листа до $\lambda_0/6$.

Контроль толщины тонких металлических покрытий на прохождение

В последнее время микроволновой метод стали применять для контроля толщины тонких металлических покрытий на прохождение, используя значительную крутизну затухания СВЧ-радиоволн в тонких металлических пленках. Практически амплитудно-фазовый метод становится чисто амплитудным. Известно, что для большинства металлов глубина проникновения микроволн (глубина скин-слоя) составляет в среднем 0,5 мкм (500 нм). Поэтому толщину сверхтонких металлических слоев и покрытий до 500 нм можно контролировать проходным микроволновым методом с высокими точностью и чувствительностью. Так, фирмой "Электрофизик" (ФРГ) разработан толщиномер "Электротест Т" с цифровой индикацией для измерения покрытий из серебра на зеркальных стеклах, покрытий из алюминия на конденсаторной фольге, видеоплагинках и цифровых звуковых пластинках. Диапазон измерения толщин от 5 до 250 нм с погрешностью ± 3 %. Рабочая длина волны прибора около 1 см. Для расширения диапазона измеряемых толщин необходимо увеличивать рабочую длину волны, но точность при этом будет снижаться.

Частотно-фазовый метод

Данный метод, часто называемый методом переменной частоты, зародился в радиолокации и применяется в дальномерах и высотомерах, использующих частотную модуляцию несущего сигнала.

Метод реализуется при периодическом во времени изменении частоты СВЧ-генератора. Устройство (рис. 3б) содержит электрически перестраиваемый по частоте СВЧ-генератор, узел деления падающего и отраженного сигнала (симметричный направленный ответвитель), узел

обработки отраженного сигнала совместно с опорным сигналом, приемно-передающую антенну и индикатор.

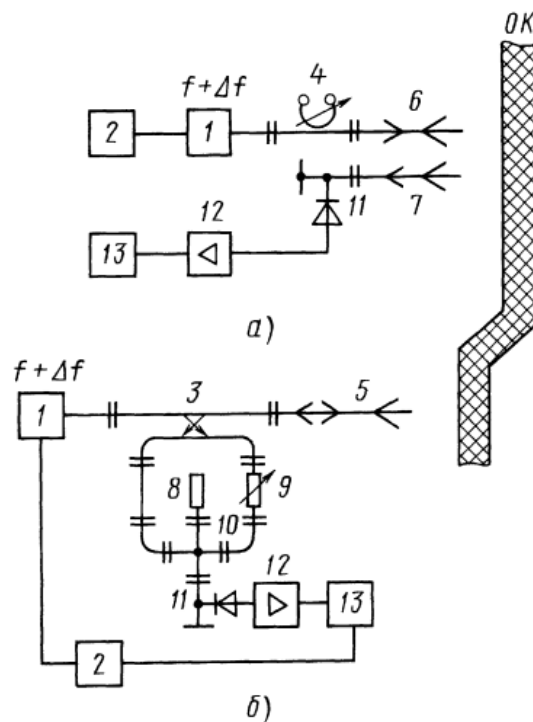


Рис. 3. Частотно-фазовый метод в двухантенном (а) и одноантенном (б) вариантах:

- 1 – перестраиваемый СВЧ-генератор; 2 – модулятор; 3 симметричный направленный ответвитель; 4 – волномер; 5 – приемнопередающая антенна;
- 6 – передающая антенна; 7 – приемная антенна; 8 – нагрузка; 9 – аттенюатор;
- 10 – двойной тройник; 11– детекторная секция; 12 – усилитель;
- 13 – индикатор

При перестройке частоты СВЧ-генератора зависимость результирующего сигнала будет осциллирующей и значение искомой толщины определяется как

$$h = \frac{NG \cdot c}{\sqrt{\epsilon_2} (f_2 - f_1)},$$

где G – период осцилляции; N – число периодов (пикув); f_1, f_2 – крайние значения частоты перестройки; c – скорость света.

Метод переменной частоты может быть реализован и при двухантенной схеме (рис. 3а). Если изменять частоту СВЧ-генератора и регистрировать разность частот, соответствующую ближайшим экстремальным значениям

отраженного от диэлектрического слоя сигнала, то можно определить толщину материала:

$$h = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_2} \cdot \Delta f}.$$

Частотно-фазовый метод позволяет производить абсолютные измерения толщины диэлектрических сред способом на отражение в широком интервале изменений толщины с погрешностью 3 ... 6 %. Следует отметить, что ошибка измерения в значительной степени определяется точностью измерения частоты. Метод используют в толщиномерах строительных конструкций, ледового покрова и т.п.

В наиболее распространенных методах толщинометрии выходной сигнал, используемый для градуировки индикаторного прибора в значениях толщины, представляет функцию двух переменных: толщины и диэлектрической проницаемости материала ОК.

Один из приборов, реализующих данный метод, имеет следующие основные технические характеристики:

| | |
|--|---------------------|
| Число контролируемых слоев диэлектрических структур | 1...3 |
| Минимальная толщина одного слоя, мм | 30 |
| Максимальная толщина структуры, мм | 750 |
| Диапазон значений контролируемых диэлектрических проницаемостей слоев, отн. ед | 2,0...20,0 |
| Минимально необходимое отношение диэлектрических проницаемостей соседних слоев | 1,2 |
| Локальность контроля, мм ² | 100 x 100 |
| Погрешность определения значений толщин слоев и расстояния до передней грани образца, мм | 2 |
| Уровень излучения СВЧ-мощности не превышает, Вт | 5 x 10 ³ |
| Время измерения, мин | 5 |

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Перечислите три основных варианта расположения датчиков относительно объекта контроля в радиоволновом виде НК?
2. Какие три основных источника погрешности в геометрическом радиоволновом методе измерения толщины покрытия?
3. Какова достижимая точность измерения толщины покрытия геометрическим радиоволновым методом?
4. Можно ли измерить толщину слоя покрытия геометрическим радиоволновым методом, если не известен показатель преломления материала?
5. Какая функциональная связь используется в амплитудно-фазовом радиоволновом методе толщинометрии?
6. При каких условиях возможно провести точное измерение толщины слоя амплитудно-фазовым радиоволновым методом?
7. Каков принцип действия приборов, реализующих амплитудно-фазовый радиоволновой метод толщинометрии?
8. В чем состоят преимущества амплитудно-фазового радиоволнового метода толщинометрии, в котором используется двустороннее расположение антенн?
9. В каком случае можно применять радиоволновой метод на прохождение для измерения толщины слоя из металла?
10. Какие устройства входят в состав аппаратуры, реализующей фазово-частотный радиоволновой метод толщинометрии?
11. При использовании фазово-частотного метода какой параметр радиоволнового излучения оказывается обратно пропорционален толщине слоя?

Уровень курса

1. Классификация методов и основные области применения радиоволнового контроля.
2. Физические основы геометрической радиоволновой толщинометрии.
3. Физические основы амплитудно-фазовой радиоволновой толщинометрии.
4. Физические основы частотно-фазовой радиоволновой толщинометрии.

ЛЕКЦИЯ № 12

Тема: Радиоволновой вид неразрушающего контроля. Физические основы дефектоскопии.

Оглавление

| | |
|---|---|
| СВЧ–дефектоскопия и структуроскопия | 2 |
| Дефектоскопы на прохождение..... | 3 |
| Дефектоскопы на отражение | 5 |
| Структуроскопы | 7 |
| Радиоинтроскопы | 7 |
| Контроль физико-механических и технологических параметров | 7 |
| Контрольные вопросы по теме | 8 |
| Уровень модуля..... | 8 |
| Уровень курса..... | 8 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 3: Радиоволновой контроль. /В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.: ил.
3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

СВЧ–дефектоскопия и структуроскопия

Структурные неоднородности и дефекты

Изделия и конструкции из диэлектриков и полупроводниковых материалов могут иметь в себе дефекты следующих типов:

- нарушения сплошности (расслоения, отслоения, непрочности, раковины, воздушные включения, трещины и т.п.);
- инородные включения (металлические и диэлектрические с отличными от основного материала диэлектрическими свойствами), имеющие разнообразные формы и размеры;
- структурные неоднородности (изменения плотности и пористости, отсутствие или недостаток связующего, неравномерное распределение вещества – неомогенность состава или смеси, технологические или эксплуатационные проявления анизотропии и т.д.).

С другой стороны, все дефекты разделяют на локальные (соизмеримые и меньше длины волны) и протяженные (больше длины волны). Классическим примером локального дефекта является воздушный пузырь в диэлектрической стенке, протяженного – расслоение с размерами в несколько длин волн.

Неоднородности любого типа вызывают деформацию полей волн, прошедших через материал или отраженных от него. При этом меняются амплитуда, фаза, поляризация волн, коэффициенты отражения, преломления. Структурные элементы обнаруживают также, используя явление рассеяния, дифракции и интерференции. Если размеры неоднородностей невелики по сравнению с рабочей длиной волны, то основную роль при их обнаружении играют рассеяние и дифракция. Чувствительность дефектоскопа определяется прежде всего рабочей длиной волны. Теоретически, чем короче длина волны, тем вероятнее надежное выявление более мелких структурных элементов. Однако практически выбор рабочей длины волны определяется не только этим, но и другими факторами: при укорочении волны возрастают поглощение (рассеяние) в среде и относительная допустимая неоднородность материала. Поэтому оптимальную рабочую длину волны находят теоретически и экспериментально. Чувствительность также зависит от выбранного метода и схемы прибора, реализующего метод, от типа и размеров антенн и т.д.

Для априорной оценки возможности выявления конкретных дефектов в средах с известными свойствами, как правило, производится математическое моделирование процесса взаимодействия СВЧ–излучения со средой. При этом радиодефектоскоп, контролируемое изделие, окружающая среда рассматриваются как единая система. Составляя математическую модель системы, необходимо учитывать свойства среды и материала изделия, их

изменчивость и распределение в трех измерениях, характер и свойства дефекта.

Протяженный дефект (например, расслоение) рассматривается как появление в системе дополнительного промежуточного слоя с отличными от основной среды свойствами. В этом случае задача обнаружения дефекта решается путем нахождения модуля и фазы коэффициента отражения или прохождения для системы с $(n + 1)$ слоем. Если электрофизические параметры дефекта мало отличаются от свойств среды и размер в направлении распространения волны также мал, то такой дефект практически будет чисто фазовым и определяющую роль в его обнаружении будет играть измерение изменения фазы.

Локальный дефект рассматривается, как правило, в качестве источника рассеяния и дифракции, рассеивающие свойства которого характеризуются эффективной поверхностью рассеяния.

Заключение о наличии дефекта в объекте контроля выносится по пороговой величине изменения интенсивности принимаемого результирующего сигнала.

Дефектоскопы на прохождение

В этом случае внутреннее состояние объекта контроля определяется по воздействию среды на сигнал, прошедший через образец.

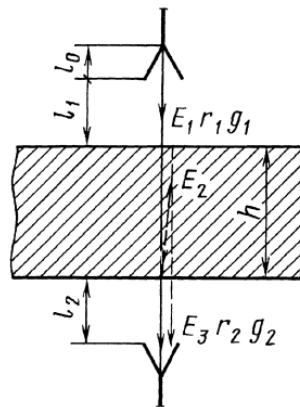


Рис. 16.1

Принципиальная схема образования сигнала в схеме "на прохождение"

l_0 – длина рупора; l_1 – расстояние от края излучающего рупора до первой поверхности; l_2 – расстояние от второй поверхности до приемного рупора; h – толщина контролируемого изделия; $r_{1,2}$ – коэффициент отражения от первой и второй границ; $g_{1,2}$ – коэффициент прозрачности первой и второй границ; E_1 – излученная волна; E_2 – волна в образце; E_3 – принимаемая волна

Принципиальная схема метода приведена на рис. 16.1. Основой метода является наличие двух антенн (приемной и излучающей), находящихся по разные стороны объекта контроля и, как правило, соосных между собой.

В основном существуют две принципиальные блок-схемы приборов, в которых применен метод "на прохождение" (рис. 16.2).

Принцип работы схемы, в которой все элементы обозначены сплошной линией, заключается в следующем. Энергия СВЧ от генератора 2 подается через вентиль 3, волновод и аттенюатор 4 к излучающей антенне 5. Энергия проходит через образец 10, принимается приемной антенной 6 и через измерительный аттенюатор 4 попадает на детектор 7, после чего сигнал усиливается и подается на индикаторный прибор 8. Такая схема позволяет проводить контроль свойств материала по величине затухания энергии СВЧ в образце, отсчитываемой по шкале аттенюатора, с помощью которой величина сигнала индикаторного устройства прибора поддерживается на постоянном уровне.

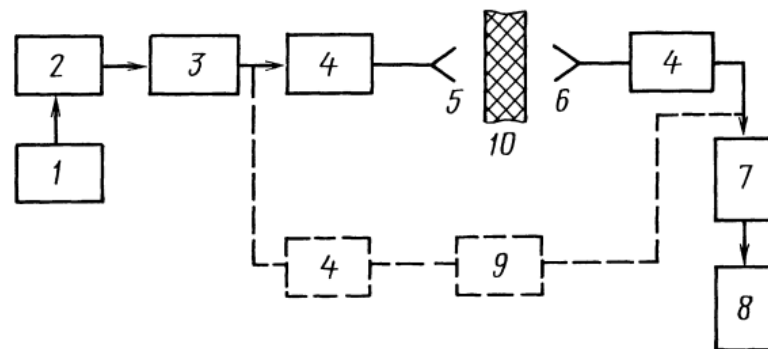


Рис. 16.2. Блок-схема амплитудно-фазовых приборов, работающих по схеме "на прохождение":

- 1 – блок питания; 2 – источник энергии СВЧ; 3 – развязывающий элемент (ферритовый вентиль); 4 – аттенюатор; 5 – излучающая антенна; 6 – приемная антенна; 7 – детектор; 8 – блок обработки информации; 9 – фазовращатель; 10 – объект контроля

Кроме амплитудного, фазового и амплитудно-фазового методов в режиме на прохождение широко используют геометрический и поляризационный методы. В **поляризационном методе** поляризации антенн, расположенных соосно с обеих сторон объекта контроля, ортогональны. Поэтому в отсутствие дефекта сигнал минимален (теоретически равен нулю), а при появлении дефекта, деполяризующего линейно поляризованное излучение, сигнал возрастает.

Дефектоскопы на отражение

Для контроля объектов способом на отражение в настоящее время используют ряд методов: амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовой, поляризационный, геометрический и поверхностных волн.

Схемы многих дефектоскопов построены на основе двойного волноводного тройника в качестве моста СВЧ (рис. 16.3а). Если симметричные плечи тройника имеют одинаковую нагрузку, то отраженные волны СВЧ не проходят в выходное плечо тройника, мост согласован, а сигнал на выходе детекторной секции равен нулю.

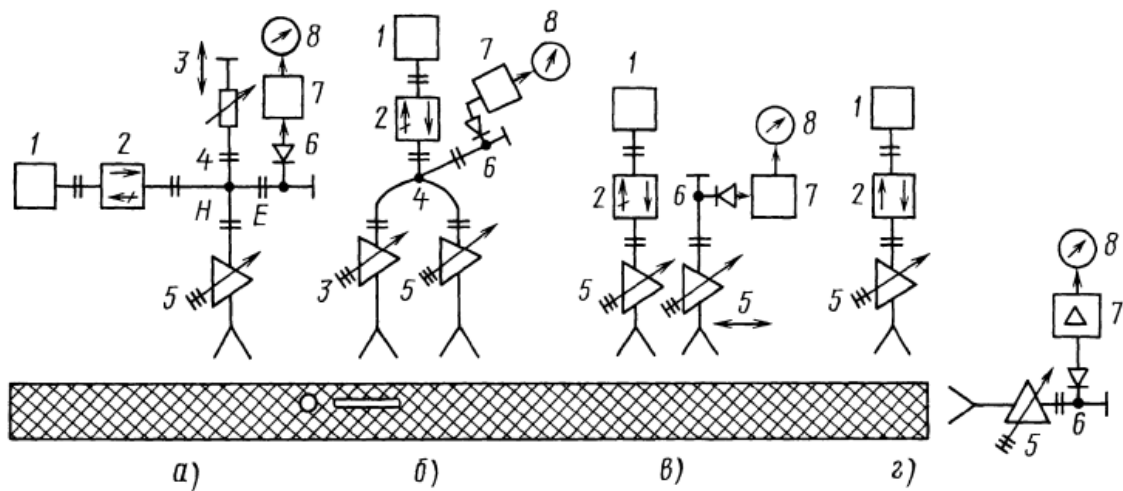


Рис. 16.3. Типичные схемы (а, б, в, г) амплитудно-фазовых дефектоскопов (режим работы на отражение):

- 1 – генератор; 2 – вентиль; 3 – опорное плечо; 4 – двойной тройник;
5 – антенна; 6 – детекторная секция; 7 – усилитель; 8 – индикатор

Баланс моста, как правило, устанавливают изменением положений перестраиваемых элементов опорного плеча при постоянных значениях рабочего зазора и толщины объекта на эталонном изделии или бездефектном его участке. Достоинством таких дефектоскопов является наглядность показаний и легкая их расшифровка, так как всем участкам контролируемого изделия, характеристики которых значительно отличаются от характеристик эталонного образца, соответствуют высокие значения выходного сигнала. Одноканальные (одноантенные) амплитудно-фазовые дефектоскопы могут обнаружить разные типы дефектов: от локальных до протяженных и равномерно распределенных, проявляющихся в изменении средних значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. Основными мешающими факторами являются переменная толщина контролируемых изделий и изменение рабочего зазора. Если зазор можно стабилизировать, то

изменение толщины при дефектоскопии выше описанным способом является неустраняемым мешающим фактором, приводящим к снижению надежности результатов контроля.

Схема дефектоскопа на рис.16.3б лишена указанного недостатка. Она отличается от предыдущей тем, что в ней опорное плечо из управляемых аттенюаторов и короткозамыкателя заменено второй антенной. Симметричные плечи двойного волноводного тройника повернуты в одну сторону так, что антенны параллельны и направлены в сторону контролируемого объекта. Оба плеча тройника являются рабочими. Выявление неоднородностей производится путем сравнения коэффициента отражения от двух участков объекта, находящихся под антеннами. Если электрическая длина рабочих плеч одинакова, то схема является самобалансирующей и не реагирует на изменения зазора, толщины и диэлектрических свойств контролируемого слоя, если эти изменения происходят одновременно и одинаково под обеими антеннами. Любое изменение параметров слоя под одной из антенн по сравнению с параметрами слоя, находящегося под другой антенной, приводит к нарушению баланса моста и появлению сигнала на выходе детекторной секции. Недостатком такой схемы является то, что она фиксирует только границы протяженных неоднородностей, не дает информации об изменении свойств изделия в целом, а также результат зависит от перекоса датчика, приводящего к разнице

На рис. 16.3в приведен упрощенный вариант схемы амплитудно-фазового дефектоскопа с двумя антеннами, расположенными рядом, одна из которых передающая, другая приемная. Опорным здесь служит сигнал связи между антеннами, который может регулироваться путем изменения их относительного положения. Вследствие воздействия большого фона, создаваемого отражением волн от бездефектного участка ОК, чувствительность схемы к дефектам меньше, чем в предыдущих вариантах. Этот фон можно уменьшить, поворачивая приемную антенну вокруг оптической оси на 90° , что соответствует случаю скрещенных поляризаций приемной и передающей антенн. В этом случае чувствительность схемы максимальна только к таким неоднородностям и дефектам, при отражении от которых происходит максимальный (до 90°) поворот плоскости поляризации первоначально линейно поляризованных волн схема становится поляризационно чувствительной.

