

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

МАГНІТНИЙ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

Навчальний посібник

з дисципліни

“Електромагнітні методи неруйнівного контролю”

Частина 1

Київ 2012 р.

УДК 534.86

Магнітний неруйнівний контроль: Навчальний посібник / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко, В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко, К: НТУУ "КПІ". – 2012. – 139 с.

Викладено фізичні основи магнітного контролю - одного з важливих методів неруйнівного контролю. Розглянуто і систематизовано загальні відомості про магнітний неруйнівний контроль, фізичні основи магнітної дефектоскопії, конструкції ферозондів та їх основні характеристики, методи магнітної товщинометрії, прилади для контролю структури і механічних властивостей виробів з феромагнітних матеріалів. Наведена значна кількість прикладів з розрахунками та ілюстративним матеріалом, що сприяє поглибленому розумінню принципів та методів магнітного неруйнівного контролю.

Призначено для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за спеціальністю "Прилади та системи неруйнівного контролю". Може бути корисним для аспірантів та інженерів-розробників нових засобів неруйнівного контролю.

Рецензенти:

І.П. Білокур, доктор технічних наук, професор кафедри машинознавства
Національного авіаційного університету

В.О. Троїцький, доктор технічних наук, професор, завідувач відділом
неруйнівних методів контролю якості інституту електрозварювання ім. Є.О.

Патона

Навчальне видання

Зміст

Основні умовні позначення і скорочення	6
Вступ	7
Розділ 1. Загальні відомості про магнітний неруйнівний контроль.....	9
1.1. Призначення та область застосування МНК.....	9
1.2. Теоретичні основи МНК	12
1.2.1. Магнітне поле у вакуумі. Основні поняття та закони.....	13
1.2.2. Магнітне поле у речовині.....	19
1.2.3. Криві намагнічування та їх характерні параметри.....	24
1.2.4. Намагнічування феромагнітних тіл кінцевих розмірів. Коефіцієнт розмагнічування	26
Підсумок до розділу	28
Задачі	29
Контрольні запитання	31
Розділ 2. Магнітна дефектоскопія.....	33
2.1. Загальні відомості про дефектоскопію.....	33
2.2. Основні типи дефектів у виробках з металів	36
2.3. Фізичні основи магнітної дефектоскопії.....	38
2.3.1. Граничні умови для магнітного поля на межі поділу двох середовищ	38
2.3.2. Магнітне поле розсіювання дефектів.....	40
2.4. Намагнічування об'єктів контролю.....	41
2.4.1. Класифікація способів намагнічування об'єктів контролю.....	42
2.4.2. Розрахунок магнітного поля намагнічування.....	46
2.4.3. Способи намагнічування в прикладеному і залишковому полі ...	47
2.5. Розмагнічування об'єктів контролю.....	50
Підсумок до розділу	51
Задачі	52
Контрольні запитання.....	55

Розділ 3. Методи магнітної дефектоскопії	57
3.1. Магнітопорошковий метод.....	57
3.2. Магнітографічний метод (магнітні стрічки)	65
3.3. Метод магнітодіодів	69
3.4 Метод магніотранзисторів	70
3.5. Індукційний метод	70
3.6. Гальваномагнітні ефекти та їх використання в магнітній дефектоскопії.....	75
3.6.1. Метод ефекта Холла	75
3.6.2. Метод ефекта Гаусса	80
3.7. Метод ферозонда	85
3.7.1. Недиференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням	85
3.7.2. Диференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням	88
3.7.3. Способи включення ферозондів з поздовжнім збудженням	94
3.7.4. Ферозонди з поперечним збудженням	95
3.8. Метод віброзонда	99
Підсумок до розділу	104
Задачі.....	105
Контрольні запитання.....	109
Розділ 4. Магнітометрія. Контроль товщини немагнітних покриттів на виробах з феромагнітних матеріалів.....	111
4.1. Пондеромоторний метод магнітної товщинометрії	111
4.2. Магнітостатичний метод магнітної товщинометрії	114
4.3. Індуктивний метод магнітної товщинометрії	115
4.4. Індукційний метод магнітної товщинометрії	116
Підсумок до розділу	119
Задачі	120
Контрольні запитання	122
Розділ 5. Магнітна структуроскопія.....	123
5.1. Вплив методів механічної та хіміко-термічної обробки	

феромагнітних сталей на їх магнітні властивості	123
5.2. Прилади для контролю структури і механічних властивостей	
виробів з феромагнітних матеріалів	125
Підсумок до розділу ..	129
Контрольні запитання	129
Додаток А. Характеристики типових приладів магнітного неруйнівного контролю ..	130
Література	137

Основні умовні позначення та скорочення

НК – неруйнівний контроль

ОК – об'єкт контролю

q – електричний заряд частки,

\vec{V} – вектор швидкості руху частки,

B – магнітна індукція поля

B_m – магнітна індукція насичення

B_r – залишкова магнітна індукція

H – напруженість магнітного поля

H_m – напруженість магнітного поля насичення

H_c – коерцитивна сила

F_L – сила Лоренца

F_A – сила Ампера

F – магніторушійна сила

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнітна стала

μ^* – відносна магнітна проникність речовини

μ – абсолютна магнітна проникність речовини

μ_D – диференціальна магнітна проникність речовини

μ_T – абсолютна магнітна проникність тіла

Φ – магнітний потік

J – намагніченість речовини

χ – магнітна сприйнятливність

N – коефіцієнт розмагнічування

Вступ

Сучасний рівень розвитку виробництва, постійно зростаючі вимоги до надійності та безпеки експлуатації складних та коштовних інженерних споруд та технічних систем вимагають проведення 100% контролю якості продукції. Це звичайно призводить до підвищення вартості продукції. Але «економія» на контролі якості продукції може мати фатальні наслідки, призвести до великих аварій та екологічних катастроф, збитки від яких не піддаються обрахуванню. Тому провідні держави світу витрачають значні кошти на контроль якості промислової продукції – в середньому 1-3% від вартості продукції, і до 12-18% в таких галузях як атомна енергетика, літакобудування та ракетобудування.

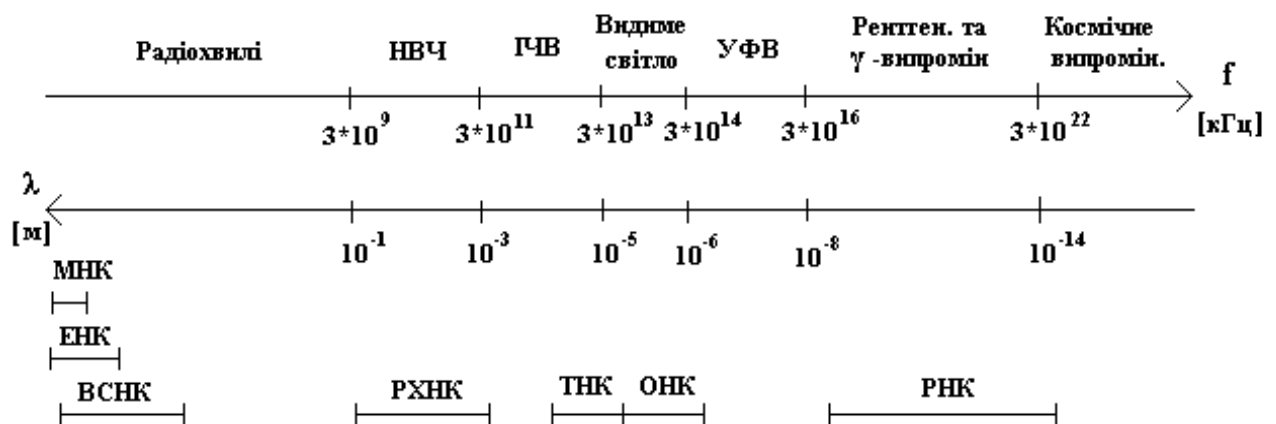
Загальновідомо, що для контролю якості продукції найбільш ефективним є застосування неруйнівного контролю. У загальному розумінні неруйнівний контроль (НК) – це сукупність методів, технічних засобів та методик їх застосування для визначення показників якості матеріалів та виробів без порушення їх властивостей та функціонування. НК базується на взаємодії об'єктів контролю (ОК) з речовинами або фізичними полями різної природи і подальшому аналізі змінених характеристик поля чи ОК або аналізі тих фізичних явищ, які супроводжують процес такої взаємодії. НК здійснюється за умов, які гарантують збереження якості матеріалів та відсутність порушень функціонування виробів після їх контролю.

Залежно від застосовуваних у НК речовин та фізичних полів ГОСТ 18353-79 “Контроль неразрушающий. Термины и определения” визначає 9 видів НК:

- МАГНІТНИЙ НК (МНК)
- ЕЛЕКТРИЧНИЙ НК (ЕНК)
- ВИХРОСТРУМОВИЙ НК (ВСНК)
- РАДІОХВИЛЬОВИЙ НК (РХНК)
- ТЕПЛОВИЙ НК (ТНК)
- ОПТИЧНИЙ НК (ОНК)
- РАДІАЦІЙНИЙ НК (РНК)

- АКУСТИЧНИЙ НК (АНК)
- КОНТРОЛЬ ПРОНИКАЮЧИМИ РЕЧОВИНАМИ (ТЕЧОШУКАННЯ ТА КАПЛЯРНИЙ КОНТРОЛЬ)

Перші 7 видів НК використовують поля електромагнітної природи. Приблизний розподіл смуги частот для різних видів НК подано нижче. Перші три види НК – магнітний, електричний та вихрострумний, в науково-технічній літературі часто об'єднуються під однією спільною назвою – електромагнітний неруйнівний контроль.



Розподіл частот електромагнітних коливань між різними видами НК

ВЧ – надвисокі частоти, ІЧВ – інфрачервоне випромінювання, УФВ – ультрафіолетове випромінювання

Восьмий вид НК – акустичний, займає особливе місце в наведеній ієрархії. Цей вид базується на використанні механічних коливань, є одним з найбільш інформативних і тому набув значного поширення в останній час [1].

В межах кожного виду розроблено багато методів та способів НК, які базуються на різних фізичних ефектах та законах. Рациональний вибір одного чи декількох методів НК може суттєво вплинути як на вартість проведення контролю, так і на його вірогідність та надійність. Оцінка потенційних можливостей різних методів для вирішення конкретних завдань НК та вибір оптимального варіанту передбачає знання основ всіх методів НК. В даному навчальному посібнику викладені теоретичні основи та особливості практичного застосування магнітного НК.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МАГНІТНИЙ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

1.1. Призначення та область застосування МНК

Магнітний НК – це НК, який ґрунтується на реєстрації магнітного поля розсіювання, яке виникає над дефектом, або на визначенні магнітних властивостей ОК. Таке визначення МНК подає ГОСТ 24450-80 "Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения" та ДСТУ EN ISO 9934-1:2005 "Неруйнівний контроль. Магнітопорошкова дефектоскопія". Під магнітним полем розсіювання розуміється локальне магнітне поле, яке виникає в зоні дефекта внаслідок магнітної поляризації його границь. Основним завданням магнітного контролю є визначення розподілу магнітного поля розсіювання у просторі над ОК в зоні дефекту. Отже магнітний контроль застосовують тільки для матеріалів та виробів, які здатні суттєво змінювати свої магнітні характеристики під впливом зовнішнього магнітного поля (поля намагнічування), тобто для контролю феромагнітних матеріалів. До таких матеріалів належать насамперед метали – Fe, Ni, Co та їх сплави, частина рідкісноземельних металів – Tb, Dy, Ho, Er, Tm, а також сплави та з'єднання цих елементів.

Перше історичне згадування про магніт залишив Пліній. Він розповів, що один пастух з острова Крит носив підковані залізом сандалі і як до цих сандалів прилипали маленькі чорні камінці, які у великій кількості знаходились на схилі гори Ідо. Римський поет Лукрецій Кар (I століття до н.е.) вважав, що магніт зобов'язаний своїй назві місцевості у Малій Азії, яка називалася Магнезія [2].

Стародавні китайці "чорні камінці" називали "чу-ші", що можна перекласти як "люблячі камінці". Вони розмірковували так: якщо щось до чогось тяжіє, то це означає, що любить. Китайці першими придумали для магніту практичне використання. На думку багатьох істориків, саме у Китаї винайшли компас. Насправді чотири тисячі років тому китайці винайшли іграшку у вигляді фігурки з витягнутою рукою, яка постійно вказувала на південь. Подібні іграшки розміщували на суднах і навіть на кінних візках. А компас було винайдено в Італії приблизно 700 років тому якимось Джойя. Тоді ж навчилися натирати природним

магнітом сталеві голки, які й використовувались в якості стрілок. Джойя розташував магнітну стрілку у середині кола з поділками. Такий прилад назвали "компасаре", що означає "вимірювати кроками" [3].

Результати дослідження магніту в епоху Відродження були узагальнені у праці англійського вченого Уильяма Гільберта "Про магніт, магнітні тіла та про великий магніт – Землю" (1600). У. Гільберт показав, що Земля – це магнітний диполь. Він також довів неможливість роз'єднання двох різнойменних полюсів магніту. Подальше вчення про магніт розвивалось у роботах Р. Декарта, Ф. Епіноуса, Ш. Кулона.

Зв'язок між магнетизмом та електрикою помітив фізик з Данії Ханс Крістіан Ерстед. Під час лекції про електрику та магнетизм він помітив, що магнітна стрілка компасу відхиляється від свого напрямку і повертається в бік провідника зі струмом. У 1820 році Х. Ерстед опублікував роботу про це явище і став відомим. Через п'ять років після цієї знаменитої лекції англійський вчений Стюрджен помістив сталевий стрижень у котушку, в якій протікав струм. Так був винайдений перший електромагніт, прототип феррозондових перетворювачів для НК [2].

Електромагніт Стюрджена піднімав вантаж вагою у 18 разів більшою ніж його власна. Учень Стюрджена Джоуль створив магніт, який піднімав вантаж вже в 200 разів більше власної ваги.

Новий етап у вивченні магнетизму почався з робіт М. Фарадея, який дав послідовну трактовку явища магнетизму на основі уявлення про реальність електромагнітного поля.

Найбільш раннє використання магнетизму як засобу контролю було зареєстровано у 1868 році. У той час в армії Великої Британії гарматні жерла перевірялись на наявність дефектів шляхом їх намагнічування і подальшого дослідження за допомогою компаса. Відхилення стрілки компаса давали можливість визначати значні тріщини [3].

Цілеспрямоване використання магнетизму у неруйнівному контролі почалось у 1920 році, коли англієць Вільям Хук помітив, що підфарбована металева

стружка може використовуватись для визначення дефектів. В. Хук відкрив, що поверхневі або підповерхневі тріщини впливають на розташування металевих частинок у магнітному полі. Це відкриття було зроблено із спостережень поведінки металевої стружки на поверхні великих металевих листів, які утримувались електромагнітом. Було встановлено, що малюнок із металевих частинок повністю відповідав поверхневим і під поверхневим дефектам (рис. 1.1).

Використання якісного феромагнітного порошку дало можливість досягти хорошої індикації й у 1928 році був створений перший магнітний дефектоскоп. У 30-ті роки ХХ століття магнітопорошковий метод практично замінив пенетрантні методи для феромагнітних матеріалів.

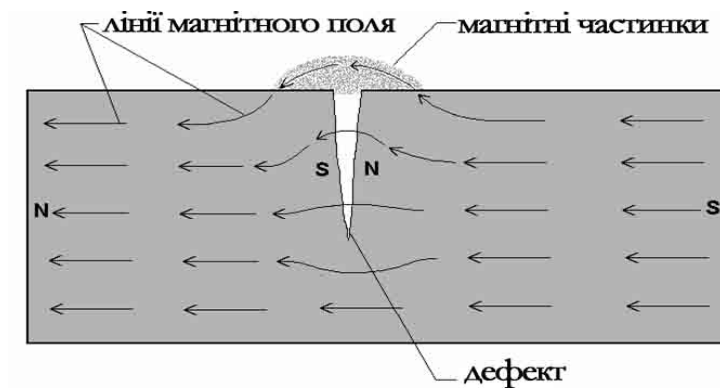


Рис. 1.1. Принцип виявлення дефектів магнітним методом контролю

За допомогою МНК розв'язують питання магнітної дефектоскопії, дефектометрії, товщинометрії та структуроскопії.

Магнітна дефектоскопія – це виявлення дефектів типу порушення суцільності матеріалу ОК методами МНК.

Магнітна дефектоскопія дозволяє виявляти дефекти типу порушення суцільності, які мають вихід на поверхню ОК або залягають на невеликій глибині у виробках з феромагнітних матеріалів, виявляють різного типу тріщини, розшарування, раковини, неметалеві чи не феромагнітні металеві включення тощо.

Магнітна дефектометрія – це вимірювання геометричних розмірів дефектів та визначення їх місцезнаходження в ОК методами МНК.

Магнітна товщинометрія – це визначення товщини шару немагнітного покриття на феромагнітній основі методами МНК.

Магнітна структуроскопія – це визначення фізико-механічних властивостей або хімічного складу ОК методами МНК. Магнітна структуроскопія дає можливість контролювати структурний стан феромагнітних матеріалів, оскільки цей стан впливає на магнітні характеристики матеріалів. Це дозволяє контролювати не тільки хімічний склад, але й визначати механічні напруження в деталях, виявляти утомні тріщини на ранніх стадіях їх розвитку тощо.

Призначені для вирішення цих питань прилади дістали відповідні назви – магнітні дефектоскопи, товщиноміри та структуроскопи.

1.2. Теоретичні основи МНК

Електромагнітне поле – це особлива форма матерії, через яку здійснюється взаємодія між електрично зарядженими частками. Електромагнітне поле може існувати як у вакуумі, так і у заповненому речовиною просторі. Початок вивчення електромагнітного поля поклав видатний голандський фізик Ханс Ерстед, який у 1819 р. зробив відкриття: електричний струм впливає на положення магнітної стрілки у просторі.



Рис. 1.2. Ханс Крістіан Ерстед (1777 – 1851)

Дослідження цього явища привело до відкриття цілої низки фізичних законів, створенню теорії електромагнетизма і її подальшому широкому практично-

му застосуванню. Основними характеристиками магнітного поля є магнітна індукція B та напруженість магнітного поля H . Розглянемо їх властивості більш детально.