На рис. 16.3г приведен вариант схемы амплитудно-фазового дефектоскопа, являющегося амплитудным дефектоскопом при пространственном разнесении и расположении антенн таким образом, что приемная антенна реагирует только на рассеянную дефектом волну. Контроль

оптимален при дефектоскопии объектов с размерами, соизмеримыми в трех измерениях: кубов, параллелепипедов и т.д.

Структуроскопы

По стандартному определению термин "радиоволновой структуроскоп" означает прибор радиоволнового неразрушающего контроля для качественного определения параметров объекта, характеризующих его структуру. С точки зрения материаловедения все материалы имеют вполне определенную структуру: кристаллическую, аморфную, полиаморфную, армированную, изотропную, анизотропную и т.п. Таким образом, качественные показатели материалов определяются не только отсутствием традиционных локальных дефектов, но и получением заданной структуры, часто для композиционных материалов называемой текстурой.

Однозначная связь между диэлектрической и другими видами анизотропии позволяет контролировать их с помощью электромагнитных волн, используя поляризованные волны и радиополяризационный метод.

Радиоинтроскопы

Радиоинтроскопом называют любое радиоволновое устройство с визуализацией скрытого радиоизображения объекта контроля или многоэлементной обработкой информации на основе ЭВМ.

Одной из форм получения информации об объекте контроля является представление сигналов в виде яркостного светового изображения. Оно может быть получено на экране осциллографа, на фотохимической бумаге, фотобумаге, фотопленке, телевизионном экране, мониторе ЭВМ.

Контроль физико-механических и технологических параметров

Радиоволновой метод позволяет производить контроль следующих физико-механических и технологических параметров:

- Измерение диэлектрических характеристик материалов
- Контроль плотности
- Контроль влажности
- Контроль вязкости, отвердевания, вулканизации, гомогенности и т.п.
- Контроль давления, усилия, деформации
- Контроль динамических процессов: смещения, уровня, скорости, ускорения, вибрации.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Какие параметры радиоволны меняются при ее прохождении через материал, имеющий неоднородности?
2. Какие явления используются для обнаружения радиоволновым видом НК структурных элементов внутри диэлектрического материала?
3. Как определяется внутреннее состояние объекта контроля в радиоволновых дефектоскопах на прохождение?
4. Какие радиоволновые методы применяются в дефектоскопии на прохождение?
5. Какие радиоволновые методы применяются в дефектоскопии на отражение?
6. Какие факторы являются мешающими при радиоволновой дефектоскопии на отражение?
7. В чем состоят достоинства радиоволновых дефектоскопов на отражение?
8. При пространственном разнесении и расположении антенн под прямым углом какую волну улавливает приемная антенна?
9. Используют ли радиоволновой вид НК для исследования структуры материала?
10. Что называется радиоинтроскопом?
11. Контроль каких физико-механических и технологических параметров можно проводить радиоволновым методом?

Уровень курса

1. Физические основы радиоволновой дефектоскопии на прохождение.
2. Физические основы радиоволновой дефектоскопии на отражение.

Лекція № 13

Тема: Физические основы теплового вида неразрушающего контроля

Оглавление

| | |
|---|---|
| Физические явления в основе теплового неразрушающего контроля | 2 |
| Способы проведения активного теплового контроля | 3 |
| Физические основы теплового излучения..... | 6 |
| Контрольные вопросы по теме | 8 |
| Уровень модуля..... | 8 |
| Уровень курса..... | 9 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль. / К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.Н. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий. - М.: Машиностроение, 2004. - 679 с.: ил. и цветная вкладка 24 с.
3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

Физические явления в основе теплового неразрушающего контроля

В тепловом неразрушающем контроле (ТНК) используется тепловая энергия, распространяющаяся в объекте контроля. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от наличия внутренних или наружных дефектов. Под дефектом при этом понимается наличие скрытых раковин, полостей, трещин, непроваров, инородных включений и т.д., всевозможных отклонений физических свойств объекта контроля ОК от нормы, наличия мест локального перегрева (охлаждения) и т.п. Различают пассивный и активный ТНК. При пассивном ТНК анализ тепловых полей изделий производят регистрацией их собственного теплового излучения. Активный ТНК предполагает нагрев объекта внешним источником энергии.

Основной характеристикой температурного поля, являющейся индикатором дефектности, служит величина локального температурного перепада. Координаты места перепада, его рельеф или, иными словами, топология температурного поля и его величина в градусах являются функцией большого количества факторов. Эти факторы можно подразделить на внутренние и внешние. Внутренние факторы определяются теплофизическими свойствами контролируемого объекта и дефекта, а также их геометрическими параметрами. Эти же факторы определяют временные параметры процесса теплопередачи, в основном, процесса развития температурного перепада. Внешними факторами являются характеристики процесса теплообмена на поверхности объекта контроля (чаще всего величина коэффициента конвективной теплоотдачи), мощность источника нагрева и скорость его перемещения вдоль объекта контроля.

Основным информационным параметром при ТНК является локальная разность температур между дефектной T_A и бездефектной T_B областями объекта $\Delta T = T_A - T_B$. Знак перепада зависит от соотношения теплофизических свойств дефекта и изделия и исследуемой поверхности. При нагреве изделий, содержащих дефекты, плохо проводящие тепло (типа газовых включений), перепад положителен для поверхности, подвергнутой нагреву (т.е. место дефекта характеризуется локальным повышением температуры), и отрицателен для противоположной стороны. В случае дефекта, проводящего тепло лучше основного изделия (металлические включения), знак перепада изменяется на обратный.

Временной ход перепада характеризуется кривой с максимумом. Это заставляет в каждом конкретном случае оптимальным образом выбирать

момент регистрации температурного перепада t_m . Величина t_m зависит от тепло- и температуропроводности изделия и дефекта и глубины залегания дефекта l . Момент наступления максимального перепада и глубина залегания дефекта обычно связаны линейной зависимостью, причем угол наклона соответствующей прямой зависит от теплофизических свойств изделия и дефекта. Чем более теплопроводно изделие, тем меньше величина t_m . В зависимости от типа материала и глубины залегания дефекта величина t_m для металлов колеблется от долей секунд до десятков секунд, для неметаллов она может составлять десятки минут. Увеличение мощности нагревателя и уменьшение интенсивности теплообмена приводит к росту уровня нагрева изделия и лучшему выявлению дефектов.

Способы проведения активного теплового контроля

Существуют следующие способы активного теплового контроля изделий:

1. Кратковременный локальный нагрев изделия с последующей регистрацией температуры той же (при одностороннем контроле) или противоположной области (при двустороннем контроле). По истечении некоторого времени (чтобы изделие успело остыть) переходят к следующей точке и т.д. Так будет пройдена вся поверхность изделия, причем измеренная температура дефектных областей будет существенно отличаться от температуры бездефектных участков.

2. С использованием сканирующей системы, состоящей из жестко закрепленных друг относительно друга источника нагрева и регистрирующего прибора (например, радиометра), перемещающихся с постоянной скоростью вдоль поверхности образца.

3. Одновременный нагрев поверхности образца вдоль некоторой линии с последующей регистрацией температуры вдоль этой же линии (при одновременном контроле) или вдоль аналогичной линии с противоположной поверхности образца (при двустороннем контроле).

4. Одновременный нагрев всей поверхности образца и последующая одновременная регистрация температурного распределения на этой же или на противоположной поверхности. Подобный способ контроля может быть осуществлен при помощи тепловизора.

Эффективность выявления дефектов каждым из описанных способов теплового контроля уменьшается от первого к четвертому, а производительность возрастает. Области применения ТНК приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Области применения активного ТНК

| Область | Способ, объекты контроля, выявляемые дефекты |
|------------------------------|--|
| Авиакосмическая индустрия | ИК-влажнометрия; дефекты структуры композитов, готовых панелей, клеевых соединений, защитных покрытий |
| Микроэлектроника | Лазерный контроль пайки, сварки: ИК-томография полупроводников, БИС; дефекты теплоотводов. |
| Машиностроение | Дефектоскопия антикоррозионных покрытий, обнаружение мест подповерхностного расслоения композитных структур |
| Лазерная техника | Контроль термонапряжений в лазерных кристаллах, ТФК квантронов, световой прочности элементов силовой оптики |
| Материаловедение | Тепловая диагностика напряженного состояния объектов на основе термоэластического эффекта, контроль ТФК конструкционных материалов |
| Строительство | Контроль теплопроводности строительных материалов, защитных ограждений, обнаружение пустот, промоин и т.д. |
| Нефтехимия | Термографический контроль уровня жидкостей в резервуарах |
| Атомная энергетика | Тепловая дефектоскопия ТВЭЛ, анализ пористости материалов, контроль напряженного состояния металла |
| Автомобильная промышленность | Тепловая дефектоскопия шин, покрытий, упрочняющих покрытий, качества закалки и термоупрочнения |
| Энергетика | Тепловизионный контроль статоров, защитных покрытий, термоизоляции |
| Агрокомплекс | Контроль ТФК продуктов, дефектоскопия деталей с/х техники |

Таблица 2

Области применения пассивного ТНК

| Область | Способ, объекты контроля, выявляемые дефекты |
|---------------------------|--|
| Энергетика | Тепловая диагностика турбин, дымовых труб, энергоагрегатов, контактных сетей, теплоизоляции |
| Нефтехимия | Тепловизионный контроль реакторных колонн и энергоагрегатов, обнаружение утечек из продуктопроводов |
| Машиностроение | Контроль тепловых режимов машин, механизмов, обнаружение аварийной пожароопасных мест на энергонасыщенных промышленных объектах |
| Строительство | Обнаружение утечек тепла в зданиях, тепловизионный контроль качества кровли, ограждающих конструкций |
| Экологический мониторинг | Дистанционный контроль утечек тепла, загрязнений на водных поверхностях, выявление тепловых аномалий, обнаружение пустот, промоин и т.д. |
| Металлургия | Пирометрический контроль температуры расплавов, тепловизионная диагностика футеровки, контроль горячего проката |
| Транспорт | Обнаружение перегрева букс, дефектов контактных сетей, изоляторов, тепловая диагностика электрооборудования подвижного состава |
| Авиация | Световая пирометрия лопаток ТТД, аэродинамический эксперимент, контроль теплового режима бортовых РЭА |
| Цементная промышленность | Контроль равномерности нагрева печей, их режимов |
| Агрокомплекс | Контроль тепловых режимов теплиц и ферм, состояния животных, температуры зерна в элеваторах |
| Электроника | Тепловая диагностика РЭА, БИС, температурный контроль технологических процессов |
| Лазерная техника | Анализ тепловых режимов активных элементов мощных лазеров |
| Термоядерная энергетика | Тепловая диагностика плазмы, ИК-томография |
| Медицина, здравоохранение | Термодиагностика сосудистых заболеваний, онкологии, кожных болезней и др. |

Физические основы теплового излучения

Бесконтактные методы теплового контроля основаны на использовании инфракрасного излучения, испускаемого всеми нагретыми телами. Инфракрасное излучение занимает широкий диапазон длин волн от 0,76 до 1000 мкм. На практике в ТНК преимущественно используются два спектральных диапазона 3 ... 5 и 8 ... 14 мкм, совпадающие с окнами максимальной прозрачности атмосферы и являющиеся наиболее информативными. Спектр, мощность и пространственные характеристики этого излучения зависят от температуры тела и его излучательной способности, обусловленной, в основном, его материалом и микроструктурными характеристиками излучающей поверхности. Например, шероховатые поверхности излучают сильнее, чем зеркальные. При повышении температуры мощность излучения быстро растет, а ее максимум сдвигается в область более коротких длин волн. Эта закономерность характеризуется законом смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T_k} \text{ [мкм]}$$

Следовательно, объект (в том числе и кожный покров человека) с температурой около 300 К (30 °С) имеет максимум излучения на длине волны 10 мкм, солнце при $T_{\text{эфф}} = 6000^\circ\text{C} - 0,5 \text{ мкм}$, а жидкий азот с $T_{\text{кип}} = 77\text{K} - 38 \text{ мкм}$. Спектр излучения может быть непрерывным или дискретным.

Характер спектра зависит, в основном, от агрегатного состояния вещества. Для твердых и жидких тел, как правило, характерны непрерывные спектры излучения, а для газообразных линейчатые, которые при больших давлениях или больших толщинах чаще переходят в непрерывный.

Для характеристики теплового излучения удобным оказалось понятие абсолютного черного тела (АЧТ), т.е. тела, поглощающего все падающее на него излучение. Излучение АЧТ описывается аналитически, оно является функцией только его температуры. Физической моделью АЧТ может служить замкнутая полость с отверстием, значительно меньшим ее габаритов.

Законы изучения АЧТ могут применяться с известной поправкой для большинства реальных тел, что определяет их значение.

Суммарную плотность потока излучения АЧТ в зависимости от его температуры определяет закон Стефана Больцмана:

$$R(T) = \sigma T^4, \quad \text{Вт/м}^2$$

где $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4)$ – постоянная Стефана Больцмана.

Для реальных тел законы излучения АЧТ применимы только в первом приближении. Их излучение может отличаться от излучения АЧТ при той же температуре как спектральным составом, так и интенсивностью. Тела, излучение которых имеет тот же спектр, что и излучение АЧТ при данной температуре, и отличается от него только интенсивностью, называются серыми.

Для оценки излучательной способности реальных (серых) тел вводят понятие коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda, T) \leq 1.0$. Для АЧТ и серых тел $\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$, т.е., коэффициент излучения равен коэффициенту поглощения реального тела.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Что является источником информации о наличии дефекта при проведении НК теплового вида.
2. Чем отличается пассивный тепловой неразрушающий контроль (ТНК) от активного?
3. Какая характеристика температурного поля является основным индикатором дефектности?
4. Какие внутренние факторы определяют топологию температурного поля?
5. Какие внешние факторы определяют топологию температурного поля?
6. Какой параметр принимается в качестве информационного при проведении ТНК?
7. При нагреве изделий, содержащих дефекты, плохо проводящие тепло (типа газовых включений), место дефекта со стороны нагрева характеризуется локальным повышением или локальным понижением температуры?
8. При нагреве изделий, содержащих дефекты, проводящего тепло лучше основного изделия (металлические вкрапления), место дефекта с противоположной от нагрева стороны характеризуется локальным повышением или локальным понижением температуры?
9. Момент наступления максимального перепада температур между дефектной и бездефектной областями связан с глубиной залегания дефекта линейной зависимостью, квадратичной зависимостью или кубической зависимостью?
10. Каким образом зависит выявление дефектов от изменения мощности нагревателя?
11. Перечислите существующие способы активного теплового контроля изделий.
12. Укажите диапазон длин волн инфракрасного излучения.
13. Укажите диапазоны длин волн максимальной прозрачности атмосферы для инфракрасного излучения.
14. Шероховатые поверхности излучают сильнее или слабее, чем зеркальные?
15. Запишите формулу, выражающую закон смещения Вина?
16. Как различаются спектры излучения твердых, жидких и газообразных тел?
17. Запишите формулу, выражающую закон Стефана Больцмана.

18. Какое тело называется абсолютно черным?
19. При изучении излучения тел какие тела называются серыми?
20. Для приведения излучательной способности реальных тел к излучению абсолютно черного тела вводят специальный коэффициент. Как он называется?

Уровень курса

1. Физические явления, используемые для выполнения теплового неразрушающего контроля.
2. Физические основы теплового излучения.

Лекція № 14

Тема: Принцип действия средств измерения и контроля температуры**Оглавление**

| | |
|---|---|
| Физические основы измерения температуры | 2 |
| Средства контроля температуры | 2 |
| Термометры | 2 |
| Бесконтактные дистанционные измерители температуры – пирометры | 4 |
| Тепловизионная аппаратура | 6 |
| Контрольные вопросы по теме | 8 |
| Уровень модуля | 8 |
| Уровень курса | 8 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль. / К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.Н. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий. - М.: Машиностроение, 2004. - 679 с.: ил. и цветная вкладка 24 с.
3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

Физические основы измерения температуры

Практика неразрушающих испытаний привела к необходимости точного количественного описания энергетического состояния контролируемых объектов, естественной мерой которого является их температура.

В распространеннейшей шкале Цельсия в качестве опорных точек приняты температура замерзания (0°C) и кипения (100°C) воды. Рабочими веществами в этой шкале служат спирт или ртуть.

Если начало отсчета установлено от абсолютного нуля температур, то получаем абсолютную термодинамическую шкалу, единицей которой служит градус К. Значения температур по этим шкалам соотносятся $T = t + 273,15 \text{ К}$. Одной из возможных реализаций термодинамической температурной шкалы являются показания газового термометра постоянного объема.

Средства контроля температуры

Термометры

Эти приборы можно разделить на жидкостные, манометрические термометры, термопары, термометры сопротивления, термоиндикаторы.

Действие **жидкостных термометров** основано на термическом расширении жидкости, заключенной в капилляре термометра.

Их выпускают в различных модификациях для температурного диапазона $0 \dots 500^{\circ}\text{C}$. Изготавливают также термометры специального назначения, например электроконтактные, используемые для регулирования технологических процессов, и максимальные (минимальные), предназначенные для регистрации максимальной (минимальной) температуры в данный период.

Действие **манометрических термометров** основано на зависимости между температурой и давлением рабочего вещества (обычно газа), заключенного в замкнутом объеме.

Газовые манометрические термометры предназначены для измерения температур в пределах от -160 до $+600^{\circ}\text{C}$. Рабочим веществом обычно является азот.

Конденсационные (парожидкостные) манометрические термометры работают в диапазоне от -60 до $+320^{\circ}\text{C}$. Рабочие вещества метилхлорид, спирт, этиловый эфир.

Жидкостные манометрические термометры используют для измерений температур в области от -160 до $+320^{\circ}\text{C}$ (ртутные от -25 до $+600^{\circ}\text{C}$). Рабочая жидкость ртуть, метаксиллол, силиконовые жидкости, металлы с низкой точкой плавления.

Действие **термометров сопротивления** основано на измерении электрического сопротивления вещества (металлов и их окислов, солей и т.д.) в зависимости от температуры.

Чувствительный элемент термометра сопротивления (обычно металлическая проволока) закреплен на каркасе из слюды или кварца и помещается в баллон для защиты датчика от окружающей среды. В зависимости от условий применения термометра баллон изготавливают из кварца, стекла, фарфора или металла.

Термометры сопротивления изготавливают из платины (ТСП), меди (ТСМ) или полупроводников. Рабочий интервал температур ТСП от -200 до $+650^{\circ}\text{C}$, ТСМ от -50 до $+180^{\circ}\text{C}$. Инерционность термометров сопротивления колеблется от 1 мин до 9 с.

Погрешность эталонных платиновых термометров сопротивления равна $\pm 0,0001^{\circ}\text{C}$ при 0°C и $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$ при $+100^{\circ}\text{C}$.

Наиболее чувствительными являются *полупроводниковые* термометры сопротивления. Их изготавливают в форме пластинок и сфер малого диаметра. Как правило, чувствительный элемент остеклован для защиты от влияния среды. По сравнению с ТСП и ТСМ их габариты существенно меньше ($d = 1...7$ мм, $l = 1...13$ мм).

Работа **термоэлектрических термометров** основана на термоэлектрическом эффекте, возникающем в термопаре. Термопарой или термоэлементом называют цепь из двух разнородных электрических проводников (термоэлектродов), концы которых соединены (сваркой, пайкой и т.п.). При наличии разности температур в местах соединения термоэлектродов в цепи генерируется термоЭДС.

Значение ЭДС зависит только от температуры спаев и материала термоэлектродов, но не зависит от диаметра и длины проводников и распределения температуры по их длине.

Если температура одного из концов термопары постоянная (например, он погружен в воду с тающим льдом или термостабилизирован другим способом), то ЭДС зависит только от температуры ее рабочего конца. Наиболее известные материалы термоэлектродов платина, железо, молибден, вольфрам, медь, магнанин, платинородии, хромель, копель, алюмель, константан. Конструктивное оформление термопар разнообразно и должно соответствовать условиям их эксплуатации. Часто рабочие концы помещают в защитные оболочки из фарфора или другого материала.

Различают термопары со стандартными и нестандартными градуировками.

К термопарам с нестандартными градуировками относятся медьконстантовые, вольфрамрениевые, вольфраммолибденовые и др. В основном их используют для специальных измерений, например, в диапазоне высоких температур (2500°С для термопар типа карбид титанаграфит).

Преимущества термоэлектрических термометров линейность в широком диапазоне температур, чувствительность и стабильность показаний, простота изготовления. Недостаток сравнительно большая постоянная времени (1 ...10с).

Применение микропроцессоров позволяет реализовать накопление и вызов максимальных и минимальных температур, вычислить скорость изменения температуры, коммутацию нескольких измерительных каналов, автокалибровку и т.д.

Волоконно-оптические термометры (ВОТ) выполняются из кварцевого моноволокна диаметром 0,2 ... 1 мм, длиной до 100 м, на торце которого, вводимого в контролируемый объем, располагается микрокапсула с веществом, изменяющим свои оптические свойства при нагреве (люминофор, жидкий кристалл, двупреломляющийся кристалл и т.д.). На другом конце располагаются источник света (обычно светодиод) и фотодиод для регистрации излучения, огражденного от капсулы термодатчика. Достоинство ВОТ – отсутствие гальванической связи с объектом, нечувствительность к электромагнитным помехам, нетоксичность, малые габариты, высокое быстродействие.

Действие **термоиндикаторов** основано на изменении агрегатного состояния, яркости и цвета свечения некоторых веществ при нагреве. С их помощью можно быстро и экономично получить информацию о тепловом режиме объекта. Преимуществом термоиндикаторов является возможность запоминания распределения температур в процессе испытаний, простота и наглядность, экономичность. К недостаткам термоиндикаторов следует отнести инерционность, сравнительно невысокую точность, необходимость нанесения на изделие специальных покрытий, сложность изучения динамических температурных режимов. Включение их в системы терморегулирования представляет значительные трудности.

Бесконтактные дистанционные измерители температуры – пирометры

Действие пирометров излучения основано на фотоэлектрической, визуальной и фотографической регистрации интенсивности теплового излучения нагретых тел, пропорционального их температуре. Пирометры обычно имеют объектив для фокусировки излучения на фотодетектор,

светофильтры и блок электронной обработки сигнала. При контроле температуры объектов в труднодоступных полостях применяют пирометры в сочетании с волоконно-оптическими световодами. Калибровка пирометров проводится по эталонным источникам [абсолютно черное тело (АЧТ), пирометрические лампы и т.д.].

Яркостными пирометрами измеряют спектральную яркость объекта на определенной длине волны, которая сравнивается с яркостью АЧТ. В качестве АЧТ используется спираль специальной лампы накаливания. Яркостные пирометры применяют для измерения высоких температур (св. 600°C), при которых тела начинают излучать в видимой области, а интенсивность излучения достаточна для его регистрации в узком спектральном диапазоне визуально или с помощью фотоприемников, фотодиода.

Цветовыми пирометрами измеряют интенсивность излучения объекта в двух узких зонах спектра, отношение которых сравнивается с соответствующим отношением для АЧТ. Показания цветковых пирометров не зависят от коэффициента излучения объектов.

Радиационные пирометры, работающие в широком спектральном диапазоне, наиболее часто используют для измерения температуры слабонагретых тел.

Применяют объективы из материалов, прозрачных в соответствующей спектральной области. Стекло используют для измерения температур от 900°C . Кварц применяют для регистрации температур более 400°C . Объективы из фтористого лития или фтористого бария позволяют фиксировать температуры в диапазоне $20 \dots 500^{\circ}\text{C}$. Часто используют также германиевую и зеркальную оптику.

Существенное влияние на показания радиационного пирометра оказывает состояние поверхности контролируемого объекта, поскольку оно связано с его излучательной способностью ϵ .

Современные модели пирометров, в том числе портативных автономных, снабжаются встроенным микропроцессором, реализующим запоминание максимальной, средней и минимальной температуры за время измерения, коррекцию излучательной способности, автокалибровку прибора и другие функции.

Для определения распределения температуры по поверхности объекта вдоль заданной линии развертки применяют радиационные пирометры с оптико-механической системой линейного сканирования – термопрофили.

Перед приемником могут быть установлены фильтры для исключения влияния отраженных от объектов солнечных лучей или подавления излучения объекта в диапазоне его прозрачности.

В схеме прибора предусмотрен эталонный температурный источник, уровень излучения которого поддерживается с высокой точностью. Таким образом, на детектор последовательно попадает ИК-излучение от объекта и опорного излучателя, относительная интенсивность которых сравнивается с помощью электронной схемы.

После усиления сигналы детектора, пропорциональные ИК-излучению объекта и эталонного излучения, подаются на кинескоп блока индикатора и воспроизводятся в виде яркой линии.

Быстродействие термопрофиля обычно 25 строк/с, чувствительность $0,1^{\circ}\text{C}$ (при $+20^{\circ}\text{C}$), пространственная разрешающая способность $10'$ при поле обзора до 80° .

Тепловизионная аппаратура

В основу принципа действия тепловизионных приборов положено двухмерное преобразование собственного теплового излучения от объектов и местности, или фона, в видимое изображение. Наличие в поле зрения регистрируемого теплового контраста позволяет визуализировать на мониторе полутоновые черно-белые, или адекватные им «псевдоцветные», тепловизионные изображения.

Тепловизионная техника обладает рядом достоинств и присущих только ей возможностей: обнаружение удаленных только теплоизлучающих объектов (или целей) независимо от уровня естественной освещенности, а также до определенной степени тепловых и других помех (дождя, тумана, снегопада, пыли, дыма и др.).

Как правило, тепловизоры строятся на основе специальных матричных датчиков температуры — болометров. Они представляют собой матрицу миниатюрных тонкопленочных терморезисторов. Инфракрасное излучение, собранное и сфокусированное на матрице объективом тепловизора, нагревает элементы матрицы в соответствии с распределением температуры наблюдаемого объекта. Пространственное разрешение коммерчески доступных болометрических матриц достигает 1280×720 точек. Коммерческие болометры обычно делают неохлаждаемыми для уменьшения цены и размеров оборудования.

Существуют также сканирующие тепловизоры. В них система из движущихся зеркал последовательно проецирует на датчик излучение от каждой точки наблюдаемого пространства. Датчик может быть одноэлементным, линейкой чувствительных элементов или небольшой матрицей. Для увеличения чувствительности и снижения инерционности датчики сканирующих тепловизоров охлаждаются до криогенных температур.

Лучшие охлаждаемые датчики способны реагировать на единичные фотоны и имеют время реакции менее микросекунды.

Температурное разрешение современных тепловизоров достигает сотых долей градуса Цельсия.

Различают наблюдательные и измерительные тепловизоры. Наблюдательные тепловизоры показывают только градиенты температур объекта. Измерительные тепловизоры позволяют измерить значение температуры заданной точки объекта с точностью до коэффициента излучения материала объекта. Измерительные тепловизоры требуют периодической калибровки, для чего зачастую снабжены встроенным устройством для калибровки матрицы, обычно в виде шторки, температура которой точно измеряется. Шторка периодически надвигается на матрицу, давая возможность откалибровать матрицу по температуре шторки.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Какие шкалы температур Вам известны?
2. Какие виды термометров Вам известны?
3. Что такое манометрический термометр?
4. На чем основано действие термометров сопротивления?
5. Какой эффект положен в основу работы термоэлектрических термометров?
6. Что называется термопарой?
7. В каком случае возникает термоЭДС?
8. Как устроены волоконно-оптические термометры?
9. Как действуют термоиндикаторы?
10. Какие виды регистрации излучения используются для построения пирометров?
11. Какие виды пирометров Вам известны?
12. Из каких материалов должны быть изготовлены объективы пирометров?
13. Подходит ли стекло для изготовления объективов для пирометров?
14. С какой целью и какой эталон используется в схеме построения пирометра?
15. В чем отличительная функциональная особенность тепловизоров? Каким образом они представляют информацию?
16. Какие достоинства присущи тепловизорам?
17. Какие матрицы применяются в тепловизорах?
18. Что такое болометр?
19. Чем различаются наблюдательные и измерительные тепловизоры?

Уровень курса

1. Принцип действия жидкостных и манометрических термометров.
2. Принцип действия термометров сопротивления и термоэлектрических термометров.
3. Принцип действия волоконно-оптических термометров и термоиндикаторов.
4. Принципы действия пирометров.
5. Принципы действия тепловизионной аппаратуры.

Лекція № 15

Тема: Общие сведения о радиационном виде неразрушающего контроля
Физические основы радиационного вида НК.

Оглавление

| | |
|---|----|
| Общие сведения о радиационном неразрушающем контроле..... | 2 |
| Классификация методов радиационного неразрушающего контроля | 3 |
| Механизмы возникновения рентгеновского и гамма- излучений | 5 |
| Рентгеновские и гамма-лучи..... | 5 |
| Ускоренное движение заряженных частиц | 6 |
| Изменение энергетического состояния электронов атома | 9 |
| Переходы между энергетическими уровнями ядер..... | 11 |
| Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом | 11 |
| Контрольные вопросы по теме | 14 |
| Уровень модуля..... | 14 |
| Уровень курса..... | 15 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1: В 2 кн.. Кн. 2. Ф.Р. Соснин. Радиационный контроль. - 2-е изд., испр. - М.: Машиностроение, 2008. - 560 с.: ил.
3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

Общин сведения о радиационном неразрушающем контроле

Радиографический контроль применяют для выявления в сварных соединениях трещин, непроваров, пор, шлаковых, вольфрамовых, окисных и других включений. Радиографический контроль применяют также для выявления прожогов, подрезов, оценки величины выпуклости и вогнутости корня шва, недоступных для внешнего осмотра.

При радиографическом контроле не выявляют;

– несплошности и включения с размером в направлении просвечивания менее удвоенной чувствительности контроля;

– непровары и трещины, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением просвечивания и (или) величина раскрытия менее значений, приведенных в табл. 1;

– несплошности и включения, если их изображения на снимках совпадают с изображениями посторонних деталей, острых углов или резких перепадов трещин просвечиваемого металла.

Таблица 1

| Радиационная толщина, мм | Раскрытие непровара (трещины), мм |
|------------------------------|-----------------------------------|
| До 40 | 0,1 |
| Свыше 40 до 100 включительно | 0,2 |
| 100-150 | 0,3 |
| 150-200 | 0,4 |
| Свыше 200 | 0,5 |

При радиационном контроле используют, как минимум, три основных элемента (рис. 1):

- источник ионизирующего излучения;
- контролируемый объект;
- детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

При прохождении через изделие ионизирующее излучение поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины δ и плотности ρ контролируемого объекта, а также интенсивности M и энергии E излучения. При наличии в веществе внутренних дефектов размером $\Delta\delta$ изменяются интенсивность и энергия пучка излучения. На рис. 1 видно, что засветка детектора (более темный участок) происходит больше в том месте, куда попало больше квантов ионизирующего излучения (в месте дефекта).

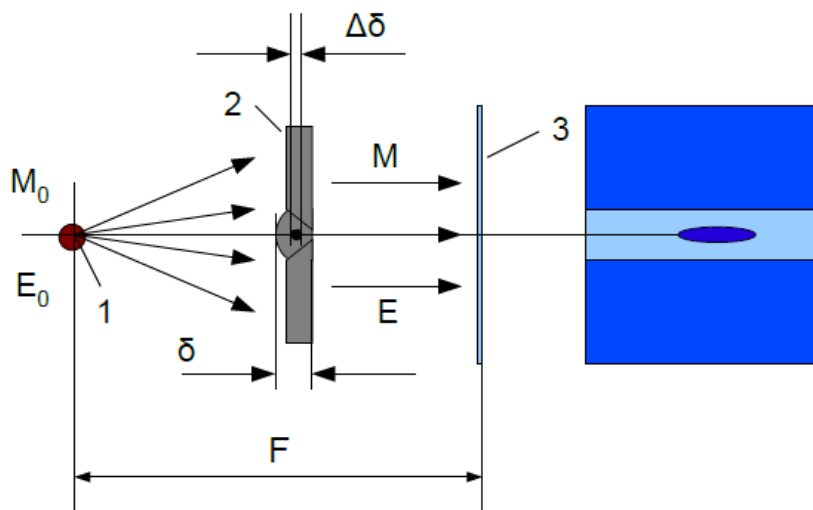


Рис. 1. Схема просвечивания: 1 — источник; 2 — изделие; 3 — детектор

Классификация методов радиационного неразрушающего контроля

Изделия просвечивают с использованием различных видов ионизирующих излучений, классификация которых приведена на рис. 2. В данном курсе не рассматривается нейтронная радиография, поскольку в широкой практике промышленного контроля ее применение ограничено.

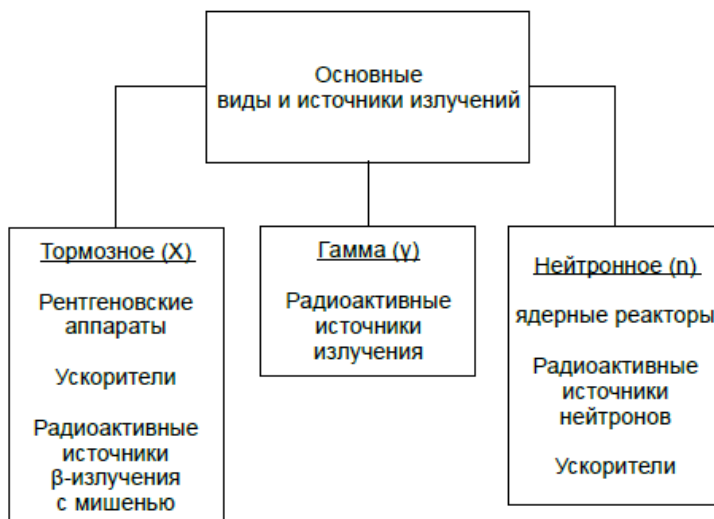


Рис. 2. Классификация источников ионизирующих излучений

Методы радиационного контроля различаются способами детектирования дефектоскопической информации (рис. 3) и соответственно делятся на радиографические, радиоскопические и радиометрические.

Радиографические методы РНК основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический

снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документарным подтверждением получаемых результатов. В зависимости от используемых детекторов различают пленочную радиографию и ксерорадиографию (электрорадиографию). В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором видимого изображения служит фотопленка, во втором — полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

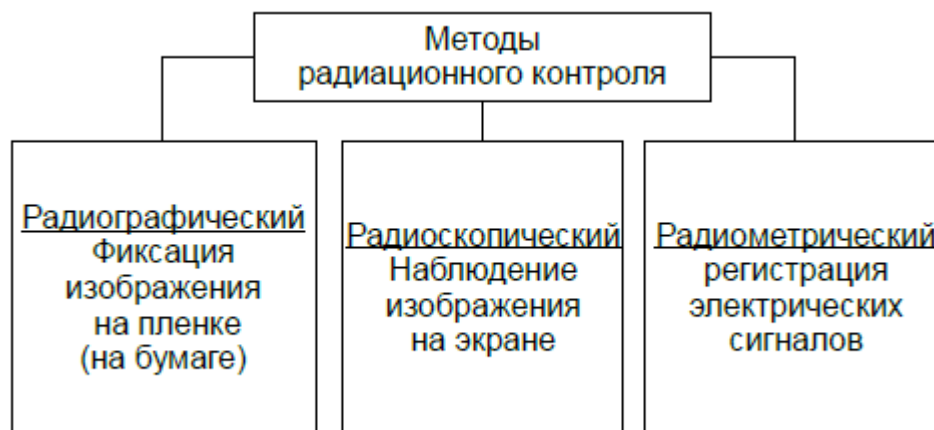


Рис. 3. Классификация методов радиационного контроля по способам детектирования дефектоскопической информации

В зависимости от используемого излучения различают несколько разновидностей промышленной радиографии: рентгенографию, гаммаграфию, ускорительную и нейтронную радиографии. Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования. Этими методами можно просвечивать стальные изделия толщиной от 1 до 700 мм.

Радиационная интроскопия — метод РНК, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля.

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стереоскопического изображения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами, экспрессность и непрерывность контроля.

Радиометрическая дефектоскопия — метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого

ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины, длительности или количества).

Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает радиографии.

Механизмы возникновения рентгеновского и гамма-излучений

Рентгеновские и гамма-лучи

Основными направлениями радиационной дефектоскопии являются рентгено- и гамма-дефектоскопия. Различие между рентгеновской и гамма-дефектоскопией заключается в используемых источниках ионизирующих излучений, однако ввиду общности способов регистрации излучения и целей испытаний они имеют общую методику и технологию проведения контроля в производственных условиях.

Рентгеновские и гамма-лучи (γ -лучи) обладают, той же самой природой, что и видимый свет (электромагнитное излучение). Диапазон длин волн жесткого электромагнитного излучения приведен в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон энергий и длин волн рентгеновского и гамма излучения

| Диапазон энергий (кэВ) | Диапазон длин волн | Название |
|------------------------|----------------------|-------------------------|
| 0,11-100 | от 0,01 до 12 нм | Рентгеновское излучение |
| 10-5000 | от 0,0002 до 0,12 нм | Гамма-излучение |

О терминологии жесткого электромагнитного излучения. Считается, что фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц, называется гамма-излучением. Рентгеновским излучением называется тормозное или характеристическое излучение атомов. Тормозное излучение больших энергий или фотонное излучение высокоэнергетических заряженных частиц при изменении направления движения, также иногда называют синхротронным излучением.

Рентгеновское и гамма-излучение являются ионизирующим излучением, то есть оно способно при прохождении через вещество выбить из атомов электроны. При этом образуются положительно заряженные ионы и электроны. Кроме того, высокоэнергетическое ионизирующее излучение

обладает большой проникающей способностью, поэтому оно нашло широкое применение в неразрушающем исследовании живых и неживых объектов.

Энергия кванта связана с длиной волны λ (частотой ν) электромагнитного излучения

$$E_\gamma = h \cdot \frac{c}{\lambda} = h\nu \quad (1)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме.

Электромагнитное излучение возникает, когда частицы в результате какого-то изменения теряют энергию. Это может произойти при торможении, изменении направления движения или переходе на более низкий энергетический уровень в электронной оболочке атома.

Элементарные процессы, которые могут приводить к испусканию рентгеновского фотонного излучения, можно разделить на три группы.

1. Ускоренное движение заряженных частиц
2. Изменение энергетического состояния электронов атома.
3. Переходы между энергетическими уровнями ядер.

Ускоренное движение заряженных частиц

К этой группе относятся процессы излучения при торможении заряженных частиц в веществе (рис. 5) или при излучении частиц, движущихся по круговой траектории (рис. 6), например, при движении заряда в однородном магнитном поле. Заряженная частица (например, электрон) изменяет траекторию движения под воздействием электрического поля атома (рис. 5). В результате полученного ускорения она испускает фотон. Это явление носит название тормозного излучения.