1.2.1. Магнітне поле у вакуумі. Основні поняття та закони

Магнітна індукція визначається за силовою дією поля на заряджену частку. У відповідності до закону Лоренца, названого на честь відомого нідерландського фізика Х.А. Лоренца, який узгальнив експериментальні дані, сила що діє на частку (рис.1.3), яка рухається в магнітному полі, визначається як:

$$\overline{F}_L = q[\overline{V} \times \overline{B}], \quad (1.1)$$

де q – заряд частки,

\overline{V} – вектор швидкості руху частки,

\overline{B} – вектор магнітної індукції поля

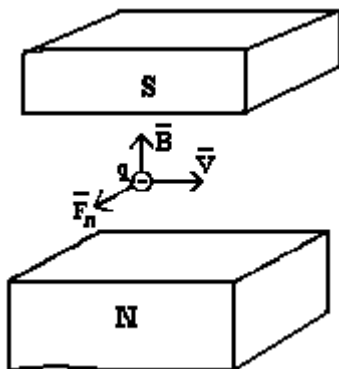


Рис. 1.3. Взаємне розташування векторів

\overline{F}_L , \overline{V} , \overline{B} при визначенні сили Лоренца

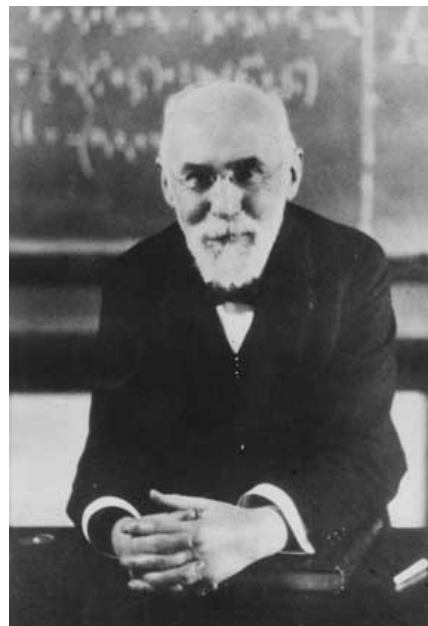


Рис. 1.4. Хендрік Антон Лоренц (1853 –1928)

В (1.1) трійка векторів \overline{F}_L , \overline{V} , \overline{B} утворює правоґвинтову систему. Напрямок вектора \overline{F}_L знаходять за правилом лівої руки. В системі СІ магнітна індукція вимірюється в теслах (індукція магнітного поля Землі становить 50 мкТл).

Застосуємо закон Лоренца до елемента провідника довжиною dl і перетином S по якому протікає стум I . Якщо позначити концентрацію заряджених часток (кількість часток в одиниці об'єму) через n , то загальна кількість часток у виділеному елементі об'єму визначиться добутком $nSdl$ і елементарна сила, яка

діє на елемент dl , дорівнюватиме:

$$d\vec{F}_A = qnSdl[\vec{V} \times \vec{B}]. \quad (1.2)$$

Оскільки напрямки \vec{V} та $d\vec{l}$ співпадають у просторі, то не порушуючи рівності векторний добуток можна представити у іншому вигляді:

$$\boxed{d\vec{F}_A = qnSV[d\vec{l} \times \vec{B}] = I[d\vec{l} \times \vec{B}]} \quad (1.3)$$

Це співвідношення називається законом Ампера, а силу (1.3) – силою Ампера. Слід зазначити, що сили Ампера і Лоренца протилежно спрямовані, оскільки напрямок руху електричних зарядів у провіднику і напрямок струму – проталегні. Відомий французький фізик А.М. Ампер не тільки відкрив механічну взаємодію електричних струмів, але й заклав підвалини електродинаміки, побудував першу теорію магнетизму.



Рис. 1.5. Андре Марі Ампер (1775 – 1836)

Магнітна індукція в системі СІ вимірюється в теслах (Тл), її зв'язок з іншими одиницями системи СІ витікає з рівнянь (1.1), (1.2):

$$[B] = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = \text{Тл}.$$

Графічно магнітне поле представляється за допомогою ліній вектора \vec{B} : напрямок дотичних до цих ліній в кожній точці співпадає з напрямком \vec{B} , а величина $|\vec{B}|$ пропорційна густині ліній.

В теорії магнітного поля фундаментальне значення відіграє теорема Гаусса, яка формулюється наступним чином: потік вектора \vec{B} через довільну замкнену поверхню S (ds – елемент поверхні) дорівнює нулю:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{s} = 0 \quad (1.4)$$

Ця теорема постулює твердження про те, що лінії вектора \vec{B} не мають ні початку, ні кінця. Отже, кількість ліній вектора \vec{B} , що входять в замкнену поверхню S , завжди дорівнює кількості ліній, що виходять з неї, і що вказує на відсутність в природі магнітних зарядів – джерел магнітного поля.



Рис. 1.6. Карл Фрідріх Гаусс (1777–1855)

Відомо, що провідник зі струмом не тільки взаємодіє з зовнішнім магнітним полем, але й створює своє власне магнітне поле. Вектор магнітної індукції цього поля пов'язаний із збуджуючим його струмом законом Біо-Савара.



Рис. 1.7. Видатний французький фізик
Жан Батіст Біо (1774–1862)



Рис. 1.8. Видатний французький фізик
Фелікс Савар (1791–1841)

Елемент струму idl (рис. 1.9) породжує у вакуумі магнітне поле з індукцією:

$$\boxed{d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{R}_0}{R^2}}, \quad (1.5)$$

де R – відстань від точки спостереження до елементу Idl ,
 \vec{R}_0 – одиничний вектор, спрямований до точки спостереження,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{м}$ – магнітна стала.

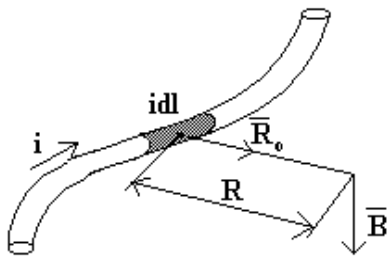


Рис. 1.9. Збудження магнітного поля навколо провідника зі струмом

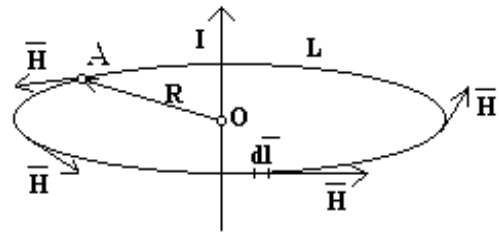


Рис. 1.10. Розрахунок поля провідника зі струмом

Для кількісної характеристики магнітних полів використовують поняття напруженості магнітного поля \vec{H} . Величина \vec{H} характерна тим, що не залежить від магнітних властивостей середовища і у вакуумі пов'язана з магнітною індукцією співвідношенням

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}. \quad (1.6)$$

Розмірність \vec{H} становить: $[\vec{H}] = \frac{B \cdot c \cdot m}{m^2 \cdot \Gamma_H} = \frac{B}{m \cdot Ом} = \frac{A}{m}$.

Закон повного струму встановлює кількісний зв'язок між циркуляцією вектора \vec{H} за замкненим контуром L та струмами I_j , що охоплені цим контуром. Цей закон в інтегральній формі дається формулою:

$$\boxed{\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_j I_j}, \quad (1.7)$$

де $d\vec{l}$ – елемент контура.

Інтеграл в (1.7) визначає магнітну дію струму і називається ще магніторушійною силою, яка вводиться для магнітних ланцюгів за аналогією з електрорушійною силою в електричних ланцюгах.

Обчислення інтеграла у (1.7) – складне завдання. Тому цей закон застосовують тоді, коли можна скористатись властивістю симетрії поля. Це значно спрощує обчислення. Як приклад розглянемо розрахунок поля окремого провідника зі струмом рис. 1.10. Визначимо \vec{H} в точці А, яка віддалена від проводу на відстань R . Проведем четез т. А коло радіусом R у площині, що перпендикулярна осі провідника. Внаслідок симетрії поля у всіх точках кола виконується умова $|\vec{H}| = const$. У всіх точках кола напрямки векторів \vec{H} та $d\vec{l}$ співпадають, тому $\cos(\vec{H}, d\vec{l}) = \cos 0 = 1$. Тоді $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = H \oint_L dl = 2\pi R H = I$, отже

$$H = \frac{I}{2\pi R}. \quad (1.8)$$

Інший важливий закон електромагнетизму – закон електромагнітної індукції або закон Фарадея (названий так на честь американського фізика М. Фарадея, якій відкрив цей закон у 1831 р.).



Рис. 1.11. Майкл Фарадей (1791 – 1867)

Згідно з цим законом, електрорушійна сила індукції в контурі прямо пропорційна швидкості зміни в часі магнітного потоку Φ через поверхню площею S , яка обмежена цим контуром:

$$E = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.9)$$

Магнітний потік в (1.9) визначається як потік вектора магнітної індукції \vec{B} через певну поверхню. Елемент магнітного потоку $d\Phi$ через малу площадку ds , в межах якої вектор \vec{B} можна вважати незмінним, виражається добутком ds на проекцію B_n вектора \vec{B} на нормаль до цієї площадки, тобто:

$$d\Phi = B_n ds \quad (1.10)$$

Магнітний потік через поверхню кінцевих розмірів S визначається як

$$\Phi = \int_S B_n ds \quad (1.11)$$

Для замкненої поверхні цей інтеграл дорівнює нулю.

Постійне магнітне поле у нерухомому контурі не викликає електрорушійної сили.

Знак “-“ в (1.9) визначає напрямок дії індукованих струмів і відбиває той факт, що створюване індукованими струмами поле намагається зкомпенсувати поле, яке його породило. Таке узагальнення було сформульовано видатним російським фізиком Е. Ленцем і відоме як „правило Ленца”.



Рис. 1.12. Емілій Хрисіанович Ленц (1804 – 1861)

1.2.2. Магнітне поле у речовині

Магнітне поле створюється електричними струмами. Молекули та іони всіх речовин містять у своєму складі елементарні заряджені частки, які перебувають у стані безперервного руху і породжують т.з. молекулярні струми. Ці струми можна умовно розглядати як такі, що замикаються у межах мікроскопічно малих об'ємів. Тому всі речовини мають магнітні властивості і можуть розглядатись як магнетики – речовини, які здатні намагнічуватись у зовнішньому магнітному полі, тобто видозмінювати або збуджувати магнітне поле.

Крім руху за деякими орбітами навколо ядер електрони ніби обертаються навколо своєї вісі. Іншими словами вони мають *спін* – свій власний магнітний момент. Побудова атомів речовини підпорядкована принципу Паулі, який вимагає, щоби у межах невеликих об'ємів більшість електронів знаходилась у парах з протилежними характеристиками. Це означає, що два електрони, розташовані в межах деякої області, повинні мати протилежні спінові моменти та орбітальні моменти. Це пояснює той факт, що більшість речовин не створює своїх сильних магнітних полів.



Рис. 1.13. Видатний швейцарський фізик-теоретик Вольфганг Паулі (1900 – 1958)

Намагнічений магнетик характеризується упорядкованістю молекулярних струмів, тому результуюче магнітне поле магнетика не дорівнює нулю. В ненамагнічених магнетиках молекулярні струми розподілені хаотично, тому їх магнітні поля компенсуються.

Слід зазначити, що в провідникових магнетиках у створенні магнітного поля беруть участь і струми провідності, які обумовлені спрямованим рухом вільних електронів (або іонів в електролітах та іонізованих газах).

Магнітний стан магнетиків характеризується вектором намагніченості \bar{J}

$$\bar{J} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum m_j}{V}, \quad (1.12)$$

де V – об'єм речовини,

\bar{m}_j – магнітний момент j -го мікроструму силою i , який дорівнює $\bar{m}_j = i \Delta S \bar{n}_o$,

ΔS – площа контура, який обтікає струм,

\bar{n}_o – одиничний вектор, спрямований перпендикулярно до площини ΔS

(рис.1.14).

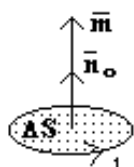


Рис. 1.14. Магнітний момент мікроструму

Складність та різноманітність атомних структур речовин породжує нескінченну множину їх магнітних властивостей. Для полегшення їх вивчення всі речовини за магнітними характеристиками поділяються на декілька класів.

Класифікація магнетиків. За характером залежності \bar{J} від напруженості зовнішнього магнітного поля \bar{H} всі магнетики поділяються на 3 великі класи: діамагнетики, парамагнетики та феромагнетики (більш детальна класифікація магнетиків ґрунтується на поглибленому вивченні природи мікрочасток, що виходить за межі даного).

Для перших двох класів виконується лінійна залежність

$$\bar{J} = \chi \bar{H}, \quad (1.13)$$

де χ – коефіцієнт пропорційності, який дістав назву *магнітної сприйнятливості*.

У діамагнетиків $\chi < 0$, а у парамагнетиків $\chi > 0$. Відповідно до знаку χ вектор \bar{J} направлений у просторі протилежно чи узгоджено з \bar{H} . До класу діамагнетиків належать N, H, Ge, Cu, Ag, Zn, Si, P, Bi, Au, HCl, H_2O та ряд інших еле-

ментів та речовин. За абсолютною величиною значення χ цих речовин дуже мале ($\sim 10^{-6} - 10^{-4}$) і майже не залежить від \bar{H} та температури.

До класу парамагнетиків належать Al, Li, Na, K, Ti, V, U, Pu, Pt та ряд інших елементів та сполук. За абсолютною величиною значення χ цих речовин лишається незначним ($\sim 10^{-5} - 10^{-1}$) і майже не залежить від \bar{H} у слабких магнітних полях, та сильно залежить від температури (змінюється обернено пропорційно). За відсутності зовнішнього магнітного поля діа- та парамагнетики немагнітні.

Намагнічування феромагнетиків. Намагнічування магнетиків третього класу, які дістали назву *феромагнетиків* від найбільш яскравого представника класу – заліза (ferrium), характеризується більш складною залежністю між \bar{H} та \bar{J} ніж (1.11). Це пов'язано, в першу чергу, з явищем гістерезиса, тобто із залежністю \bar{J} від попереднього магнітного стану феромагнетика. Щодо напрямку намагнічування, то для феромагнетиків він співпадає з напрямком \bar{H} , причому $\chi \gg 1$. Намагнічування різних класів магнетиків ілюструється рис. 1.15.

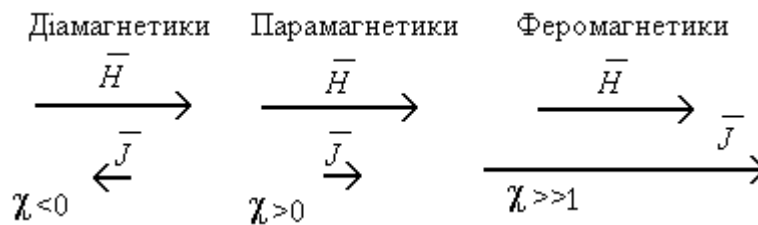


Рис. 1.15. Взаємне розташування векторів \bar{J} та \bar{H} в магнетиках

Перейдемо до більш детального розгляду феромагнітних речовин. У відповідності до сучасних поглядів теорії магнетизму у феромагнітній речовині можна виділити *домени* – малі об'єми речовини ($10^{-5} - 10^{-2} \text{ мм}^3$), в межах яких магнітні поля молекулярних струмів упорядковані і утворюють магнітне поле домену. Гіпотезу про існування в феромагнетиках областей самодовільного намагнічування сформулював у 1907 році відомий французький фізик П.Е. Вейс.

За відсутності зовнішнього магнітного поля внутрішні поля всіх доменів спрямовані хаотично (рис. 1.17,а) і тому компенсуються. На рисунку стрілками позначені напрямки магнітних моментів доменів.

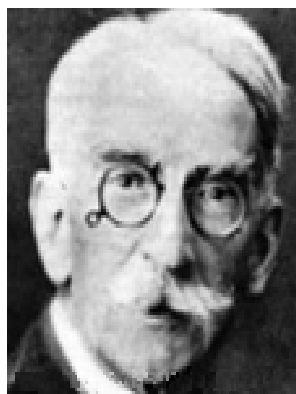


Рис. 1.16. П'єр Ернест Вейс (1865 – 1940)

Якщо феромагнетик розташувати у зовнішньому полі, то домени, магнітні моменти яких співпадають з полем, знаходяться у стані з більш низькою енергією ніж інші, тому магнітні моменти доменів починають переорієнтовуватись, прагнучи перейти в стан з низькою енергією. Внаслідок цього об'єм доменів збільшується і границі доменів починають зміщуватись. Внаслідок цього створюється загальне поле доменів а феромагнетик стає намагніченим (рис.1.17,б).

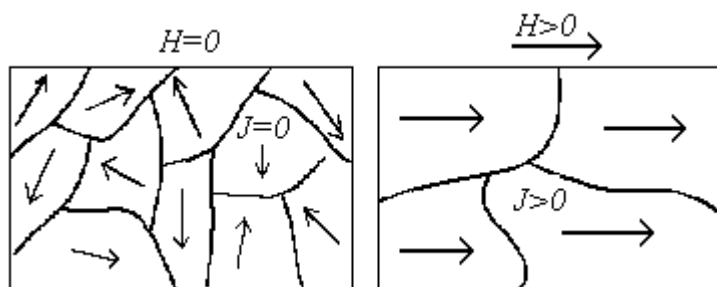


Рис. 1.17. Направлення векторів намагніченості доменів у ненамагніченому (а) та намагніченому (б) феромагнетиках

В процесі перемагнічування внаслідок наявності дефектів структури та домішок інших речовин границі доменів зміщуються не плавно, а стрибкоподібно: при збільшенні зовнішнього поля різниця енергій між двома сусідніми доменами стає достатньою для того, щоби «проштовхнути» границю домена повз дефект. Це створює ефект стрибкоподібної зміни магнітного стану речовини. Цей ефект дістав назву ефекта Г. Баркгаузена (H.G. Barkhausen) за прізвищем німецького фізика, який вперше спостерігав і дослідив цей ефект у 1919 р. Після зникнення зовнішнього поля намагнічування феромагнетика можуть лишатись намагніченими і далі збуджувати своє власне магнітне поле.