Мощность излучения P , т.е. энергия, излучаемая в единицу времени по всем направлениям, для заряженной частицы, которая движется с ускорением, равна:

$$P_t = \alpha q^2 a_t^2 \quad (2)$$

где $\alpha = \mu_0/6\pi c$. Индексы t показывают, что мощность P в момент t определяется ускорением, которое частица имеет в более ранний момент и $t' = t - l/c$ (эффект запаздывания). Эта формула справедлива лишь для зарядов, движущихся с малыми скоростями ($v \ll c$).

В качестве примера можно привести заряженные частицы, движущиеся в циклических ускорителях (бетатроне, циклотроне и др.). Здесь

обнаруживается естественный предел для энергии ускоряемой частицы, когда энергия, сообщаемая частице за период, становится равной энергии излучения.

Под *энергетическим спектром* понимают распределение частиц или квантов по энергии. Фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц, называют *тормозным излучением*. Часто тормозным излучением называют излучение электронов, ускоряемых электрическим полем атома; циклотронное и синхротронное излучение генерируется заряженной частицей, ускоряемой в стационарном магнитном поле.

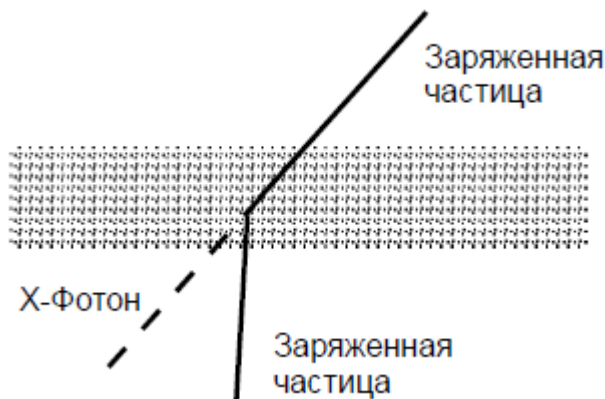


Рис. 4. Изменение траектории заряженной частицы при прохождении через вещество в результате взаимодействия с электронной оболочкой атома (заштрихованная часть рисунка соответствует веществу)

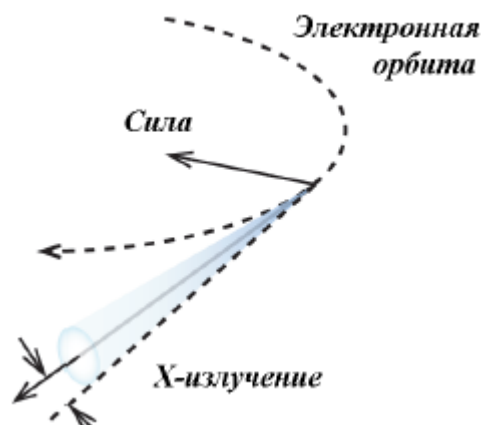


Рис. 5. Излучение при круговом движении электрона

Энергетические потери электрона, которые эмитируются в виде рентгеновских квантов, распределяются между нулем и максимальной энергией, которая была приобретена электроном благодаря ускорению в электрическом поле. Если между анодом и катодом приложено напряжение 75кВ, то электроны приобретают энергию 75 кэВ при прохождении этого напряжения. При торможении в материале анода может быть достигнута

максимальная энергия кванта 75 кэВ, то есть распределение многих рентгеновских квантов по энергиям лежит в диапазоне от нуля до максимальной энергии. Представляя интенсивность этого вида рентгеновских лучей в зависимости от энергии, получают спектр тормозного излучения трубки (рис. 6).

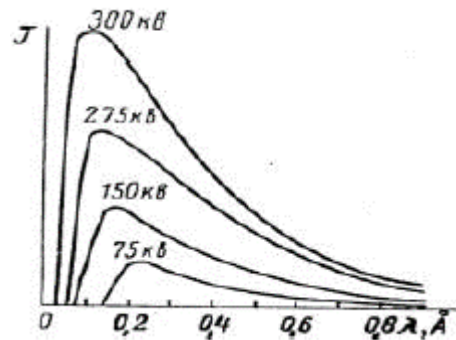


Рис. 6. Спектр тормозного излучения

С увеличением тока трубки при постоянном напряжении увеличивается интенсивность излучения. Увеличение ускоряющего напряжения при заданном анодном токе изменяет спектр излучения со смещением максимума излучения в сторону коротких волн (рис. 6). Это можно объяснить, если предположить, что начальная скорость у электрона на поверхности катода равна нулю, то его кинетическая энергия в момент достижения мишени равна:

$$W = \frac{1}{2} m_e v^2 = eU \quad (3)$$

где m_e – масса электрона; v – его скорость; e – заряд электрона; U – разность потенциалов между катодом и мишенью. При торможении электрона с кинетической энергией eU в мишени может происходить несколько процессов передачи энергии. Вся кинетическая энергия электрона преобразуется в лучевую энергию одного рентгеновского кванта в исключительно редких случаях. При этом интенсивность излучения резко падает вблизи некой минимальной длины волны λ_{min} , которую можно оценить в ангстремах как:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU} = \frac{12398}{U} \quad (4)$$

где U – ускоряющее напряжение рентгеновской трубки в вольтах. Большинство электронов в пучке взаимодействует с электронами, связанными с атомами мишени. Для выбивания электрона из атомов требуется лишь часть энергии налетающих электронов. После того, как налетающий электрон утрачивает часть своей энергии, энергия, трансформируемая в рентгеновский

фотон, оказывается меньше, чем eU . Генерируемый таким образом фотон имеет длину волны, превышающую λ_{min} . Обычно испускается излучение, состоящее из фотонов с разной длиной волн. Спектр такого излучения при больших ускоряющих напряжениях (свыше 100 кВ) является в основном непрерывным (рис. 6).

Изменение энергетического состояния электронов атома

Изменение энергетического состояния электронов атома приводит к выходу из атома фотонов *характеристического излучения*. При некоторых, определенных для данного материала анода, ускоряющих напряжениях на фоне непрерывного спектра возникает линейчатый спектр, который называют *характеристическим спектром* (рис. 7).

Характеристическое излучение возникает тогда, когда падающий электрон обладает энергией достаточной для того, чтобы выбить электрон с одной из внутренних электронных оболочек атома, в этом случае вакантное место занимает электрон с более высокого энергетического уровня, а избыток энергии реализуется в виде излучения. Длина волны рентгеновского кванта будет определяться только разностью энергий этих двух уровней, и повышение напряжения увеличивает интенсивность, но не изменяет длину волны характеристического излучения анода.

Характеристические спектры весьма просты и классифицируются в порядке возрастания длин волн как K-, L-, M-, N- серии, в соответствии с уровнем, с которого был выбит электрон.

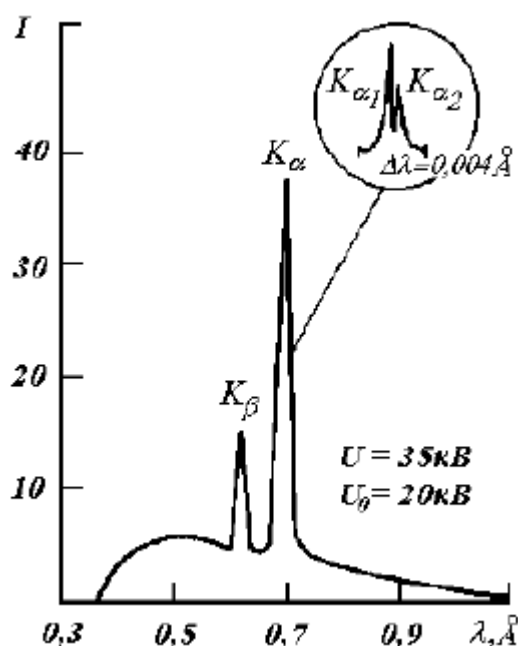


Рис. 7. Коротковолновая часть характеристического спектра излучения молибдена

Рассмотрим структуру и принцип образования характеристического спектра. Положение каждого из z электронов в атоме характеризуется четырьмя квантовыми числами:

а) главное квантовое число

$n = \quad \quad \quad 1 \quad \quad \quad 2 \quad \quad \quad 3 \quad \quad \quad 4 \quad \quad \quad \dots$
 $\quad \quad \quad \text{K-} \quad \quad \quad \text{L-} \quad \quad \quad \text{M-} \quad \quad \quad \text{N-}$

которому соответствует энергетический уровень электрона в атоме;

б) орбитальный момент $l = n-1, n-2, n-3, \dots, 0$;

в) полный момент $j = l + s$ ($s = 1/2$ - спиновый момент электрона)

$$j = l \pm 1/2 \quad (l \neq 0), \quad j = 1/2 \quad (l = 0);$$

г) магнитное квантовое число $m = \pm j, \pm (j-1), \pm (j-2), \dots$

Таким образом, для электронов К-уровня ($n = 1$) возможны два набора квантовых чисел: $n=1, l=0, j = 1/2, m = \pm 1/2$, и согласно принципу Паули на этом уровне может быть только два электрона.

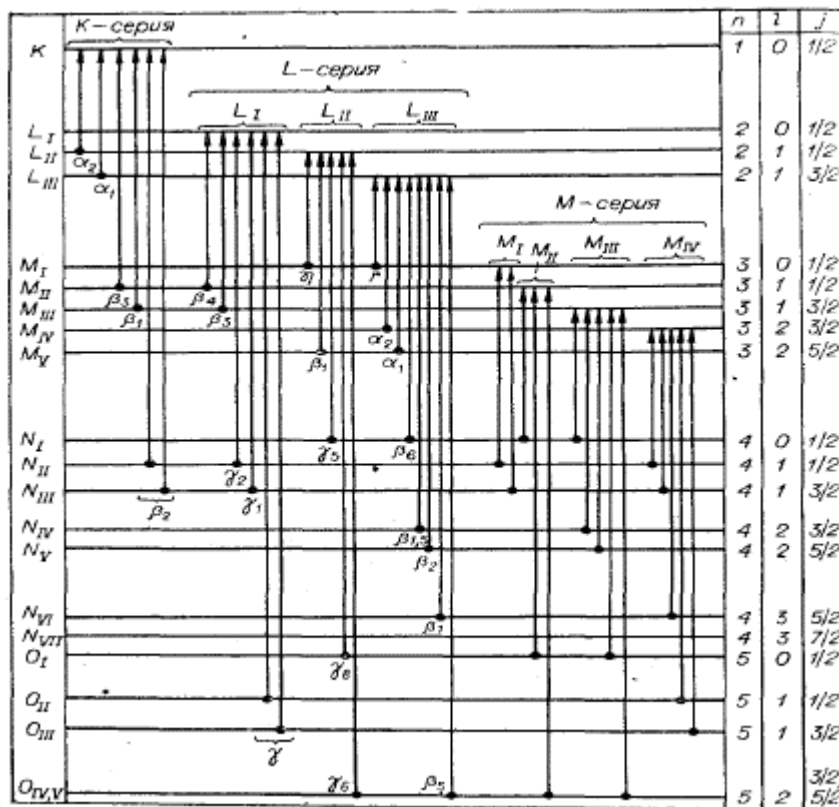


Рис. 8. Схема энергетических уровней атома и разрешенных электронных переходов

Подобно тому, как заселение разных энергетических уровней лимитируется принципом Паули, так и число линий в характеристическом спектре, т.е. число возможных переходов электрона в атоме с одного энергетического уровня на другие, ограничивается квантовомеханическими правилами отбора. В приложении к рентгеновским спектрам излучения эти

правила можно записать следующим образом: $\Delta l \neq 0$, $\Delta l = \pm 1$, $\Delta j = 0, \pm 1$. Исходя из этих правил, легко выяснить, какие переходы между энергетическими уровнями возможны. На рис. 8 приведена схема энергетических уровней атома, на которой показаны разрешенные электронные переходы и их общепринятые обозначения.

Переходы между энергетическими уровнями ядер.

Каждое ядро, как и атом, обладает определенным набором энергетических уровней; переход с одного уровня на другой с более низкой энергией сопровождается выделением энергии, например, в виде фотонного излучения. Поскольку энергетические уровни в ядрах и атомах дискретны, фотонное излучение в указанных выше процессах испускается в виде отдельных спектральных линий. Такое испускание обычно происходит в возбужденных дочерних ядрах после α - или β -распада материнского ядра. Возбуждение ядер может произойти также после взаимодействия ядра с нейтроном, с гамма-квантом или с другими частицами большой энергии (больше нескольких МэВ). Источниками таких фотонов в радиационной технике являются, например, такие радионуклиды, как Cs-137 и Co-60 (рис. 9).

В каждом из этих случаев фотоны испускаются дочерними возбужденными ядрами Ba-137 и Ni-60 после β -распада материнских ядер.

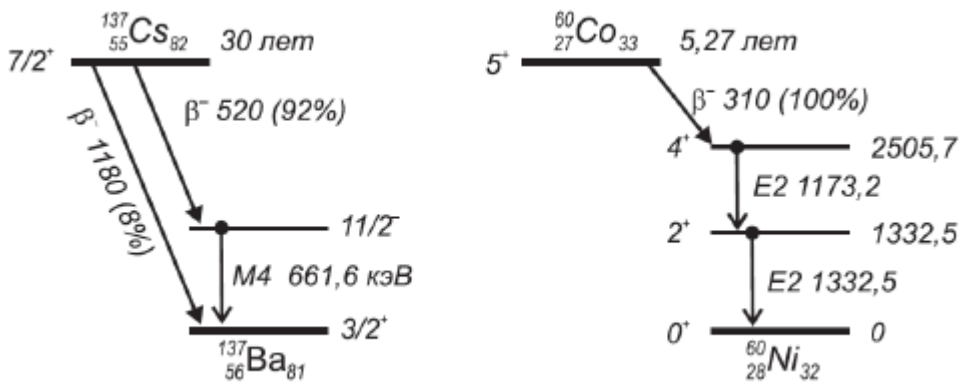


Рис. 9. Схемы распада и гамма-переходы ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co.

Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

При прохождении через вещество интенсивность рентгеновского и гамма-излучения уменьшается по закону, характерному для электромагнитного излучения (закон Ламберта-Бугера):

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \tag{5}$$

где I и I_0 - конечная и начальная интенсивности излучения, соответственно; μ - полный линейный коэффициент ослабления; x - толщина слоя вещества.

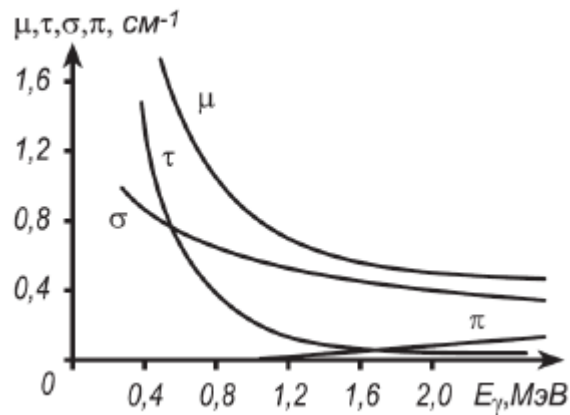


Рис. 10. Зависимость коэффициентов поглощения и рассеяния для свинца от энергии фотонов

Коэффициент μ зависит от длины волны и плотности поглощающего материала. Чтобы μ не зависел от физического состояния вещества, вводят массовый коэффициент ослабления $\mu_p = \mu/\rho$ (ρ - плотность вещества).

Собственно полный линейный коэффициент ослабления равен

$$\mu = \tau + \sigma + \pi + \kappa$$

где τ - линейный коэффициент фотоэффекта, σ - линейный коэффициент Комптон-эффекта, κ - линейный коэффициент образования электрон-позитронных пар ($E_\gamma > 1,02$ МэВ), π - линейный коэффициент рэлеевского рассеяния (которое существенно при низких энергиях и не превышает 20%). Коэффициенты τ , σ , π , κ зависят от атомного номера вещества Z , и энергии ионизирующего электромагнитного излучения. На рис. 10. приведены зависимости линейных коэффициентов поглощения и рассеивания для свинца от энергии излучения.

При малых энергиях (до 100 кэВ) ионизирующего излучения, вид зависимости линейного коэффициента ослабления от энергии излучения усложняется. Заметный вклад дает резонансное взаимодействие фотонов с атомом, которое приводит к появлению спектральной структуры в зависимости поглощения от энергии фотонов.

На рис. 11 приведен спектр поглощения рентгеновского излучения - зависимость μ_p от длины волны λ . На этой кривой наблюдается несколько "скачков". Природу этих "скачков" можно понять, рассматривая изменение μ_p . По мере уменьшения длины волны сначала наблюдается уменьшение коэффициента поглощения, но при достижении определенной длины волны, например, λ_{LIII} , возникает резкий скачок μ_p .

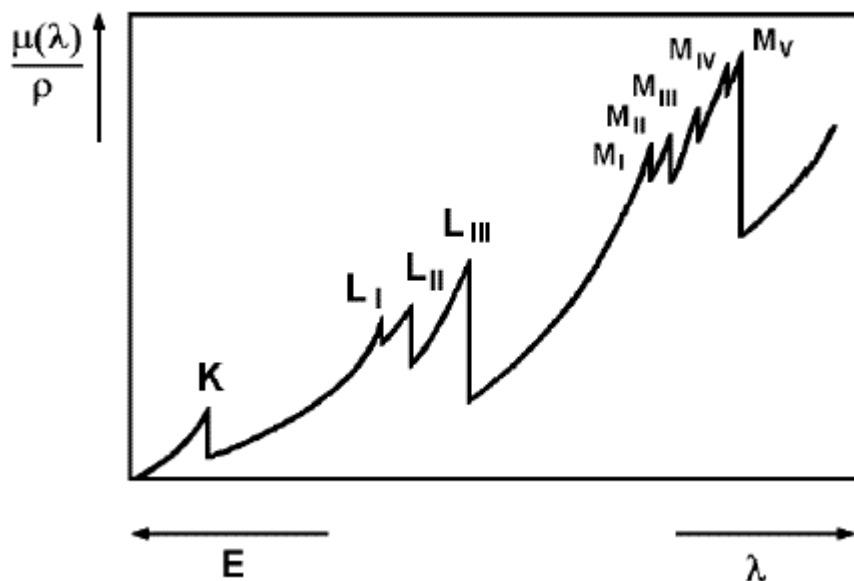


Рис. 11. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны λ

Одновременно с появлением скачка поглощения усиливается эмиссия фотоэлектронов и в спектре рассеянных лучей появляются линии вторичного характеристического излучения. Появление скачков объясняется тем, что энергия квантов рентгеновского излучения становится достаточной для "выбивания" электронов с определенного энергетического уровня атомов поглощающего вещества. Появление линий вторичного характеристического излучения связано с излучением квантов при переходах электронов атома на освободившиеся внутренние уровни. При дальнейшем уменьшении длины волны наблюдается еще несколько скачков μ_P при λ_{LII} , λ_{LI} и λ_K . Каждый из этих скачков связан с ионизацией определенного энергетического уровня. В пределах между двумя соседними скачками коэффициент $\mu_P \sim \lambda^3$.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Какие дефекты выявляют радиационным методом НК?
2. Какие дефекты не выявляются радиационным методом НК?
3. Какие основные элементы составляют прибор радиационного неразрушающего контроля?
4. Какие источники ионизирующего излучения применяются в радиационном виде НК?
5. Как различаются методы радиационного контроля по способам детектирования дефектоскопической информации?
6. На каком способе представления информации основаны радиографические методы?
7. Как разделяются радиографические методы в зависимости от используемых детекторов?
8. Что такое радиационная интроскопия?
9. Что представляет собой радиометрическая дефектоскопия?
10. В чем преимущества радиометрической дефектоскопии по отношению к другим методам радиационного НК?
11. Каким соотношением связаны энергия кванта и длина волны?
12. Можно ли считать рентгеновские лучи электромагнитным излучением?
13. Можно ли считать гамма лучи электромагнитным излучением?
14. Какие процессы приводят к испусканию рентгеновского фотонного излучения?
15. Какие основные способы создания ускоренного движения заряженных частиц?
16. Что называется энергетическим спектром?
17. Что называется тормозным излучением?
18. Увеличение ускоряющего напряжения при заданном анодном токе а) смещает максимум излучения в сторону более длинных волн б) увеличивает интенсивность излучения в) смещает максимум излучения в сторону более коротких волн?
19. Увеличение тока трубки при постоянном напряжении а) смещает максимум излучения в сторону более длинных волн б) увеличивает интенсивность излучения в) смещает максимум излучения в сторону более коротких волн?
20. Какое излучение называется характеристическим?

21. Каким физическим законом описывается уменьшение интенсивности рентгеновского и гамма-излучения при прохождении через вещество? Запишите формулу.
22. От каких факторов зависит полный линейный коэффициент ослабления рентгеновского и гамма-излучения при его прохождении через вещество?

Уровень курса

1. Общих сведения о радиационном неразрушающем контроле.
2. Ускоренное движение заряженных частиц как источник рентгеновского фотонного излучения.
3. Изменение энергетического состояния электронов атома как источник рентгеновского фотонного излучения. Характеристический спектр.
4. Переходы между энергетическими уровнями ядер как источник рентгеновского фотонного излучения.
5. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

Лекція № 16

Тема: Акустический вид неразрушающего контроля: основные сведения об акустических волнах и их распространении.

Оглавление

| | |
|--------------------------------------|---|
| Акустические колебания и волны | 2 |
| Типы волн | 4 |
| Акустические свойства сред | 5 |
| Отражение и преломление волн | 7 |
| Контрольные вопросы по теме | 9 |
| Уровень модуля..... | 9 |
| Уровень курса..... | 9 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге – М.: Машиностроение, 2004. - 854 с.: ил..
3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

Акустические колебания и волны

Для акустического метода НК применяют колебания ультразвукового и звукового диапазонов частотой от 50 Гц до 50 МГц. Интенсивность колебаний обычно невелика: не превышает 1 кВт/м². Такие колебания происходят в области упругих деформаций среды, где напряжения и деформации связаны пропорциональной зависимостью (область линейной акустики).

Амплитуда акустических волн в жидкостях и газах характеризуется одним из следующих параметров:

- смещением u (м) частиц среды из положения равновесия в процессе колебательного движения;
- скоростью (м/с) колебательного движения частиц среды

$$v = \frac{du}{dt}$$

где t – время.

- акустическим давлением (Па) или изменением давления относительно среднего значения давления в среде:

$$p = \rho c v$$

где c – скорость распространения акустических волн; ρ – плотность среды;

Кроме упругости по объему, в твердом теле существует упругость по форме, поэтому в объеме тела могут распространяться волны двух типов: продольные и поперечные. Акустические волны в твердых телах характеризуются либо смещением, либо колебательными скоростями, либо тензорами деформации или напряжения.

Плоская волна, распространяющаяся вдоль оси x_y описывается формулой

$$a = A \cos(\omega t - kx) = A \operatorname{Re} \left[e^{-j(\omega t - kx)} \right]$$

Знак Re (действительная часть) обычно опускают. A – амплитуда колебаний (амплитуды обозначаем большими буквами); $\omega = 2\pi f$ – круговая (угловая, циклическая) частота; f – частота; t – время; $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ – волновое число; $\lambda = c/f$ – длина волны; c – скорость распространения волны.

Формула показывает, что величина a периодически изменяется во времени и пространстве.

В качестве меняющейся величины a будем использовать смещение u и акустическое давление p . Для твердого тела вместо давления правильнее

применять напряжение, однако для упрощения формул использовано давление, а особенности твердого тела там, где это необходимо, специально оговорены.

Плотность потока энергии волны

$$W = c\rho|v|^2 = \frac{|p|^2}{c\rho}$$

Средняя плотность потока энергии за период колебаний называется интенсивностью звука.

Для сравнения интенсивностей J и J_0 или амплитуд A и A_0 двух акустических волн используют отношение N (дБ):

$$N = 10\lg \frac{J}{J_0} = 20\lg \frac{A}{A_0}$$

Обычно измеряют ослабление амплитуды A относительно возбужденных в изделии колебаний A_0 (зондирующего или начального сигнала), т.е. отношение A/A_0 . Выраженные в децибелах амплитуды будем выделять угловыми скобками $\langle \rangle$:

$$\langle A/A_0 \rangle = 20\lg(A/A_0)$$

Поскольку $A < A_0$, получаем отрицательные децибелы, однако в дальнейшем отмечать это обстоятельство не будем.

В акустической дефектоскопии чаще применяют не непрерывные (монохроматические) колебания, а радиочастотные импульсы, форму огибающей которых при распространении в объекте контроля обычно можно приблизительно полагать колоколообразной. Такой импульс описывается формулой

$$a = A \exp \left[-[\gamma\omega(t-t_0)]^2 + j\omega(t-t_0) \right]$$

Изменение по координате здесь опущено, γ – показатель длительности импульса. Иногда вместо него используют число n периодов колебаний с амплитудами, превышающими 0,1 (20 дБ) от максимального значения. Эта величина связана с γ зависимостью

$$n = 0.483/\gamma$$

Величину $\tau = nT$ (T – период колебаний) называют длительностью импульса, а $c\tau$ – пространственной длительностью импульса.

Типы волн

Для контроля применяют разные типы (моды) волн, отличающиеся направлением колебаний частиц, скоростью распространения и другими признаками.

В объеме твердого тела могут распространяться продольные и поперечные волны. В продольной волне колебательные скорости частиц среды совпадают с направлением распространения волны, в поперечной перпендикулярны к нему.

Поперечные волны, распространяющиеся наклонно к какой-либо поверхности (например, поверхности ввода, на которой расположен преобразователь), разделяют на волны с направлением колебаний, параллельным этой поверхности (их называют горизонтально-поляризованными, SH , TH), и с направлением колебаний в плоскости падения (вертикально-поляризованные, SV , TV). Они по-разному отражаются от поверхностей и структурных неоднородностей.

Вдоль поверхности твердого тела распространяются рэлеевские (поверхностные) и головные (продольные, подповерхностные, ползущие) волны. Амплитуда рэлеевской поверхностной волны имеет максимум на поверхности и уменьшается в 10 раз на глубине около длины поверхностной волны. Рэлеевская волна распространяется на большие расстояния, следуя изгибам поверхности. На выпуклой поверхности скорость ее увеличивается, а на вогнутой уменьшается, но одновременно растет затухание.

Головную волну можно представить как идущий от излучателя пучок лучей продольных волн. Максимальную амплитуду имеет луч под углом скольжения (угол к поверхности) $12 \dots 15^\circ$. Амплитуда луча, идущего вдоль поверхности, очень мала и быстро убывает с расстоянием вследствие порождения поперечной волны, распространяющейся под углом. Достигая нижней поверхности, она порождает там головную волну, которую также используют для контроля.

В соответствии с этим изменяется чувствительность к дефектам. Головная волна практически не чувствительна к поверхностным дефектам (на глубине 0,5 мм и менее) и имеет максимум чувствительности на глубине 4 ... 10 мм в зависимости от расстояния от преобразователя ($l = 10 \dots 50$ мм).

В результате волноводного эффекта в пластинах и стержнях возникают нормальные волны: волны в пластинах (волны Лэмба) (рис. 13.1) и стержневые (волны Похгаммера). Колебания охватывают все сечение пластины или стержня. Разные моды этих волн отличаются распределением колебаний по толщине (рис. 13.1). В модах выше нулевой имеются узловые поверхности, где напряжения равны нулю и совпадающие с ними дефекты выявляются плохо.

Скорости продольных, поперечных и поверхностных волн не зависят от частоты. Скорости волн в пластинах и стержнях зависят от произведения толщины изделия h на частоту f деленного на скорость поперечной волны c_t . Это явление называют дисперсией скорости. Нулевые моды переходят при увеличении толщины в поверхностную волну, остальные в поперечную.

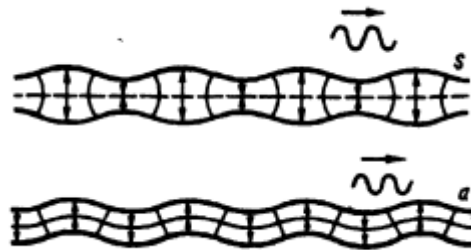


Рис. 13.1 Деформация пластины при распространении симметричных и антисимметричных волн

Акустические свойства сред

В их число входят упругие свойства, плотность, характеристический импеданс и затухание.

Упругие свойства жидкостей и газов определяются одной константой, например модулем всестороннего сжатия K . Упругие свойства твердых тел характеризуются двумя независимыми упругими константами, например модулем нормальной упругости E и модулем сдвига G .

Импеданс. Важным параметром среды распространения упругих колебаний является *характеристический импеданс*, или *удельное волновое сопротивление* (обычно просто *волновое сопротивление*). Он определяется как отношение звукового давления к колебательной скорости в бегущей волне и обычно выражается в виде

$$z = \rho c$$

В отсутствие потерь z – действительная величина. Комплексный характер z учитывают только в случае сред с большими потерями, когда c имеет заметную мнимую составляющую.

Акустическим импедансом называется комплексное отношение звукового давления к колебательной скорости p/v для любой волны. В отличие от z акустический импеданс зависит не только от параметров среды, но и от условий отражения, границ раздела, углов падения и других факторов.

Размерность характеристического и акустического импедансов Па • с/м.

Изменение скорости c от температуры t определяется формулой

$$c = c_0 + K_c (t - t_0)$$

где c_0 – скорость при исходной температуре T_0 . Температурный коэффициент скорости K_c : для газов – положительный (для воздуха $+0,6$ м/с • град), для жидкостей – отрицательный (например, для спирта $-3,6$ м/с • град, однако для воды аномальный $+2,5$ м/с-град), для твердых тел – отрицательный (для продольных и поперечных волн в металлах $-0,4 \dots -1$, для органического стекла -3).

Затухание волны с расстоянием определяют коэффициентом затухания δ :

$$A = A_0 e^{-\delta r}$$

где A – амплитуда в точке измерения; r расстояние, проходимое волной; A_0 – амплитуда волны, прошедшей расстояние r без учета затухания.

Для характеристики затухания используют также механическую добротность Q_m , которая связана с коэффициентом затухания:

$$\delta = \frac{\pi}{\lambda Q_m}$$

Коэффициент затухания $\delta = \frac{1}{r} \ln(A/A_0)$ выражается в неперах/м (Нп/м) и имеет размерность m^{-1} . Часто его представляют также в децибелах/м (дБ/м). При этом 1 Нп/м = $8,686$ дБ/м, 1 дБ/м = $0,1151$ Нп/м. Общее ослабление сигнала вследствие затухания в среде $\langle A/A_0 \rangle = \langle \delta \rangle r$. Эту величину добавляют к ослаблению, вызываемому другими факторами.

Коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения и рассеяния:

$$\delta = \delta_n + \delta_p$$

При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны в результате отражений от неоднородностей среды.

В газах и жидкостях, не засоренных взвешенными частицами, пузырьками воздуха (в жидкости), рассеяние отсутствует и затухание определяется только поглощением. Коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. В связи с этим в качестве характеристики поглощения звука в жидкостях и газах вводят параметр δ/f^2 .

Для твердых тел коэффициент поглощения чаще всего пропорционален частоте. В этом случае используется параметр δ/f , который равен: для стали $0,1 \dots 1,5$ Нп/МГц • м; для алюминия $0,05 \dots 0,06$; для магния $0,1$. Поглощение

определяет затухание акустических волн в аморфных твердых телах, а также в монокристаллах.

При изготовлении демпферов преобразователей ультразвуковых дефектоскопов часто используют гетерогенные материалы в виде эпоксидной смолы или другого материала и порошкообразного наполнителя с размером частиц, значительно меньшим длины волны.

Отражение и преломление волн

Падающая на границу двух протяженных сред плоская волна частично проходит, частично отражается и может трансформироваться. В твердых телах (рис. 13.2) возникают две (продольная и поперечная) отраженные и две преломленные волны с направлениями по закону синусов (закону Снеллиуса)

$$\frac{\sin \beta}{c} = \frac{\sin \gamma_l}{c_l} = \frac{\sin \gamma_t}{c_t} = \frac{\sin \alpha_l}{c_l'} = \frac{\sin \alpha_t}{c_t'}$$

где β , γ и α – углы падения, отражения и преломления; c – скорости волн; индексы l и t отмечают продольные и поперечные волны, для нижней среды индексы имеют штрих ($'$), скорость падающей волны без индекса.

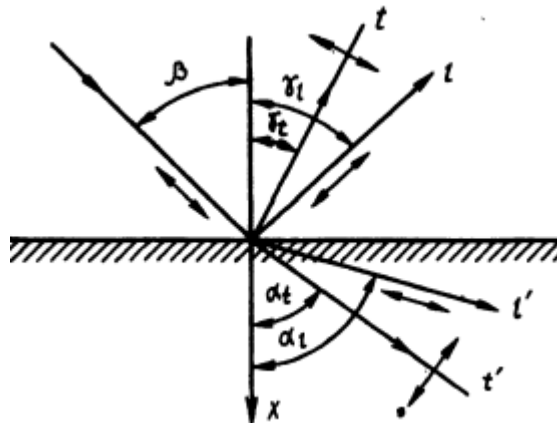


Рис. 13.2. Отражение, преломление и трансформация при падении продольной волны на границу раздела двух твердых сред

Если одна среда (или обе) жидкая или газообразная, то поперечные волны в ней не существуют и количество волн сокращается.

Амплитуды каждой отраженной или прошедшей волны определяются коэффициентами отражения или прозрачности: R или D . Эти коэффициенты могут быть по амплитудам смещения, акустического давления или других переменных величин. Часто используют коэффициенты по потокам энергии, перпендикулярным к границе раздела \tilde{R} и \tilde{D} (будем называть «по энергии»). Для этих коэффициентов справедливы общие закономерности:

1) сумма всех коэффициентов отражения и прозрачности по энергии равна 1 (закон сохранения энергии):

$$\tilde{R}_{II} + \tilde{R}_{I'I'} + \tilde{D}_{II'} + \tilde{D}_{I'I} = 1$$

2) коэффициенты отражения по амплитуде однотипной волны с двух сторон от границы равны по модулю и обратны по знаку:

$$R_{II} = -R_{I'I'}; \quad R_{I'I} = -R_{II'}$$

3) коэффициент прозрачности по энергии равен произведению коэффициентов по амплитуде в двух направлениях, например:

$$\tilde{D}_{I'I} = D_{I'I} D_{I'I} = \tilde{D}_{I'I}$$

То же относится к коэффициентам отражения разнотипных волн:

$$\tilde{R}_{I'I} = R_{I'I} R_{I'I} = \tilde{R}_{I'I}$$

Эта закономерность (в части прохождения) важна для дефектоскопии, поскольку границу изделия волна проходит дважды.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Волны каких частот применяют в акустическом виде НК?
2. Какими параметрами характеризуется амплитуда акустических волн в жидкостях и газах?
3. Какими параметрами характеризуется амплитуда акустических волн в твердых телах?
4. Какие два типа акустических волн могут распространяться в твердых телах?
5. Какое выражение используют в акустике при сравнении амплитуд двух акустических волн?
6. В каких единицах измерения определяют отношение амплитуд двух волн в акустике?
7. Как направлено движение частиц при распространении в твердом теле продольной акустической волны?
8. Как направлено колебательное движение частиц при распространении продольной акустической волны в твердом теле?
9. Как направлено колебательное движение частиц при распространении поперечной акустической волны в твердом теле?
10. Как связаны удельное волновое сопротивление, плотность среды и скорость распространения звука в среде?
11. Из каких составляющих складывается коэффициент затухания акустической волны?
12. В каких единицах выражается коэффициент затухания акустической волны?
13. В какой вид энергии переходит звуковая энергия при ее поглощении?
14. В какой вид энергии переходит звуковая энергия при ее рассеянии?
15. Зависит ли коэффициент поглощения акустических волн от частоты?
16. Каким физическим законом описывается преломление акустических волн на границе двух сред?
17. Чему равна сумма всех коэффициентов отражения и прозрачности по энергии при прохождении акустической волны через границу двух сред?

Уровень курса

1. Акустические колебания и волны.
2. Типы акустических волн.
3. Акустические свойства сред.
4. Отражение и преломление акустических волн.

Лекція № 17

Тема: Физические явления при проведении акустического вида неразрушающего контроля.

Оглавление

| | |
|---|----|
| Активные и пассивные методы | 2 |
| Физические явления при проведении акустического НК методами прохождения..... | 2 |
| Физические явления при проведении акустического НК методами отражения..... | 3 |
| Физические явления при проведении акустического НК комбинированными методами..... | 6 |
| Физические основы методов собственных частот | 7 |
| Методы собственных частот, использующие вынужденные колебания. | 7 |
| Методы собственных частот, использующие свободные колебания | 8 |
| Физические основы пассивных акустических методов | 9 |
| Контрольные вопросы по теме | 11 |
| Уровень модуля..... | 11 |
| Уровень курса..... | 11 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге – М.: Машиностроение, 2004. - 854 с.: ил..
3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

Активные и пассивные методы

Известно много акустических методов неразрушающего контроля, некоторые из которых применяются в нескольких вариантах. Классификация акустических методов показана на рис. 17.1. Их делят на две большие группы – активные и пассивные методы.

Активные методы основаны на излучении и приеме упругих волн, пассивные – только на приеме волн, источником которых служит сам контролируемый объект.

Активные методы делят на методы прохождения, отражения, комбинированные (использующие как прохождение, так и отражение), импедансные и методы собственных частот.

Физические явления при проведении акустического НК методами прохождения

Методы прохождения используют излучающие и приемные преобразователи, расположенные по разные или по одну сторону от контролируемого изделия. Применяют импульсное или (реже) непрерывное излучение и анализируют сигнал, прошедший через контролируемый объект.

Исторически методы прохождения применяли только для обнаружения несплошностей, меняющих параметры сквозного сигнала вследствие образования за дефектом акустической тени. Поэтому их называли «теневыми». Однако затем эти методы начали использовать для контроля прочности, пористости, структуры и других параметров материала, не связанных с наличием тени. Поэтому теневой метод – частный случай метода прохождения.

К методам прохождения относят:

- ❖ *Амплитудный теневой метод*, основанный на регистрации уменьшения амплитуды волны, прошедшей через контролируемый объект, вследствие наличия в нем дефекта (рис. 17.2, а);

- ❖ *Временной теневой метод*, базирующийся на регистрации запаздывания импульса, вызванного увеличением его пути в изделии при огибании дефекта (рис. 17.2, б); тип волны при этом не меняется;

- ❖ *Метод многократной тени*. Он аналогичен амплитудному методу прохождения, но о наличии дефекта судят по амплитуде сквозного сигнала (теневого импульса), многократно (обычно двукратно) прошедшего между параллельными поверхностями изделия. Метод более чувствителен, чем теневой или зеркально-теневой, так как волны проходят через дефектную зону несколько раз, но менее помехоустойчив.