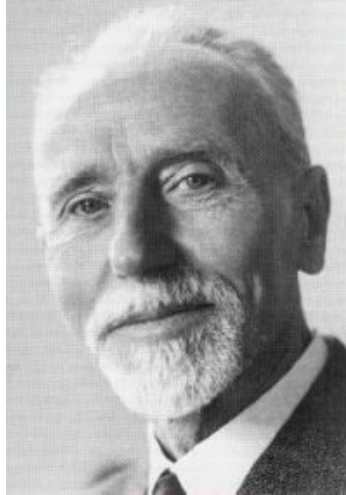


Рис. 1.18. Генрих Георг Баркгаузен (1881 – 1956)

Суттєвим є те, що орієнтація магнітних моментів доменів зберігається лише при температурах нижче критичної – т.з. температури Кюрі. При наближенні до точки Кюрі зростаючий тепловий рух атомів дезорієнтує сталий магнітний порядок у задалегідь намагніченому феромагнетикі і він перетворюється на парамагнетик (для Fe точка Кюрі становить 1043°K, для Co – 641°K).

Нелінійна залежність \bar{J} від \bar{H} у феромагнетиків дуже ускладнює аналіз магнітних явищ. Тому на практиці часто обмежуються розгляданням т.з. "ідеалізованих феромагнетиків". Суть такої заміни полягає у тому, що намагнічуваність таких магнетиків розглядають як суму індукованого намагнічування, яке лінійно залежить від \bar{H} , та постійного намагнічування \bar{J}_0

$$\bar{J} = \bar{J}_0 + \chi \bar{H} . \quad (1.14)$$

Таке спрощення приводить до лінійної моделі процесів намагнічування, формально дає можливість користуватись принципом суперпозиції магнітних полів. Для феромагнетиків $\chi = 10^4 - 10^5$. Зазначимо, що у випадку $|\bar{J}_0| \ll |\chi \bar{H}|$ приходимо до співвідношення (1.13) для діа- та парамагнетиків.

У загальному випадку індукція магнітного поля у речовині дорівнює

$$\bar{B} = \bar{B}_0 + \chi \bar{B}_0 = (1 + \chi) \bar{B}_0 = \mu^* \bar{B}_0 , \quad (1.15)$$

де μ^* – відносна магнітна проникність речовини (надалі зірочкою позначатимемо відносні величини),

\overline{B}_0 – магнітна індукція у вакуумі. Виходячи з (1.12) та (1.5) маємо

$$\overline{B}_0 = (\overline{H}_0 + \overline{J})\mu_0 = (\overline{H}_0 + \chi\overline{H}_0)\mu_0 = \mu^* \mu_0 \overline{H}_0 = \mu \overline{H}, \quad (1.16)$$

де $\mu = \mu^* \mu_0$ – абсолютна магнітна проникність,

\overline{H}_0 – напруженість магнітного поля у вакуумі.

Таким чином магнітне поле у речовині характеризується трьома векторами: \overline{B} , \overline{H} та \overline{J} , які пов'язані між собою співвідношеннями (1.14)-(1.16).

1.2.3. Криві намагнічування

Процеси перемагнічування феромагнетиків супроводжуються явищем гістерезису. Вивчення процесів гістерезису заслуговує на підвищену увагу оскільки якості ОК залежать від хімічного складу, структури, режимів термічної і механічної обробки, які одночасно суттєво впливають саме на параметри петель гістерезису.

Криві намагнічування – це графічне зображення функцій $B = f(H)$. В залежності від способу одержання цієї функції вирізняють такі типи кривих:

- *початкову* – одержують під час поступового збільшення H з вихідної точки $H=0, B=0$, тобто при намагнічуванні заздалегідь розмагніченого феромагнетика (рис.1.19).

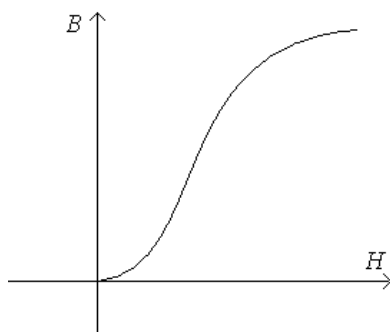


Рис.1.19. Початкова крива намагнічування

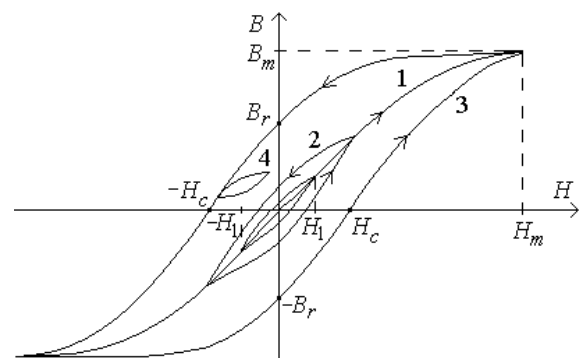


Рис.1.20. Криві намагнічування

Отримати добре відтворювану початкову криву намагнічування не видається можливим, тому її рідко використовують для характеристики феромагнетика; початкову криву намагнічування умовно можна розділити на три ділянки: на першій ділянці початкове значення магнітної проникності дорівнює

$$\mu_{\Pi} = \left. \frac{dB}{dH} \right|_{H \rightarrow 0}, \text{ а процес намагнічування є поворотним, тобто при зменшенні } H$$

магнетик повертається у вихідний стан для якого $B = 0, H = 0$; на другій ділянці

$$\mu = \mu_{\text{д}} = \frac{dB}{dH} \gg \mu_{\Pi} \text{ (диференціальна магнітна проникність) і може досягати значення } \sim 10^6;$$

$$\text{на третій ділянці } \mu_{\text{д}} = \left. \frac{dB}{dH} \right|_{H \rightarrow \infty} \rightarrow \mu_0;$$

- основну криву – одержують при циклічному перемагнічуванні феромагнетика як геометричне місце вершин симетричних петель гістерезису (рис.1.20, крива 1);
- симетричні петлі гістерезису – криві $B(H)$ отримують у випадку перемагнічування феромагнетика при плавній циклічній зміні H в симетричних границях, наприклад від $-H_1$ до $+H_1$ (рис.1.20, крива 2);
- гранична петля гістерезису – крива, для якої $H_1 > H_m$, де H_m – напруженість поля насичення (рис.1.20, крива 3), тобто крива, яка розташована в області насичення при досягненні максимального намагнічування J_m феромагнетика; подальше збільшення H не призводить до зміни розмірів петлі; значенню H_m відповідає магнітна індукція насичення B_m – це таке значення B , починаючи з якого збільшення B іде не за рахунок J , а завдяки збільшенню H (1.14);
- частинні петлі гістерезису – криві, які отримують при перемагнічуванні з початкового стану $H \neq 0, B \neq 0$ (рис.1.20, крива 4).

Характерними точками граничної петлі гістерезису є коерцитивна сила H_c та залишкова магнітна індукція B_r (рис.1.20). Коерцитивна сила H_c – це напруженість магнітного поля, яка необхідна для повного розмагнічування феромагнетика попередньо доведеного до стану насичення. Залишкова магнітна індукція

B_r – це індукція, яка залишається у попередньо намагніченому до стану насичення матеріалі після зменшення напруженості поля намагнічування до нуля.

У залежності від значення H_c феромагнітні речовини поділяються на магнітом'які та магнітотверді. Перші характеризуються малим H_c та значним μ^* . Магнітом'які матеріали – це конструктивні та електротехнічні сталі. Магнітотверді матеріали мають великі значення H_c та J , використовуються для виготовлення постійних магнітів.

За початковою кривою намагнічування визначаються наступні важливі магнітні характеристики феромагнітних речовин:

- початкова відносна магнітна проникність

$$\mu_n^* = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}, \quad (1.17)$$

- максимальна відносна магнітна проникність

$$\mu_m^* = \max \left\{ \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H} \right\}, \quad (1.18)$$

- диференціальна відносна магнітна проникність

$$\mu_d^* = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}. \quad (1.19)$$

В залежності від конкретних задач МНК, властивостей феромагнітних матеріалів з яких виготовлено ОК, продуктивності контролю можуть бути використані ті чи інші магнітні параметри та характеристики матеріалів. Найчастіше використовують наступні параметри: коерцитивну силу H_c , залишкову магнітну індукцію B_r , напруженість магнітного поля H , намагніченість речовини J , магнітну проникність речовини μ , магнітну сприйнятливність χ та деякі інші.

1.2.4. Намагнічування феромагнітних тіл кінцевих розмірів

Коефіцієнт розмагнічування

Тіла кінцевих розмірів намагнічуються у зовнішніх полях дещо інакше аніж матеріали, з яких вони виготовлені (себто маючи нескінченні у просторі ро-

зміри). При намагнічуванні тіл, які мають розімкнену форму, у зовнішньому магнітному полі з напруженістю H на кінцях тіл утворюються магнітні полюси. Внаслідок цього виникає поле розмагнічування H_p , яке діє назустріч полю H (рис.1.21). З цього приводу поле у середині тіла, розташованого вздовж магніт

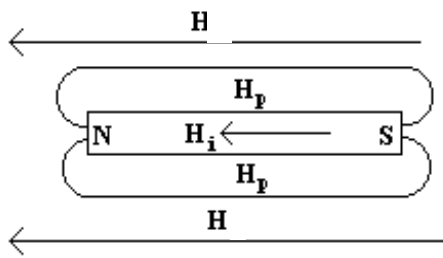


Рис.1.21. Механізм утворення поля розмагнічування

них силових ліній, дорівнює:

$$H_i = H - H_p \approx H - NJ, \quad (1.20)$$

де $N \approx H_p / J$ – коефіцієнт розмагнічування, який визначається геометричними розмірами тіла. Оскільки

$H_p \approx NJ \approx N\chi H \cong N(\mu^* - 1)H$, чим більше μ^* , тим більша розмагнічувальна дія тіла і тим менше поле у середині тіла.