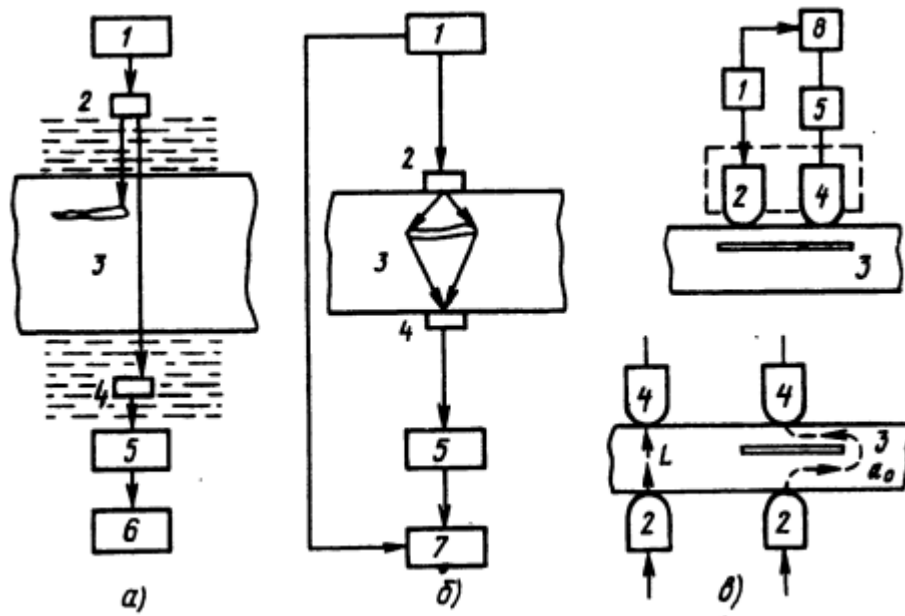


Рис. 17.2. Методы прохождения:

a – теневой; *б* – временной теневой; *в* – велосиметрический;

1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – объект контроля; 4 – приемник;
 5 – усилитель; 6 – измеритель амплитуды; 7 – измеритель времени пробега;
 8 – измеритель фазы

❖ *Велосиметрический метод*, основанный на регистрации изменения скорости распространения дисперсионных мод упругих волн в зоне дефекта и применяемый при одностороннем и двустороннем доступе к контролируемому объекту (рис. 17.2в). В этом методе обычно используют преобразователи с сухим точечным контактом. В варианте с односторонним доступом (рис. 17.2в, верх) скорость возбуждаемой излучателем антисимметричной волны нулевого порядка (a_0) в отделенном дефектом слое меньше, чем в бездефектной зоне. При двустороннем доступе (рис. 17.2в, внизу) в бездефектной зоне энергия передается продольной волной L , в зоне дефекта волнами a_0 , которые проходят больший путь и распространяются с меньшими скоростями, чем продольная волна. Дефекты отмечают по изменению фазы или увеличению времени прохождения (только в импульсном варианте) по контролируемому изделию.

Физические явления при проведении акустического НК методами отражения

В методах отражения используют как один, так и два преобразователя; применяют импульсное излучение. К этой подгруппе относят следующие методы дефектоскопии.

❖ *Эхо-метод* (рис. 17.3, а) основан на регистрации эхосигналов от дефекта. На экране индикатора обычно наблюдают посланный (зондирующий) импульс *I*, импульс *III*, отраженный от противоположной поверхности (дна) изделия (донный сигнал) и эхо-сигнал от дефекта *II*. Время прихода импульсов *II* и *III* пропорционально глубине залегания дефекта и толщине изделия. При совмещенной схеме контроля (рис. 17.3, а) один и тот же преобразователь выполняет функции излучателя и приемника. Если эти функции выполняют разные преобразователи, то схему называют *раздельной*.

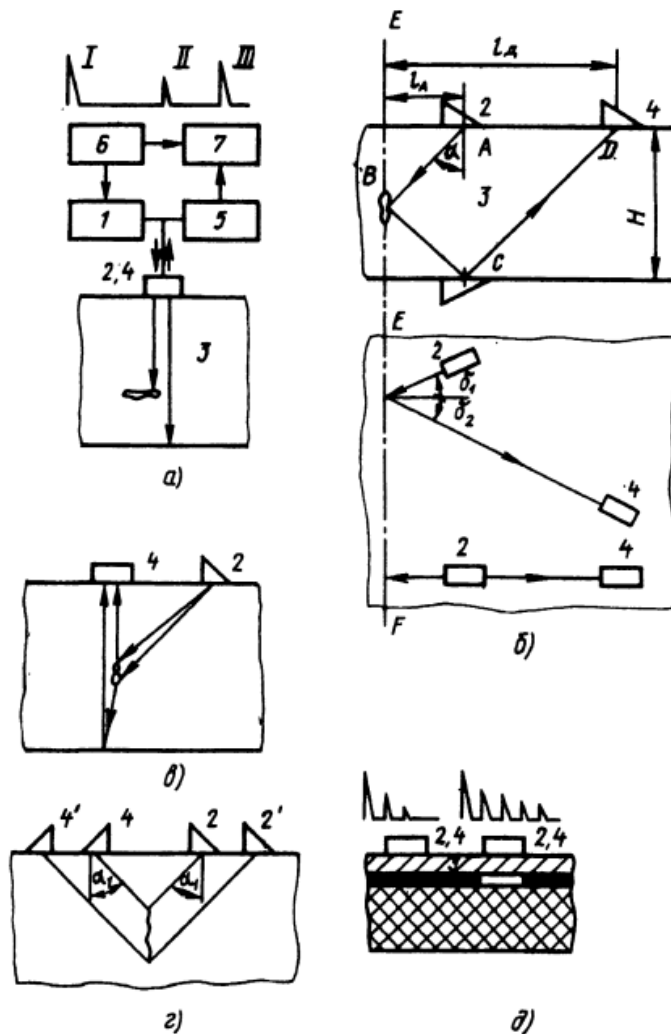


Рис. 17.3. Методы отражения: а – эхо; б – эхо-зеркальный; в – дельта-метод; г – дифракционно-временной; д – реверберационный, 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – объект контроля; 4 – приемник; 5 – усилитель; 6 – синхронизатор; 7 – индикатор

❖ *Акустическая микроскопия* отличается от обычного эхо-метода повышением на один-два порядка частоты УЗ, применением острой фокусировки и автоматическим или механизированным сканированием объектов небольшого размера. В результате удается зафиксировать небольшие по размеру изменения акустических свойств в ОК. Метод позволяет достичь

разрешающей способности в сотые доли миллиметра. Возможна акустическая микроскопия с использованием прохождения волн.

❖ *Когерентные методы* отличаются от других методов отражения тем, что в качестве информативного параметра помимо амплитуды и времени прихода импульсов используется также фаза сигнала. Благодаря этому повышается на порядок разрешающая способность методов отражения и появляется возможность наблюдать изображения дефектов, близкие к реальным. Наиболее эффективным когерентным методом является компьютерная акустическая голография.

❖ *Эхо–зеркальный метод* основан на анализе сигналов, испытавших зеркальное отражение от донной поверхности изделия и дефекта, т.е. прошедших путь ABCD (рис. 17.3, б). Вариант этого метода, рассчитанный на выявление вертикальных дефектов в плоскости EF, называют методом тандем. Один из вариантов метода, называемый «косой тандем», предусматривает расположение излучателя и приемника не в одной плоскости (рис. 17.3, б, вид в плане внизу), а в разных плоскостях, но таким образом, чтобы принимать зеркальное отражение от дефекта.

Другой вариант эхо-зеркального метода с трансформацией типов волн на дефекте (Т-тандем). Например, преобразователь 2 излучает поперечную волну под углом ввода α , большим 57° (для стали). Угол падения на вертикальный дефект $90^\circ - \alpha$ будет меньше третьего критического, поэтому произойдет частичная трансформация поперечной волны в продольную, направленную в сторону дна ОК. Продольная волна далее отразится от дна ОК и будет принята другим преобразователем.

Еще один вариант, называемый *К-метод*, предусматривает расположение преобразователей по разные стороны изделия, например располагают приемник в точке С.

❖ *Дельта-метод* (рис. 17.3, в) основан на приеме преобразователем для продольных волн 4, расположенным над дефектом, рассеянных на дефекте волн, излученных преобразователем для поперечных волн 2.

❖ *Дифракционно-временной метод* (рис. 17.3, г), в котором излучатели 2 и 2', приемники 4 и 4' излучают и принимают либо продольные, либо поперечные волны, причем могут излучать и принимать разные типы волн. Преобразователи располагают так, чтобы получать максимумы эхо-сигналов волн, дифрагированных на концах дефекта. Измеряют амплитуды и время прихода сигналов от верхнего и нижнего концов дефекта.

❖ *Реверберационный метод* (рис. 17.3, д) использует влияние дефекта на время затухания многократно отраженных ультразвуковых

импульсов в контролируемом объекте. Например, при контроле клееной конструкции с наружным металлическим слоем и внутренним полимерным слоем дефект соединения препятствует передаче энергии во внутренний слой, что увеличивает время затухания многократных эхо-сигналов во внешнем слое. Отражения импульсов в полимерном слое обычно отсутствуют вследствие большого затухания ультразвука в полимере.

Физические явления при проведении акустического НК комбинированными методами

В комбинированных методах используют принципы как прохождения, так и отражения акустических волн.

❖ *Зеркально-теневой метод* основан на измерении амплитуды донного сигнала. На рис. 17.4, а отраженный луч условно смещен в сторону. По технике выполнения (фиксирует эхо-сигнал) его относят к методам отражения, а по физической сущности контроля (измеряют ослабление сигнала, дважды прошедшего изделие в зоне дефекта) он близок к теневому методу.

❖ *Эхо-теневой метод* основан на анализе как прошедших, так и отраженных волн (рис. 17.4, б).

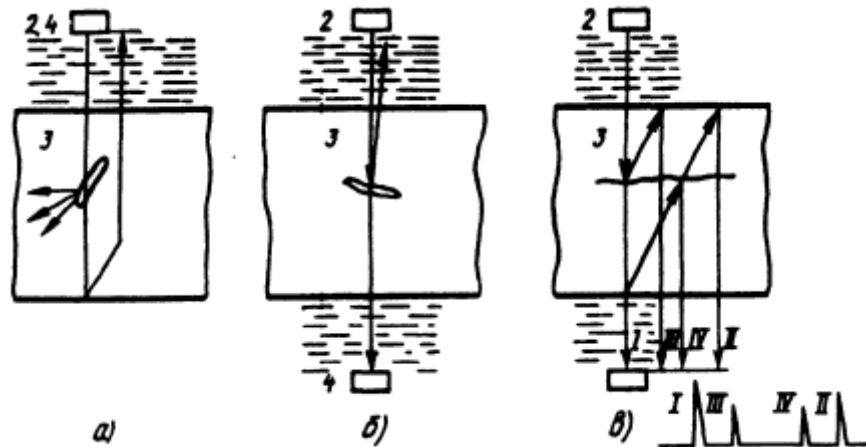


Рис. 17.4. Комбинированные методы, использующие прохождение и отражение: а – зеркально-теневой; б – эхо-теневой; в – эхо-сквозной:

2 – излучатель; 4 – приемник; 3 – объект контроля

❖ В *эхо-сквозном методе* фиксируют сквозной сигнал I, сигнал II, испытавший двукратное отражение в изделии, а в случае появления полупрозрачного дефекта также сигналы III и IV, соответствующие отражениям волн от дефекта и испытавших также отражение от верхней и нижней поверхностей изделия. Большой непрозрачный дефект обнаруживают по исчезновению или сильному уменьшению сигнала I, т.е. теневым методом,

а также сигнала *II*. Полупрозрачные или небольшие дефекты обнаруживают по появлению сигналов *III* и *IV*, которые являются главными информационными сигналами.

❖ *Реверберационно-сквозной* (акустико-ультразвуковой) метод сочетает признаки метода многократной тени и ультразвукового реверберационного методов. На ОК небольшой толщины на расстоянии порядка 20 см друг от друга устанавливают прямые излучающий и приемный преобразователи. Излученные импульсы продольных волн после многократных отражений от стенок ОК достигают приемника. Наличие в ОК неоднородностей меняет условия прохождения импульсов.

Дефекты регистрируют по изменению амплитуды и спектра принятых сигналов. Основная область применения контроль соединений в многослойных конструкциях и изделий из слоистых пластиков.

Физические основы методов собственных частот

Методы собственных частот основаны на измерении собственных частот (или спектров) колебаний контролируемых объектов. Собственные частоты измеряют при возбуждении в изделиях как вынужденных, так и свободных колебаний. Свободные колебания обычно возбуждают механическим ударом, вынужденные воздействием гармонической силы меняющейся частоты.

Различают интегральные и локальные методы. В интегральных методах анализируют собственные частоты изделия, колеблющегося как единое целое, в локальных – колебания отдельных его участков.

Методы собственных частот, использующие вынужденные колебания.

❖ В *интегральном методе* генератор 1 (рис. 17.5, *a*) регулируемой частоты соединен с излучателем 2, возбуждающим упругие колебания (обычно продольные или изгибные) в контролируемом изделии 3. Приемник 4 преобразует принятые колебания в электрический сигнал, который усиливается усилителем 5 и поступает на индикатор резонанса 6. Регулируя частоту генератора 1, измеряют собственные частоты изделия 3. Диапазон применяемых частот до 500 кГц.

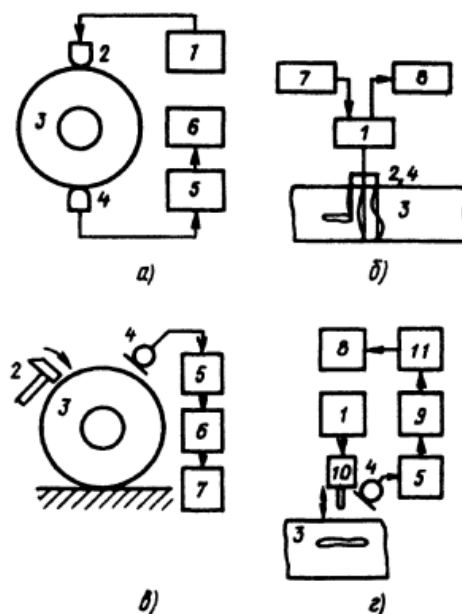


Рис. 17.5. Методы собственных частот. Методы колебаний: вынужденных (*а* – интегральный, блокальный); свободных (*в* – интегральный, *г* – локальный): 1 – генератор непрерывных колебаний меняющейся частоты; 2 – излучатель; 3 – объект контроля; 4 – приемник; 5 – усилитель; 6 – индикатор резонанса; 7 – модулятор частоты; 8 – индикатор; 9 – спектроанализатор; 10 – ударный вибратор; 11 – блок обработки информации

❖ *Локальный метод* с использованием вынужденных колебаний известен как ультразвуковой резонансный метод. Его применяют в основном для измерения толщин. В стенке изделия 3 (рис. 17.5, б) с помощью преобразователей 2, 4 (обычно это совмещенный преобразователь) возбуждают упругие волны (обычно продольные) непрерывно меняющейся частоты. Фиксируют частоты, на которых отмечаются резонансы системы преобразователь изделие. По резонансным частотам определяют толщину стенки изделия и наличие в нем дефектов.

Дефекты, параллельные поверхности, меняют измеряемую толщину, а расположенные под углом к поверхности приводят к исчезновению резонансов. Диапазон применяемых частот до нескольких мегагерц.

Методы собственных частот, использующие свободные колебания

Методы собственных частот, использующие свободные колебания, также делят на интегральные и локальные.

❖ В *интегральном методе* в изделии 3 (рис. 17.5, а) ударом молотка 2 возбуждают свободнотухающие колебания. Эти колебания принимают микрофоном 4, усиливают усилителем 5 и фильтруют полосовым фильтром 6,

пропускающим только сигналы с частотами, соответствующими выбранной моде колебаний. Частоту измеряют частотомером 7. Признаком дефекта служит изменение (обычно снижение) частоты. Как правило, используют основные собственные частоты, не превышающие 15 кГц.

❖ В *локальном методе* (рис. 17.5, *з*) возбуждаемый генератором 1 вибратор 10 создает периодические удары по контролируемому изделию. Электрические сигналы с приемного микрофона 4 через усилитель 5 поступают на спектроанализатор 9. Выделенный последним спектр принятого сигнала обрабатывается решающим устройством 11, результат обработки появляется на индикаторе. Кроме микрофонов применяют пьезоприемники.

Дефекты регистрируют по изменению спектра принятого импульсного сигнала. В отличие от интегрального метода контроль выполняется путем сканирования изделий. Обычный диапазон рабочих частот от 0,3 до 20 кГц.

Физические основы пассивных акустических методов

Пассивные акустические методы основаны на анализе упругих колебаний волн, возникающих в самом контролируемом объекте.

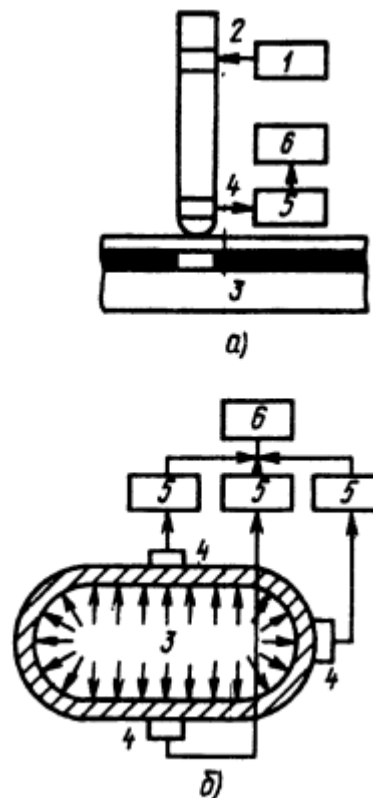


Рис. 17.6. Методы контроля: *а* – импедансный; *б* – акустико-эмиссионный;
 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – объект контроля; 4 – приемник;
 5 – усилитель; 6 – блок обработки информации с индикатором

❖ Наиболее характерным пассивным методом является *акустико-эмиссионный метод* (рис. 17.6, б). Явление акустической эмиссии состоит в том, что упругие волны излучаются самим материалом в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры. Такие явления, как возникновение и развитие трещин под влиянием внешней нагрузки, аллотропические превращения при нагреве или охлаждении, движение скоплений дислокаций, наиболее характерные источники акустической эмиссии. Контактирующие с изделием пьезопреобразователи принимают упругие волны и позволяют установить место их источника (дефекта).

❖ Пассивными акустическими методами являются *вибрационно-диагностический* и *шумодиагностический*. При первом анализируют параметры вибраций какой-либо отдельной детали или узла (ротора, подшипников, лопатки турбины) с помощью приемников контактного типа, при втором изучают спектр шумов работающего механизма, обычно с помощью микрофонных приемников.

По частотному признаку акустические методы делят на низкочастотные и высокочастотные. К первым относят колебания в звуковом и низкочастотном (до нескольких десятков кГц) ультразвуковом диапазонах частот, ко вторым колебания в высокочастотном ультразвуковом диапазоне частот: обычно от нескольких сотен кГц до 20 МГц. Высокочастотные методы обычно называют ультразвуковыми.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. На какие две большие группы делят все методы акустического НК?
2. Можно ли применять термин «теневой метод» вместо термина «метод прохождения» акустического вида НК?
3. Перечислите методы акустического НК, относящиеся к методам прохождения?
4. Перечислите методы акустического НК, относящиеся к методам отражения?
5. На чем основаны методы собственных частот в акустическом виде НК?
6. Чем различаются интегральные и локальные методы собственных частот акустического вида НК?
7. Какие пассивные акустические методы НК Вам известны?