Теорію намагнічування тіл кінцевих розмірів запропонував і розвинув відомий радянський вчений академік В.К. Аркадьєв. За аналогією до (1.17) відносну магнітну проникність тіла потрібно було б визначити як $\mu_T^* = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H_i}$, де B – магнітна індукція в тілі. Хоча в однорідному полі орієнтованому вздовж тіла значення B в тілі та за його межами співпадають (див. далі граничні умови на межі розділу двох середовищ), скористатись цією формулою неможливо, оскільки лишається недосяжним для вимірювання величина напруженості поля в середині тіла H_i .

Основна ідея запропонованої В.К. Аркадьєвим теорії полягає у тому, що магнітна проникність тіла визначається не через гіпотетичну величину H_i , а за допомогою доступної вимірюванню напруженості H .

Відносна магнітна проникність тіла μ_T^* визначається як

$$\mu_T^* = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\mu H_i}{H_i + H_p} = \mu^* \frac{H_i}{H_i + H_p} = \mu^* \frac{1}{1 + NJ/H_i} = \mu^* \frac{1}{1 + N(\mu^* - 1)}. \quad (1.21)$$



Рис. 1.22. Володимир Костянтинович Аркадьєв (1884–1953)

Для феромагнітних матеріалів виконується умова $\mu^* \gg 1$ тому можна вважати

$$\mu_T^* \approx \frac{1}{N}. \quad (1.22)$$

Цей, на перший погляд, парадоксальний результат свідчить про те, що магнітна проникність тіла кінцевих розмірів, що виготовлено з матеріалу з $\mu^* \gg 1$, не співпадає з магнітною проникністю речовини з якої виготовлено тіло, і не залежить від магнітних властивостей матеріалу з якого воно виготовлено, а визначається тільки його розмірами.

Підсумок до розділу

1. Електромагнітне поле є формою матерії, яка існує як у вакуумі, так і у заповненому речовиною просторі.

2. Магнітне поле по-різному взаємодіє з різними речовинами, що кількісно характеризується величиною магнітної сприйнятливості χ . В залежності від модуля і знака χ магнетика умовно поділяються на три групи: діамагнетика для яких $\chi \in (10^{-7} \div 10^{-5})$, парамагнетика, для яких $\chi \in (10^{-5} \div 10^{-1})$ та феромагнетика, для яких $\chi \in (10 \div 10^5)$. До останньої групи належать ферум, нікель кобальт та їх сплави, а також рідкоземельні метали – кадмій, тербій, диспрозій, тулій та ін.

3. Магнітний метод НК застосовують до феромагнетиків, які здатні суттєво намагнічуватись у зовнішніх магнітних полях. Характерною ознакою феромагнетиків є те що $\chi \gg 1$.

Задачі

1. Визначіть модуль сили, яка діє на електрон, що рівномірно, лінійно рухається у постійному магнітному полі з індукцією $B=1$ Тл, якщо кут між силовими лініями поля та напрямками руху становить: а) 90° ; б) 60° . Заряд електрона: $q=-1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл, швидкість електрона $V=10^5$ м/с.

Розв'язання. Запишемо закон Лоренца:

$$|\overline{F}_L| = q[\overline{B} \times \overline{V}] = qBV \sin \alpha.$$

Підставивши відомі значення, отримаємо:

а) $|\overline{F}_L| = -1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^5 \cdot \sin 90^\circ = -1.6 \cdot 10^{-14}$ Н.

б) $|\overline{F}_L| = -1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^5 \cdot \sin 60^\circ = -1.38 \cdot 10^{-14}$ Н.

Відповідь: $|\overline{F}_L| = -1.6 \cdot 10^{-14}$ Н, $|\overline{F}_L| = -1.38 \cdot 10^{-14}$ Н.

2. Яка сила діє на провідник з постійним струмом 1 мА, який розміщено в постійному магнітному полі з індукцією $B=2$ Тл. Довжина провідника $l=0,1$ м. Провідник розташований до силових ліній поля під кутом а) 90° ; б) 30° .

Розв'язання. Запишемо закон Ампера:

$$\overline{F}_A = I \cdot [d\overline{l} \times \overline{B}] = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha.$$

Підставивши відомі значення, отримаємо:

а) $F_A = 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 2 \cdot \sin 90^\circ = 2 \cdot 10^{-4}$ Н.

б) $F_A = 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 2 \cdot \sin 30^\circ = 10^{-4}$ Н.

Відповідь: $F_A = 2 \cdot 10^{-4}$ Н, $F_A = 10^{-4}$ Н.

3. Знайдіть обертальний момент сили, що діє на рамку зі струмом в постійному магнітному полі з індукцією $B = 0,01$ Тл (див. рисунок), якщо розміри рамки

становлять $l = 2$ см, $d = 5$ см, сила струму дорівнює $I = 5$ мА, кількість витків рамки $W = 100$.

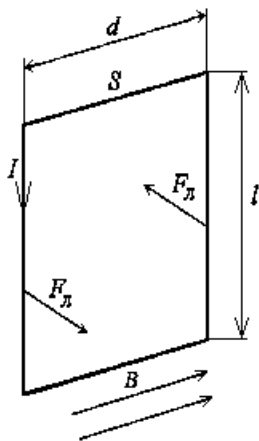


Рис. 1.22. Рисунок до задачі 3

Розв'язання. Магнітні силові лінії діють вздовж товщини рамки. Обертальний момент рамки створюється за рахунок дії на неї сили Ампера $\vec{F}_A = WI[d\vec{l} \times \vec{B}]$, напрямок якої показано на рисунку. Кут між векторами $d\vec{l}$ і \vec{B} становить 90° . Оскільки рамка містить вказану кількість витків, то формула для визначення сили Ампера матиме вигляд $F_A = IlBW \sin \alpha$. Обертальний момент цієї сили знаходимо з

формулою: $M = 2 \cdot F_A \cdot \frac{d}{2} = F_A d$. Тоді остаточна формул

матиме вигляд:

$$M = IlBdW = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0.01 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Нм.}$$

Відповідь: обертальний момент дорівнює $5 \cdot 10^{-8}$ Нм.

4. Для охолодження теплоносія атомного реактора застосовується рідкий

метал. Внаслідок взаємодії магнітного поля зі струмом (який спочатку проходить через шину, а потім по рідкому металу і знову по шині, як показано на рисунку) створюється зусилля, під впливом якого струмінь рідкого металу рухається. Визначити:

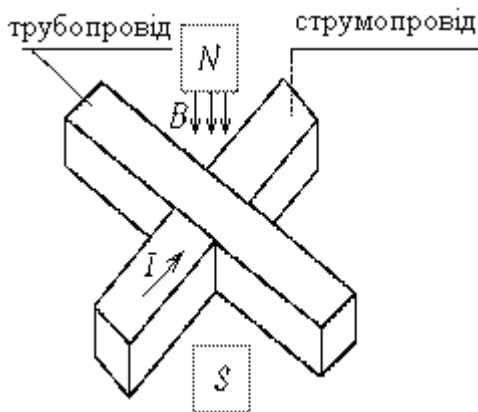


Рис. 1.23. Рисунок до задачі 4

- 1) силу, що діє на струмінь, якщо сила електричного струму 10 кА, активна довжина струменя 10 см, а індукція магнітного поля 1 Тл;
- 2) тиск в каналі рідкого металу, якщо його перетин становить 10×5 см.

Розв'язання: Визначаємо модуль сили Ампера, яка діє на частину рідкого металу, і яка розглядається як провідник зі струмом:

$$|\vec{F}_A| = I[d\vec{l} \times \vec{B}] = 10000 \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot \sin 90^\circ = 1000 \text{ Н.}$$

Визначаємо тиск в каналі рідкого металу:

$$P = \frac{|\overline{F}_A|}{S} = \frac{1000}{0,1 \cdot 0,05^2} = 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Відповідь: сила дорівнює 1000 Н, а тиск – 2000 кПа

5. Електрон (з масою $m \sim 9 \cdot 10^{-31}$ г і зарядом $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) рухається зі швидкістю $V = 10^5$ м/с у постійному магнітному полі з індукцією $B = 10$ Тл. Кут між векторами швидкості та магнітної індукції становить 90° . Визначіть радіус кругової орбіти електрона та період його обертання на орбіті.

Розв'язання. Оскільки сила Лоренца завжди перпендикулярна швидкості, це приводить до руху зарядженої частки у магнітному полі по круговій орбіті з радіусом R . Сила Лоренца зрівноважується центробіжною силою, тому

$$qVB = \frac{mV^2}{R}$$

Розв'язавши це рівняння відносно радіуса маємо:

$$R = \frac{mV}{qB} = \frac{9 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{10}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10} = 5,625 \text{ мм,}$$

а період обертання по орбіті становить

$$T = \frac{2\pi R}{V} \approx \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5,625 \cdot 10^{-3}}{10^5} \approx 3,5325 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Відповідь: електрон рухається по круговій орбіті з радіусом 5,625 мм, період обертання становить $3,5325 \cdot 10^{-7}$ с.

Контрольні запитання

1. Назвіть область застосування та основні завдання, що вирішуються за допомогою магнітного неруйнівного контролю.
2. Наведіть основні закони електромагнетизму та дайте їх фізичну інтерпретацію.
3. Якими чинниками обумовлена здатність матеріалів і речовин до намагнічування?
4. Назвіть основні класи магнетиків та дайте їх стислу характеристику.

5. В чому полягає суть доменної теорії намагнічування феромагнетиків?
6. Поясняйте значення характеристик „магнітна сприйнятливість” та „відносна магнітна проникність речовини”. Як вони зв’язані між собою?
7. Як пов’язані магнітна індукція і напруженість магнітного поля у вакуумі і речовині?
8. Наведіть характерні криві намагнічування феромагнетиків та їх параметри.
9. Дайте визначення початкової, максимальної та диференціальної відносних магнітних проникностей.
10. В чому полягає сутність теорії намагнічування тіл кінцевих розмірів В.К. Аркадьєва?
11. Як визначається коефіцієнт розмагнічування для тіл кінцевих розмірів з феромагнітних матеріалів?
12. Виведіть формулу для відносної магнітної проникності тіла та прокоментуйте її зв’язок з коефіцієнтом розмагнічування.

РОЗДІЛ 2. МАГНІТНА ДЕФЕКТОСКОПІЯ

2.1. Загальні відомості про дефектоскопію

Дефектоскопія – це комплекс методів і засобів неруйнівного контролю матеріалів і виробів з метою виявлення дефектів. Дефектоскопія включає: розробку методів і апаратури; складання методик контролю; обробку результатів контролю. Внаслідок недосконалості технології виготовлення або як результат експлуатації в тяжких умовах у виробах з'являються різні дефекти - порушення суцільності або однорідності матеріалу, відхилення від заданого хімічного складу або структури, а також від заданих розмірів. Дефекти змінюють фізичні властивості матеріалу (густина, електропровідність, магнітні, пружні властивості та ін.). В основі відомих методів дефектоскопії лежить дослідження фізичних властивостей матеріалів при дії на них рентгенівських, інфрачервоних, ультрафіолетових і гамма-променів, радіохвиль, ультразвукових коливань, магнітного і електростатичного полів.

Найпростішим методом дефектоскопії є *візуальний* – неозброєним оком або за допомогою оптичних приладів (наприклад, лупи). Для огляду внутрішніх поверхонь, глибоких порожнин і важкодоступних місць застосовують спеціальні трубки з призмами і мініатюрними освітлювачами і телевізійні трубки. Візуальна дефектоскопія дозволяє знаходити тільки поверхневі дефекти (тріщини і ін.) в металічних виробах і внутрішні дефекти у виробах зі скла або прозорих для видимого світла пластмас. Мінімальний розмір дефектів, що знаходяться неозброєним оком, складає 0,1-0,2 мм, а при використуванні оптичних систем – десятки мікрометрів.

Термоелектрична дефектоскопія ґрунтується на вимірюванні електрорушійної сили, що виникає в замкненому ланцюзі при нагріві місця контакту двох різнорідних матеріалів. Якщо один з цих матеріалів прийняти за еталон, то при заданій різниці температур гарячого і холодного контактів величина і знак термоерс визначатимуться хімічним складом другого матеріалу. Цей метод зазвичай застосовують у випадках, коли необхідно визначити марку матеріалу.

Трібоелектрична дефектоскопія заснована на вимірюванні електрорушійної сили, що виникає при терті різнорідних матеріалів. Вимірюючи різницю потенціалів між еталонними і випробовуваними матеріалами, можна розрізнити марки деяких сплавів.

Електростатична дефектоскопія використовує електростатичні поля, в яких розміщують виріб. Для виявлення поверхневих тріщин у виробах з діелектричних матеріалів (фарфору, скла, пластмас), а також з металів, покритих тими ж матеріалами, виріб обпилюють тонким порошком крейди з пульверизатора з ебонітовим наконечником (порошковий метод). Частинки крейди одержують позитивний заряд і в результаті неоднорідності електростатичного поля накопичуються у країв тріщин. Цей метод застосовують також для контролю виробів з ізоляційних матеріалів. Перед запиленням їх необхідно змочити іоногенною рідиною.

Ультразвукова дефектоскопія заснована на використанні пружних коливань, головним чином ультразвукового діапазону частот. Порушення суцільності або однорідності середовища впливає на розповсюдження пружних хвиль у виробі або на режим коливань виробу. Основні методи: ехометод, тіньовий, резонансний, власне ультразвукові методи, імпедансний і метод вільних коливань.

Капілярна дефектоскопія ґрунтується на штучному підвищенні світло- і кольороконтрастності дефектної ділянки щодо непошкодженої. Методи капілярної дефектоскопії дозволяють знаходити неозброєним оком тонкі поверхневі тріщини і інші несуцільності матеріалу, що утворюються при виготовленні і експлуатації виробів. Порожнини поверхневих тріщин заповнюють спеціальними індикаторними речовинами (пенетрантами), проникаючими в них під дією сил капілярності. Для так званого люмінесцентного методу пенетранти виготовляють на основі люмінофорів. На обчищену від надлишку пенетранта поверхню наносять тонкий порошок білого проявника (наприклад, оксид магнію, тальк), що має сорбційні властивості, за рахунок чого частинки пенетранта витягуються з порожнини тріщини на поверхню, змальовують контури тріщини і

яскраво світяться в ультрафіолетових променях. При так званому кольоровому методі контролю пенетранти складають на основі гасу з додаванням бензолу, скипидару і спеціальних фарбників (наприклад, червоної фарби).

Чутливість капілярної дефектоскопії дозволяє знаходити поверхневі тріщини з розкриттям менше 0,02 мм. Проте широке вживання цих методів обмежено через високу токсичність пенетрантів і проявників.

Електрична дефектоскопія уявляє сукупність методів та засобів, призначених для виявлення дефектів виробів і матеріалів методами електричного НК. Останні базуються на реєстрації параметрів електричного поля, яке взаємодіє з об'єктом контролю, або яке виникає в ньому внаслідок зовнішнього впливу.

Вихрострумова дефектоскопія – це сукупність методів і засобів виявлення дефектів у виробках з провідних матеріалів при їх взаємодії з вихровими струмами, що наводяться в них.

Магнітна дефектоскопія ґрунтується на виявленні полів розсіювання дефектів заздалегідь намагнічених виробів з феромагнітних матеріалів. Цей вид дефектоскопії вище буде розглянутий більш детально.

Значний внесок в розвиток теорії і практики магнітної дефектоскопії зробив видатний німецький вчений і інженер Фрідріх Фёрстер.



Рис. 2.1. Фрідріх Фёрстер (1908 – 1999)

Дефектоскопія – невід'ємна ланка технологічних процесів, яка дозволяє підвищити надійність продукції. Проте методи дефектоскопії не є абсолютними, оскільки на результати контролю впливає безліч випадкових чинників. Про відсутність дефектів у виробі можна говорити тільки з певним ступенем імовірності. Придатність виробів визначається на підставі норм бракування, що розробляються при їх конструюванні і складанні технології виготовлення. Норми бра-

кування різні для різних типів виробів, для однотипних виробів, що працюють в різних умовах, і навіть для різних зон одного виробу, якщо вони піддаються різній механічній, термічній або хімічній дії.

Дефектоскоп – пристрій для виявлення дефектів у виробках з різних матеріалів методами НК. Розрізняють дефектоскопи магнітні, рентгенівські, ультразвукові, електроіндуктивні, капілярні і ін. Дефектоскопи виконуються у вигляді переносних лабораторних приладів або стаціонарних установок. Переносні дефектоскопи зазвичай мають найпростіші індикатори для виявлення дефектів (стрілочний прилад, світловий або звуковий сигналізатор); лабораторні дефектоскопи, більш чутливі, часто оснащуються цифровими індикаторами.

2.2. Основні типи дефектів у виробках з металів

Найчастіше причиною руйнування виробів з металів є наявність дефектів виробничо-технологічного чи експлуатаційного походження. До дефектів металургійного походження можна віднести:

- *усадочні раковини* – порожнини які утворюються внаслідок зменшення об'єму рідкого металу при його твердінні,
- *бульки* – порожнини округлої форми, які утворюються внаслідок виділення газів під час кристалізації,
- *міжкристалічні тріщини* тонкі порушення суцільності, які утворюються на границі кристалів,
- *тріщини гарячі* (кристалізаційні) – звислі оксидні розриви металу, більш широкі у поверхні, звужуються вглиб, утворюються під час кристалізації металу,
- *відхилення мікроструктури* – за видом, за кількістю і величиною структурних складових від вимог стандартів,
- *газоусадочні пористості* – утворюються внаслідок підвищеної газонасиченості сплаву та інших причин,
- *газові раковини*,

- *поверхнєве окислення* – суцільні оксидні плівки чорного чи сірого кольору, заповнені порошком чорного кольору окремі раковини,
- *шлакові включення* – неметалеві оксидні включення округлої форми,
- *волосовини* – ниткоподібні дефекти у вигляді суцільних чи переривчастих стрічок довжиною від 1 до 100 мм,
- *флокени* – тонкі розриви металу округлої форми, які утворюються у деформованому металі,
- *неметалеві включення* – шлак, графіт, пісок, а також окисли, сульфіди, силікати, нітриси, які утворюються внаслідок хімічної взаємодії компонентів під час розплавлення та заливання сплаву,
- *відхилення в геометрії* та деякі інші.