Уровень курса

1. Физические явления при проведении акустического НК методами прохождения.
2. Физические явления при проведении акустического НК методами отражения.
3. Физические явления при проведении акустического НК комбинированными методами.
4. Физические основы методов собственных частот, использующих вынужденные колебания.
5. Физические основы методов собственных частот, использующих свободные колебания.
6. Физические основы пассивных акустических методов.

Лекція № 18

Тема: Физические основы оптического неразрушающего контроля**Оглавление**

| | |
|--|---|
| Электромагнитный спектр | 2 |
| Физические явления, лежащие в основе оптического неразрушающего контроля | 3 |
| Основы оптической радиометрии | 4 |
| Измерение светового потока по световому ощущению | 6 |
| Контрольные вопросы по теме | 7 |
| Уровень модуля..... | 7 |
| Уровень курса..... | 8 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева.
3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

Электромагнитный спектр

В зависимости от частоты (или длины волны в вакууме), а также способа излучения и регистрации различают несколько видов электромагнитных волн: радиоволны, оптическое излучение, рентгеновское излучение и гамма-излучение.

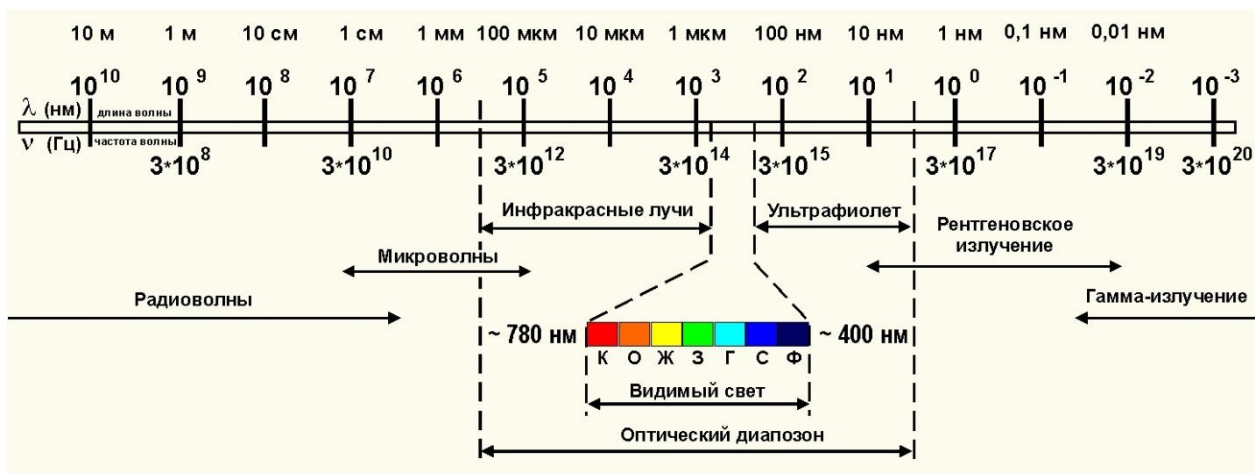


Рис. 1 Диапазоны спектра электромагнитных волн

Радиоволнами называют электромагнитные волны, длина которых в вакууме $\lambda > 1 \cdot 10^{-4}$ м (соответственно, частота меньше $3 \cdot 10^{12}$ Гц).

Оптическим излучением, или **светом**, называют электромагнитные волны, длины которых в вакууме лежат в диапазоне от 10 нм до 1 мм (границы условны). К оптическому излучению относят инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения.

Инфракрасным излучением (ИК) называют электромагнитное излучение, длины волн которого в вакууме лежат в пределах от 1 мм до 770 нм.

Видимым излучением (видимым светом) называют электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме от 380 до 770 нм, которое способно непосредственно вызывать зрительное ощущение в человеческом глазе.

Ультрафиолетовым излучением (УФ) называют электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме от 380 до 10 нм.

Рентгеновским излучением (рентгеновскими лучами) называют электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме, лежащими в диапазоне с условными границами от 10–100 нм до 0,01–1 нм.

Гамма-излучением (гамма-лучами) называют электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме менее 0,1 нм.

Физические явления, лежащие в основе оптического неразрушающего контроля

Оптический неразрушающий контроль (ОНК) основан на анализе взаимодействия оптического излучения (ОИ) с объектом контроля (ОК).

Оптическое излучение или свет – электромагнитное излучение с длиной волны $10^{-3} \dots 10^3$ мкм, в котором принято выделять ультрафиолетовую (УФ), видимую и инфракрасную (ИК) области спектра с длинами волн соответственно $10^{-3} \dots 0,38$; $0,38 \dots 0,78$ и $0,78 \dots 10^3$ мкм. Далее речь пойдет в основном о видимой части и в некоторой степени УФ-части спектра.

Возникновение ОИ связано с движением электрически заряженных частиц (электроны, атомы, ионы, молекулы). Дискретные спонтанные или индуцированные переходы носителей зарядов с более высоких на более низкие уровни энергии сопровождаются испусканием световых квантов (фотонов) с энергией, равной разности энергий этих уровней. Энергия фотона $E = h\nu$, где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка; ν – частота излучения, Гц.

Скорость распространения ОИ в вакууме $c_0 = 299792,5$ км/с. В реальных средах ОИ распространяется со скоростью $v = c_0/n = \lambda_0\nu/n = \lambda\nu$, где $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ – показатель преломления среды; ϵ и μ – соответственно относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; λ_0 и λ – соответственно длина волны света в вакууме и среде.

Информационными параметрами ОИ являются пространственно-временные распределения его амплитуды, частоты, фазы, поляризации и степени когерентности. Для получения дефектоскопической информации используют изменение этих параметров при взаимодействии ОИ с ОК в соответствии с явлениями интерференции, дифракции, поляризации, преломления, отражения, поглощения, рассеяния, дисперсии света, а также изменения характеристик самого ОК под действием света в результате эффектов фотопроводимости, фотохромизма, люминесценции, электрооптических, механооптических (фотоупругость), магнитооптических, акустооптических и других явлений.

Основными информационными параметрами объектов оптического контроля являются их спектральные и интегральные фотометрические характеристики, которые в общем случае зависят от строения вещества, его температуры, физического (агрегатного) состояния, микрорельефа, угла падения излучения, степени его поляризации, длины волны.

К числу дефектов, обнаруживаемых неразрушающими оптическими методами, относятся пустоты (нарушения сплошности), расслоения, поры, трещины, включения инородных тел, внутренние напряжения, изменения

структуры материалов и их физико-химических свойств, отклонения от заданной геометрической формы и т.д.

С помощью оптических методов внутренние дефекты выявляются только в изделиях из материалов, прозрачных в оптической области спектра.

Основы оптической радиометрии

Основной характеристикой ОИ является поток излучения (мощность светового потока) $\Phi = dQ/dt$, где Q - энергия, Дж; t - время, с. Наиболее распространенная единица измерения потока излучения – Ватт (Вт).

Поверхностной плотностью излучения M_e , или энергетической светимостью, называется отношение испускаемого поверхностью по одну сторону от себя, т.е. в полусфере, полного лучистого потока к площади этой поверхности

$$M_e = \frac{d\Phi}{dS_1}, \text{ Вт/м}^2$$

Облученностью, или энергетической освещенностью L , называется отношение лучистого потока $d\Phi$, падающего нормально на какую-либо поверхность, к площади этой поверхности dS_2 , т.е.

$$E_e = \frac{d\Phi}{dS_2}, \text{ Вт/м}^2.$$

Силой излучения, или энергетической силой света, называется отношение лучистого потока $d\Phi$ к телесному углу $d\omega$, в пределах которого он распространяется, т.е.

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\omega}, \text{ Вт/ср.}$$

Это соотношение действительно для точечного источника излучения, т.е. тела, имеющего малые размеры по сравнению с расстояниями, на которых рассматривается его действие.

Энергетической яркостью излучающей поверхности в данном направлении называется отношение измеренной в этом направлении энергетической силы света к видимой площади излучающей поверхности, т.е.

$$L_{e\alpha_1} = \frac{dI_{e\alpha_1}}{dS_{1\alpha_1}}$$

где $dl_{e\alpha_1}$ – сила излучения в данном направлении α_1 ; $dS_{1\alpha_1}$ – видимая площадь элемента поверхности dS_1 в направлении, образующем угол α_1 с нормалью к элементу dS_1 .

Так как $dS_{1\alpha_1} = dS_1 \cos \alpha_1$, то

$$L_{e\alpha_1} = \frac{dl_{e\alpha_1}}{dS_1 \cos \alpha_1}$$

Для источников излучения, имеющих яркость, одинаковую во всех направлениях, справедлив закон Ламберта, согласно которому сила света излучающей поверхности пропорциональна косинусу угла излучения. Для поверхностей, подчиняющихся этому закону,

$$dl_{e\alpha_1} = dl_{e0} \cos \alpha_1 = L_e dS_1 \cos \alpha_1$$

Известно следствие из закона Ламберта, по которому устанавливается связь между энергетическими яркостью и светностью косинусного излучателя, а именно

$$M_e = \pi L_e$$

Это же соотношение действительно и для диффузно отражающих или диффузно пропускающих тел. Если коэффициент диффузного отражения тела ρ известен, то энергетическая яркость такого тела при облученности на нем E равна

$$L_e = \rho \frac{E_e}{\pi}$$

Качественными характеристиками вышеуказанных величин являются их спектральные характеристики, такие, например, как спектральная интенсивность плотности излучения r_λ , являющаяся величиной плотности излучения, приходящейся на интервал $\lambda \dots (\lambda + \Delta\lambda)$, или спектральная плотность яркости b_λ . Связь между интегральными и спектральными характеристиками выражается как

$$M_e = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda, \text{ или } L_e = \int_0^\infty b_\lambda d\lambda$$

Измерение светового потока по световому ощущению

Если оценивают мощность лучистой энергии по производимому ею световому ощущению, то переходят к световому потоку и соответствующим световым единицам. Определения световых единиц аналогичны определениям соответствующих энергетических.

В видимой области спектра применяют систему световых единиц, соответствующую зрительному ощущению лучистых потоков с учетом спектральной чувствительности глаза. Единицей светового потока является люмен (1 лм = 1/683 Вт для $\lambda = 0,55$ мкм), сила света измеряется в канделах (кд), освещенность E – в люксах (лк), яркость – кд/м² (1 кд = лм/ср, 1 лк = 1 лм/м²).

Человеческий глаз неодинаково чувствителен к излучению различных длин волн. Если измерить лучистый поток в диапазоне длин волн $\lambda \dots (\lambda + \Delta\lambda)$ для какого-нибудь излучателя и световой поток, т.е. поток, воспринимаемый глазом в том же диапазоне спектра, то отношение светового потока dF_λ к лучистому потоку $d\Phi_\lambda$ называется коэффициентом видности

$$K_\lambda = \frac{dF_\lambda}{d\Phi_\lambda}$$

Отношение коэффициента видности для какой-либо длины волны излучения λ к максимальному значению K_λ называется коэффициентом относительной видности

$$V_\lambda = \frac{k_\lambda}{k_{\lambda\max}}$$

Величину $k_{\lambda\max}$ называют также световым эквивалентом лучистого потока. В качестве численного значения принято $k_{\lambda\max} = 683$ [лм/Вт].

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

1. Какие виды электромагнитных волн вам известны?
2. Расположите виды электромагнитных волн в порядке возрастания частоты излучения.
3. Расположите виды электромагнитных волн в порядке возрастания длины волны.
4. Какое электромагнитное излучение носит название "радиоволны"?
5. Укажите пределы оптического диапазона электромагнитных волн.
6. Какая часть оптического диапазона относится к инфракрасному излучению?
7. Какая часть оптического диапазона относится к видимому излучению?
8. Какая часть оптического диапазона относится к ультрафиолетовому излучению?
9. Укажите границы диапазонов рентгеновского и гамма излучений.
10. На каком взаимодействии основан оптический вид НК?
11. Как возникает оптическое излучение?
12. Какова скорость распространения оптического излучения в вакууме?
13. Каким образом скорость распространения оптического излучения в прозрачной среде связана с показателем преломления этой среды?
14. Каким образом показатель преломления среды связан с относительной магнитной и диэлектрической проницаемостью этой среды?
15. Какие параметры являются информационными при проведении оптического неразрушающего контроля?
16. Вследствие каких физических явлений может происходить изменение параметров оптического излучения?
17. Какие дефекты могут быть обнаружены с помощью оптического вида неразрушающего контроля?
18. Что такое поверхностная плотность излучения?
19. Что такое облученность (энергетическая освещенность)?
20. Что такое сила излучения?
21. Что такое энергетическая яркость излучающей поверхности?
22. Какие световые единицы применяются при измерении светового потока?
23. В каких случаях вместо энергетических единиц измерения мощности оптического излучения используют световые единицы?
24. Какие световые единицы применяются при измерении силы света?
25. Какие световые единицы применяются при измерении освещенности?

26. Какую величину называют коэффициентом видности?

27. Какую величину называют коэффициентом относительной видности?

Уровень курса

1. Электромагнитный спектр.
2. Физические явления, лежащие в основе оптического неразрушающего контроля.
3. Основы оптической радиометрии.
4. Измерение светового потока по световому ощущению.

Лекція № 19

Тема: Физические основы оптического неразрушающего контроля
(продолжение)

Оглавление

| | |
|---|----|
| Физические основы взаимодействия излучения и вещества..... | 2 |
| Отражение света..... | 4 |
| Поглощение света | 5 |
| Рассеяние света..... | 6 |
| Преломление света..... | 7 |
| Устройство приборов для проведения визуального оптического контроля | 8 |
| Принцип действия приборов для измерения размеров и перемещений | 12 |
| Контрольные вопросы по теме | 14 |
| Уровень модуля..... | 14 |
| Уровень курса..... | 14 |

Источники:

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В.Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003, 656 с., ил.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге – М.: Машиностроение, 2004. - 854 с.: ил..
3. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения. Справочное пособие.

Физические основы взаимодействия излучения и вещества

Эффекты взаимодействия света и вещества с гомогенной изотропной средой могут быть описаны единым параметром – комплексным показателем преломления N (КПП) с учетом его зависимости от частоты, температуры, напряжений и других факторов:

$$N = n - ik,$$

где действительная часть n определяет скорость света в среде, а главный показатель поглощения k – затухание ОИ. Для немагнитных веществ (магнитная проницаемость $\mu = 1$)

$$n = \sqrt{\varepsilon},$$

где ε – диэлектрическая постоянная.

Для металлов связь их оптических постоянных с электрическими характеристиками задается уравнениями:

$$n^2(1 - k^2) = \varepsilon \quad \text{И} \quad n^2k = 2\pi\sigma/\omega,$$

где σ – удельная проводимость; ω – круговая частота излучения.

Вещества можно разделить на:

- однородные, отражение света (ОС) которых сводится к свойствам гладкой поверхности;
- однородные, для описания ОС которых используется модель плоского слоя (или системы слоев);
- вещества с шероховатой границей раздела сред в приповерхностной области;
- неоднородные вещества с объемной системой неоднородностей, описываемые моделью типа совокупности рассеивающих слоев.

По численным значениям КПП можно выделить:

- сильнопоглощающие вещества с $k > 10$ (металлы и т.п.) и высокой отражательной способностью, оптические свойства которых определяются характеристикой поверхности;
- слабопоглощающие вещества с $k < 0,01$ (вода, газы, некоторые стекла и т.п.) с низкой отражательной способностью, определяемой практически полностью величиной n ;
- вещества с $0,01 < k < 0,1$ (полупроводники), отражательная и излучательная способность которых существенно зависят от толщины слоя материала;

- вещества с $0,1 < \kappa < 10$ (тонкослойные покрытия и т.п.), отражательная способность которых зависит и от толщины слоя, и от значения κ .

Спектральные характеристики оптических свойств определяются совокупностью значений КПП для различных частот излучения. Как правило, спектр КПП находят экспериментально.

Взаимосвязь основных оптических констант вещества – показателя преломления и показателя поглощения – определяется интегральным уравнением Крамерса-Кронинга, позволяющим вычислить одну из констант на фиксированной частоте по известным для всего спектра значениям другой.

По спектральным свойствам материалы обычно разделяют на металлы, полупроводники и диэлектрики. Металлы характеризуются высокой отражательной способностью, особенно в ИК-области спектра, наличием точки температурной инверсии, увеличением излучательной способности в УФ-диапазоне. Их оптические свойства определяются в основном проводимостью.

Для полупроводников характерно наличие поглощения в УФ- и ИК-областях спектра, а также сильная зависимость оптических свойств от температуры.

Для диэлектриков характерно наличие зон прозрачности в широком диапазоне спектра с резкой границей поглощения.

Оптические свойства многокомпонентных рассеивающих сред (лаки, краски, окислы металлов и пр.) описывают с помощью различных моделей теории светорассеивающих (мутных) сред, например, с помощью двухпоточкового приближения. Оптические свойства веществ в монолите и в дисперсной среде могут резко различаться, например металлы хорошо отражают свет в монолитном состоянии, но в состоянии мелкодисперсной фазы обладают низкой отражательной способностью и используются в качестве поглощающих покрытий (платиновая чернь и т.д.). Диэлектрики в дисперсной фазе хорошо отражают свет в спектральных областях, соответствующих полосам поглощения монолитного материала.

Важнейшая особенность оптических свойств газов – селективность поглощения излучения. Форма и положение линий испускания (поглощения) газов сильно зависят от их концентрации и температуры.

При взаимодействии ОИ с веществом имеет место его поглощение, рассеяние, отражение и преломление.

Обозначим через $F_{0\lambda}$ падающий на вещество монохроматический поток ОИ; $F_{a\lambda}$ – поглощенный средой поток; $F_{r\lambda}$ – отраженный поток; $F_{m\lambda}$ – рассеянный поток; $F_{t\lambda}$ – вышедший из среды поток.

На основании закона сохранения энергии

$$F_{0\lambda} = F_{\alpha\lambda} + F_{\rho\lambda} + F_{m\lambda} + F_{\tau\lambda}$$

Величины $\alpha_\lambda = F_{\alpha\lambda}/F_{0\lambda}$; $\rho_\lambda = F_{\rho\lambda}/F_{0\lambda}$; $m_\lambda = F_{m\lambda}/F_{0\lambda}$; $\tau_\lambda = F_{\tau\lambda}/F_{0\lambda}$

называются соответственно спектральными коэффициентами поглощения, отражения, рассеяния и пропускания. Они показывают, какую долю от падающего потока составляют поглощенный, отраженный, рассеянный и прошедший через среду лучистые потоки.

Отражение света

Отражением света (ОС) называется эффект возвращения световой волны при ее падении на границу раздела двух сред обратно в первую среду. Различают зеркальное, диффузное и смешанное ОС.

Зеркальное ОС имеет место, если неровности поверхности малы по сравнению с длиной волны света. При этом свет отражается по законам геометрической оптики, т.е. угол падения равен углу отражения, а падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности в точке падения света.

Диффузное ОС сопровождается равномерным распределением отраженного света в пределах полусферы. Оно характерно для поверхности с неровностями порядка длины волны света, расположенными беспорядочно.

Смешанное ОС наблюдается при отражении от поверхностей с неровностями, большими длины волны света. Для него характерно преимущественное отражение в направлении зеркального ОС в сочетании с менее интенсивной диффузионной компонентой. Регулярные неоднородности поверхности приводят к появлению пространственного распределения отраженного света, характерного для явления дифракции.

ОС обычно носит селективный характер, что и определяет цветность различных тел.

ОС от гладкой поверхности диэлектрика в сильной степени зависит от поляризации падающего света и угла падения. При падении неполяризованного света на гладкую поверхность под углом Брюстера

$$i_B = \arctg(1/n)$$

где n - показатель преломления среды, отраженное излучение становится полностью поляризованным в плоскости, параллельной плоскости падения. При падении света на гладкую поверхность раздела двух сред из среды с большим показателем преломления наблюдается полное внутреннее отражение (ПВО) при углах больших

$$i_{ПВО} \geq \arcsin(n_1/n_2)$$

При этом коэффициент отражения от гладкой поверхности рассчитывают по формулам Френеля, связывающим его значение с углами падения, показателями преломления сред и состоянием поляризации падающего света. Коэффициент отражения от гладкой поверхности поглощающих сред (металлы, полупроводники) рассчитывают с использованием комплексного показателя преломления, учитывая поглощения в веществе.

Распределение отраженного света в пространстве, особенно при смешанном ОС, описывается с помощью индикатрисы коэффициента отражения. Иногда для характеристики рассеивателей используют понятие *коэффициента яркости* (β), т.е. отношение яркости (L) конкретного объекта в заданном направлении к яркости (L_0) идеального рассеивателя.

ОС, особенно при смешанном отражении, существенно зависит от геометрии освещения образца и регистрации рассеянного излучения, что необходимо оговаривать при измерениях наряду с другими факторами (спектр излучения источника, поляризация света, тип фотоприемника и пр.)

Поглощение света

Поглощение света (ПС) - уменьшение энергии световой волны в веществе вследствие преобразования ее во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного излучения (люминесценция), имеющего иной спектральный состав и иные направления распространения.

Для твердых веществ характерно собственное поглощение, обусловленное взаимодействием света с кристаллической решеткой, и характеристическое (селективное) поглощение, возникающее вследствие колебаний и вращений молекул и приводящее к появлению полос резонансного поглощения.

Газы обладают в основном избирательным поглощением.

Ослабление монохроматического света в гомогенной изотропной среде за счет поглощения описывается законом Бугера

$$F_{a\lambda} = F_{0\lambda} \exp(-a_\lambda X)$$

где X - длина пути света в среде; $F_{0\lambda}$ - падающий поток; $F_{a\lambda}$ - поток, прошедшего сквозь среду; a_λ - спектральный показатель поглощения среды, мм^{-1} ;

$$a_\lambda = 4\pi k/\lambda$$

где k - главный показатель поглощения среды.

Ослабление полихроматического излучения определяют интегрированием соответствующих потоков по длинам волн.

Рассеяние света

Рассеяние света (РС) – преобразование света веществом, сопровождающееся изменением направления его распространения, поляризации и (в общем случае) частоты.

РС обусловлено его дифракцией на оптических неоднородностях среды, зависит от их размеров, концентрации и комплексного показателя преломления.

Существует большое количество разновидностей эффекта РС. Рассеяние Рэлея происходит без изменения частоты света, наблюдается при прохождении света через скопление частиц с размерами, меньшими длины его волны.

Рассеяние света может происходить на электронах среды (явление Комптона), молекулах вещества (комбинационное рассеяние), флуктуации плотности среды (рассеяние Мандельштама-Бриллюена). Рассеяние Тиндаля характерно для мутных сред с размерами частиц порядка долей длины волны света, а рассеяние Ми – для сред с частицами, размеры которых составляют несколько длин волн света.

В мощном лазерном излучении наблюдаются нелинейные эффекты – вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюена (ВРМБ) и др.

Для каждого вида рассеяния характерна своя индикатриса рассеяния. Например, при рассеянии Рэлея, Тиндаля индикатриса имеет симметричный характер, а при рассеянии Ми – резко выраженную асимметрию. Для слабо мутных сред (вода, чистый воздух, стекло) характерно малоугловое рассеяние, т.е. яркость пучка в направлении падающего на среду света значительно больше его яркости в иных направлениях.

Для сильно рассеивающих сред (молочное стекло и т.п.) характерно изотропное рассеяние.

В первом приближении ослабление ОИ за счет рассеяния может быть описано зависимостью, аналогичной закону Бугера

$$F_{m\lambda} = F_{0\lambda} \exp(-r_{\lambda} X)$$

где r_{λ} – коэффициент ослабления излучения за счет рассеяния.

Рассеяние во многих случаях носит селективный характер, поэтому при измерениях оговаривают геометрию опыта, тип источника излучения, спектральный диапазон фотоприемника и др.

Например, непрозрачные в видимом свете (сильно рассеивающие) слои некоторых красителей становятся оптически прозрачными в ИК-диапазоне спектра, что используется в ИК-интроскопии.

Суммарное ослабление света веществом за счет рассеяния и поглощения определяется *коэффициентом экстинкции* $\gamma_\lambda = r_\lambda + a_\lambda$, вводимым в формулу закона Бугера.

Преломление света

При падении пучка лучей света на границу раздела однородных гладких прозрачных сред часть его отражается под углом α_1 , равным углу падения, другая же часть проходит во вторую среду под углом α_2 , определяемым законом преломления

$$\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = n_{21}$$

Константа n_{21} есть относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой и определяется отношением скоростей света в этих средах. Абсолютный показатель преломления n_a есть отношение скорости света в вакууме к его скорости в среде. Очевидно, что

$$n_{21} = n_{2a} / n_{1a}$$

Чаще всего в технике определяют показатель преломления среды к воздуху

$$n_a = n_{\text{возд}} n_{21}$$

При нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре $n_{a \text{ возд}} = 1,00027$. При условиях измерений, отличных от нормальных, вводят поправку для реальных значений температуры, давления и влажности воздуха.

Показатель преломления определяется природой вещества и зависит от внешних условий, особенно от температуры и длины волны света. Принято указывать индексами значения температуры и длины волны света, при которых измерен показатель преломления.

Различают изотропные и анизотропные материалы. У первых (стекла, жидкости, газы) показатель преломления не зависит от направления света при измерениях. Анизотропные материалы (кристаллы и др.) характеризуются двойным лучепреломлением, т.е. расщеплением луча на два, распространяющихся с разными скоростями. Скорость одного из них ("необыкновенного") зависит от направления. Анизотропия наблюдается и у изотропных в обычных условиях веществ при сжатии и других воздействиях.

Лучи, отраженные от поверхности раздела, тоже несут информацию о показателях преломления сред. Их соотношение влияет на амплитуду, фазу и поляризацию отраженного луча, причем эти параметры зависят также от поляризации и направления падающего луча.

Преломление и отражение света от сильнопоглощающих сред (полупроводники, металлы) описываются теми же соотношениями, что и для прозрачных, но с введением комплексного показателя преломления

$$\hat{n} = n - ik$$

где k - главный показатель поглощения.

Показатель преломления зависит от плотности вещества. Функция показателя преломления $f(n)$ обычно прямо пропорциональна плотности:

$$f(n) = rd$$

где r - постоянная, характерная для конкретного вещества, называемая удельной рефракцией; d - плотность.

Дисперсия - это зависимость показателя преломления от длины волны света. Обычно при увеличении частоты показатель преломления увеличивается (нормальная дисперсия), однако в окрестности полос поглощения среды наблюдается аномальная дисперсия. Дисперсию оценивают разностью показателей преломления каких-либо длин волн $n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}$.

Устройство приборов для проведения визуального оптического контроля

Чувствительность визуального оптического контроля классифицирует по двум основным параметрам: кратность увеличения оптических средств и освещенность контролируемой поверхности. На опасных производственных объектах применяется кратность увеличения оптических средств не ниже 4-х и освещенность контролируемой поверхности не менее 500 лк.

Визуальный оптический контроль включает в себя 3 метода:

1. Наружный метод
2. Перископический метод.
3. Эндоскопический метод.

Наружный метод позволяет обследовать только легко доступные наружные поверхности объекта и широкие полости, в которые оператор может проникнуть с простыми средствами оптического контроля (оптической системой). Используя его, нельзя осматривать внутренние поверхности узких, тем более изогнутых полостей.

Оптическая система – это совокупность оптических деталей (линз, призм, зеркал и т.п.), предназначенная для определенного формирования пучков световых лучей.

К простым оптическим системам относятся зеркала, линзы, очки, лупы. Более сложные системы наружного оптического контроля – телескопы и микроскопы.

Одним из наиболее простых способов наружного оптического контроля труднодоступных поверхностей или поверхностей, наклоненных менее 30° к зрительной оси глаза, является их осмотр с помощью зеркал. Применяют плоские зеркала и сферические.

Плоским зеркалом называют оптическую деталь с плоской отражающей поверхностью, предназначенную для изменения направления оси оптической системы. Комбинация из таких зеркал может обеспечить поворот изображения. Отражательная способность зеркала достигает 95 %.

Сферическим зеркалом называют оптическую деталь, сферическая поверхность которой является отражательной.

Линза – оптическая деталь, ограниченная преломляющими поверхностями, из которых хотя бы одна является поверхностью вращения. По оптическим свойствам линзы делят на две основные группы:

- 1) положительные, т.е. собирающие;
- 2) отрицательные, т.е. рассеивающие.

Линзы отличаются одна от другой расстоянием центров образующих их сферических поверхностей, радиусами и показателями преломления вещества, из которого они сделаны. Величина оптической силы линзы определяется фокусным расстоянием, которое зависит от кривизны преломляющих поверхностей, показателя преломления и толщины линзы. Например, двояковыпуклая линза с большой кривизной поверхностей имеет меньшее фокусное расстояние и большую оптическую силу, так как оптическая сила линзы обратно пропорциональна ее заднему фокусному расстоянию.

За единицу измерения оптической силы линзы принимают оптическую силу такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м; такая единица называется диоптрией. В промышленности диоптрия обозначается «дптр».

Например, у положительных линз с фокусным расстоянием +0.4 м оптическая сила составляет 2,5 дптр. У отрицательных линз с фокусным расстоянием -0.4 м оптическая сила -2,5 дптр. а для -4.0 м она равна -0,25 дптр.

Линзы – это средства коррекции зрения. Их можно разделить на две группы:

- 1) одноэлементные (очковые и контактные линзы, однолинзовые лупы, диафрагмы различных видов);

2) многоэлементные (многолинзовые лупы, телескопические и проекционные системы).

Лупа – это оптическая система, состоящая из одной или нескольких линз, которая предназначена для наблюдения предметов, расположенных на ограниченном расстоянии.

Промышленность выпускает лупы общего назначения различных типов и конструкций: складные, карманные, измерительные, часовые, лупы с ручкой и др. Увеличение стандартных луп от 2,5х до 25х. Измерительные лупы выпускаются с увеличением 10х.

При контроле поверхностей больших размеров сначала следует использовать лупу с небольшим увеличением, выявляя подозрительные места, а затем исследовать их лупой с большим увеличением, поскольку она имеет меньшее линейное поле зрения. Лупу нужно держать так, чтобы ее плоскость была параллельна поверхности контролируемого объекта и как можно ближе к глазу, так как при этом глаз воспринимает наибольшее количество отраженного от поверхности изделия света.

При оптическом контроле далеко расположенных поверхностей широко используются телескопические системы, которые преобразуют параллельный пучок излучения, поступающий в их входной зрачок, в параллельный, более узкий пучок излучения, выходящий через выходной зрачок системы. Фокусы таких систем находятся в бесконечности, а оптическая сила равна нулю. Такие системы называются афокальными.

Сложная телескопическая система, кроме двух составляющих основных оптических частей – положительных объектива и окуляра (труба Кеплера) и положительного объектива и отрицательного окуляра (труба Галилея), может иметь другие оптические детали, например, защитные стекла, сетки, призмы, светофильтры и т.п. Конструктивно эти детали могут быть отнесены как к объективной, так и к окулярной части.

Микроскопы предназначены для наблюдения близко расположенных предметов. Рабочие микроскопы, используемые в цехах, имеют увеличение порядка 40х, поле зрения около 5 мм. Их применяют при контроле поверхностей с гальваническими покрытиями, окрашенных и полированных поверхностей.

Микроскопы измерительные используются в машиностроении для точных измерений линейных размеров контролируемого объекта. Точность измерения линейных размеров составляет от 0,01 до 0,001 мм; угловых – от 10 до 1'; предел измерения линейных размеров – 50-200 мм.

Микроскопы металлографические используются для исследования микроструктуры металлов и других непрозрачных объектов. Работают в

отраженном свете. Увеличения от 100 до 350х. при фотографировании от 45х до 2 000х.

Перископический метод позволяет обследовать узкие длинные прямолинейные полости.

Перископы – это смотровые приборы, построенные на базе световодной трубы и линзовой оптики с механическим устройством (рис. 1).

Этим методом, к примеру, в энергетике контролируют поверхность осевых канатов роторов паровых турбин. Длина световодной трубы может достигать 6 м.

Эндоскопический метод позволяет обследовать узкие длинные искривленные полости.

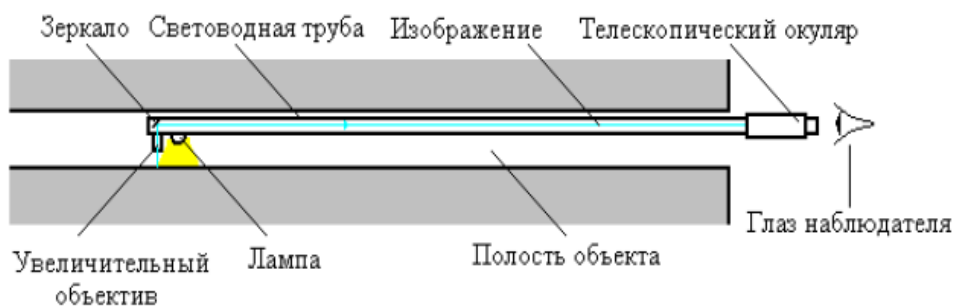


Рис. 1. Перископический метод оптического контроля прямолинейной полости

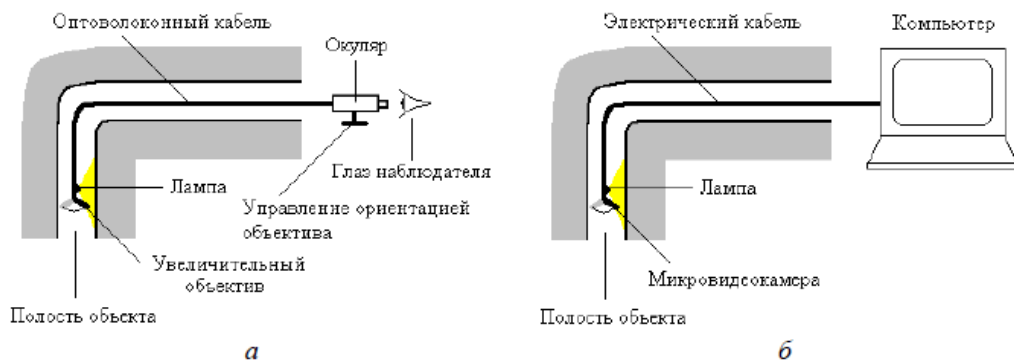


Рис. 2. Эндоскопический метод оптического контроля искривленной полости: *а* – с помощью оптоволоконного эндоскопа; *б* – с помощью компьютерного эндоскопа

Эндоскопы – это смотровые приборы, первоначально построенные на базе волоконной и линзовой оптики с механическим устройством, но в настоящее время благодаря интенсивному развитию видеоэлектроники они создаются на основе микровидеокамер. портативных компьютеров, а передающим изображение средством является обычный электрический кабель, длина которого может достигать 40 м. При этом ориентация принимающего изображение элемента относительно оси конца световода

(кабеля) дистанционно управляется в оптоволоконных эндоскопах с помощью тросика Боудена (подобно ручному тормозу велосипеда), а в современных приборах – стрелками на клавиатуре компьютера (рис. 2).

Эндоскопы применяются:

- в машиностроительных цехах для контроля цилиндрических отверстий, пересекающихся отверстий, внутренней резьбы и на других недоступных участках:

- в авиационно-космической промышленности для визуального контроля узлов двигателей, систем питания горючим, воздухом, систем управления и торможения:

- в автомобильной промышленности для контроля отливок и головок, недоступных мест масляных систем, механических и электрических конструкций, при диагностировании двигателей и т.п.;

- на электростанциях и атомных объектах для контроля лопаток турбин, генераторов, двигателей, насосов, при визуальном контроле бойлерных труб на точечную коррозию и другие дефекты, при контроле внутренних поверхностей атомных реакторов без разборки:

- в химической и нефтехимической промышленности при визуальном контроле испарительных конструкций, ректификационных блоков, камер химических реакций, цилиндров, барабанов и других типов оборудования.

В случаях, когда вредное излучение, температура или химическая среда представляет опасность для контроля или когда конфигурация объекта контроля не дает возможности его контролировать непосредственно, применяют агрегатные комплексы дистанционного оптического контроля, в состав которых входят телевизионная установка, световой прибор и системы позиционирования и транспортировки.

Принцип действия приборов для измерения размеров и перемещений

Эти приборы имеют оптические и механические элементы и применяются для измерения линейных размеров. Они бывают контактные и бесконтактные, проекционные, интерференционные, лазерные или основанные на других физических принципах.

Наибольшее распространение из них получили оптиметры, длиномеры и интерферометры.

Оптиметры – это оптико-механические приборы для измерения линейных размеров методом сравнения с мерой, основанные на использовании оптико-механического рычага. Основные типы оптиметров –

вертикальный и горизонтальный. Оптиметры применяют для измерения линейных размеров и отклонений формы особо точных деталей машин и измерительных инструментов, а также для поверки концевых мер длины 3,4 и 5-го классов точности.

Длиномеры – это оптические измерительные приборы, имеющие размерный элемент – пиноль со шкалой высокой точности, с которой сопоставляется искомый размер объекта контроля. Благодаря этому контактные измерения линейных размеров можно производить как методом сравнения с мерой, так и методом непосредственной оценки. Отсчетные устройства современных длиномеров изготавливают на базе дифракционной решетки, что позволяет отсчитывать результат с дискретностью 0,2 мкм (у оптиметра 1 мкм). Кроме того, современные длиномеры электрифицированы и оснащены микро-ЭВМ, что дает возможность автоматизировать процесс измерения и обработку его результатов.

Интерферометры – это оптические измерительные приборы, использующие интерференцию. При интерференции видимого света возникает картина интерференций, т.е. ряд спектральных полос, характерных для видимого света, симметрично расположенных относительно черной полосы в середине ряда. Эта полоса служит своеобразным визиром прибора. При изменении размера объекта контроля воспринимающий элемент прибора вызывает в преобразующем устройстве прибора соответственное смещение картины интерференции на фоне непосредственной шкалы. По этой шкале отсчитываются показания интерферометра. Наиболее целесообразно использовать интерферометры для контроля и поверки концевых мер длины 1, 2, 3-го классов точности, а также для контроля и поверки проволочек, используемых при измерении среднего диаметра резьбы.

Лазерный интерферометр с микропроцессором – это интерферометр с оптическим квантовым генератором – лазером. Лазер удобен тем, что создает узконаправленный когерентный пучок света большой мощности. По сравнению с контактным интерферометром лазерный имеет большую чувствительность.

Лазерные интерферометры в основном предназначены для измерения линейных или угловых перемещений, происходящих в агрегатах машин и в устройствах, от которых требуется точность движений в процессе работы.

Контрольные вопросы по теме

Уровень модуля

Уровень курса

1. Физические основы взаимодействия излучения и вещества.
2. Отражение света.
3. Поглощение и рассеяние света.
4. Преломление света.
5. Устройство приборов для проведения визуального оптического контроля.
6. Принцип действия приборов для измерения размеров и перемещений.