До дефектів технологічного походження можна віднести:

- *рванини* – розкриті розриви, які розташовані перпендикулярно чи під деяким кутом до напрямку витяжки металу,
- *розриви від деформації* – утворюються внаслідок високих механічних напружень та малої пластичності металу,
- *штамповочні тріщини* – утворюються під час гарячої деформації металу (штампування) і мають, як правило, звивистий характер,
- *шліфовочні тріщини* – сітка павутиноподібних поверхневих розривів, що утворюються під час шліфування металу,
- *дефекти зварювання* – дефекти в зоні зварного шву у вигляді різного роду тріщин, непроварів (відсутності сплавлення між основним і наплавленим металами), пор і раковин у металі шва, відхилення геометрії зварного шва, а також деякі інші дефекти.

Експлуатаційні дефекти виникають внаслідок механічних навантажень, впливу навколишнього середовища а також дії інших експлуатаційних факторів. До їх числа відносяться:

- *тріщини* однократного та уповільненого руйнування,
- *корозійні ураження* металу,

- *розтріскування* під впливом термічних навантажень,
- *радіаційні ураження* – порушення структури та хімічних зв'язків внаслідок поглинання металом енергії випромінювання.

Способами магнітної дефектоскопії виявляють такі види дефектів металопродукції: волосовини, флокени, тріщини різного походження, корозійне розтріскування, металургічні дефекти, дефекти зварного шва тощо.

2.3. Фізичні основи магнітної дефектоскопії

Магнітна дефектоскопія за допомогою методів МНК дозволяє виявляти дефекти типу порушення суцільності які виходять на поверхню феромагнітних ОК чи розташовані на невеликій глибині у приповерхневому шарі ОК. Виявляють дефекти за локальним збуренням магнітного поля у місті розташування дефекту. Теоретичне обґрунтування такої можливості дає аналіз граничних умов для компонент електромагнітного поля на межі поділу двох середовищ.

2.3.1. Граничні умови для магнітного поля на межі поділу двох середовищ

Розглянемо граничні умови для *тангенціальної складової напруженості* поля \overline{H} на межі поділу двох середовищ рис. 2.2.

Виділимо прямокутний контур $ABCD$, який охоплює межу поділу середовищ 1 і 2 з відповідними магнітними проникностями μ_1, μ_2 та питомими електропровідностями γ_1, γ_2 . В межах цього контура струм провідності відсутній. Сторони BC та AD довжиною l розташуємо паралельно межі, а дві інші довжиною m - перпендикулярно. Спрямуємо $m \rightarrow 0$. Це дозволить рахувати складові циркуляції вектора напруженості поля вздовж сторін AB та CD рівними 0. Отже закон повного струму (1.7) для контура $ABCD$ дає

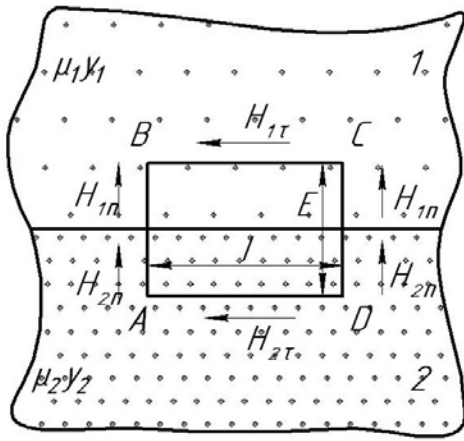


Рис. 2.2. Граничні умови для тангенціальної складової напруженості магнітного поля

$$\lim_{m \rightarrow 0} \oint_{ABCD} \bar{H} d\bar{l} = H_{1\tau} l - H_{2\tau} l = 0,$$

звідки отримаємо

$$H_{1\tau} = H_{2\tau}, \quad (2.1)$$

отже тангенціальні складові напруженості магнітного поля співпадають на межі поділу двох середовищ.

Слід зазначити, що умова (2.1) не виконується у випадку, якщо на поверхні поділу двох середовищ протікає приповерхневий струм σdl , де σ - лінійна щільність струму, dl - елемент довжини. Струм спрямований перпендикулярно площині контуру. В цьому випадку маємо

$$H_{1\tau} - H_{2\tau} = \sigma. \quad (2.2)$$

Отримаємо *граничні умови для нормальної складової вектора магнітної індукції \bar{B}* . Розглянемо потік вектора \bar{B} через поверхню призми в середині якої проходить межа поділу двох середовищ рис. 2.3.

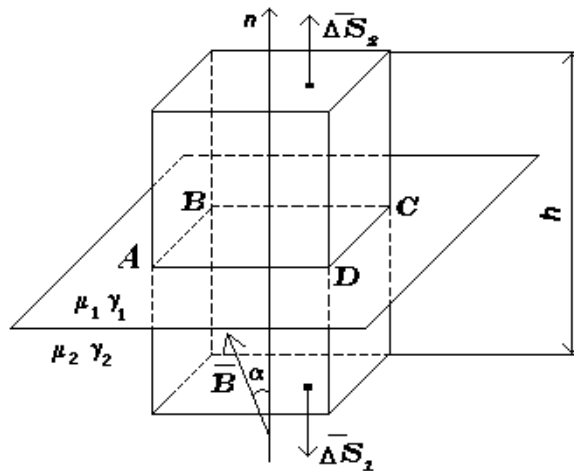


Рис. 2.3. Граничні умови для нормальної складової індукції поля

Призма перетинає границю середовищ по контуру $ABCD$, висота призми дорівнює h . Спрямуємо $h \rightarrow 0$. Тоді відоме з теорії поля інтегральне рівняння

$$\oint\oint_S \bar{B} d\bar{s} = 0,$$

яке відбиває принцип безперервності магнітних силових ліній, для виділеної поверхні S призми можна записати наступним чином

$$\lim_{h \rightarrow 0} \oint\oint_S \bar{B} d\bar{S} = (\bar{B}_2 \cdot \Delta\bar{S}_2) - (\bar{B}_1 \cdot \Delta\bar{S}_1) = B_2 \Delta S_2 \cos \alpha - B_1 \Delta S_1 \cos \alpha = 0, \quad (2.3)$$

де $\Delta S_1, \Delta S_2$ – площі граней призми, що паралельні площині перетину призми з границею середовищ. Оскільки $\Delta S_1 = \Delta S_2$, а $\alpha = 0^0$, то

$$\boxed{B_{1n} = B_{2n}}, \quad (2.4)$$

отже нормальні складові магнітної індукції співпадають на межі поділу двох середовищ.

Розглянуті граничні умови вказують на принципіальну можливість визначення складових електромагнітного поля у підповерхневому шарі ОК за результатами вимірювання характеристик поля поза межами ОК в приповерхневій зоні ОК.

2.3.2. Магнітне поле розсіювання дефектів

Розглянемо механізм виникнення поля розсіювання дефекту. ОК намагнічується у зовнішньому магнітному полі. Магнітний потік розповсюджується в ОК, зустрічає перешкоди та огинає їх (рис. 2.4).

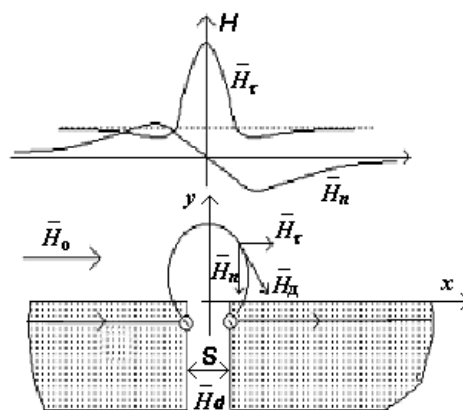


Рис. 2.4. Утворення магнітного поля розсіювання дефекту напруженістю H_d

Частина магнітних силових ліній уривається на гранях дефекту. Кінець кожної силової лінії умовно можна розглядати як певний магнітний заряд. Кожний магнітний заряд створює своє магнітне поле. Сумарне поле магнітних за-

рядів H_d називається полем розсіювання дефекту. Воно може бути розкладено на нормальну та тангенціальну складові $\overline{H}_d = \overline{H}_\tau + \overline{H}_n$. Загальний вигляд залежності цих складових від просторової координати x подано на рис.2.4.

Для ідеалізованої моделі дефекту у вигляді тріщини нескінченної глибини шириною розкриву S маємо

$$H_\tau = H_d \frac{S}{\pi} \frac{y}{x^2 + y^2}, \quad (2.5)$$

$$H_n = H_d \frac{S}{\pi} \frac{x}{x^2 + y^2}, \quad (2.6)$$

де H_S – напруженість магнітного поля в тріщині.

Слід зазначити, що поле розсіювання дефекту буде виникати не тільки над дефектом, але й над будь-якою локальною неоднорідністю, наприклад, над немагнітними включеннями, що розташовані у приповерхневій області ОК.

З граничних умов маємо:

$$B = \mu_0 \mu^* H_{1\tau} = \mu_0 H_{2\tau}$$

$$\boxed{H_{2\tau} = \mu^* H_{1\tau}}$$

де індексами 1,2 позначено відповідно матеріал ОК та немагнітний простір над ним.

Людина не здатна приймати і відображати магнітні поля своїми органами почуттів. Але існує можливість перетворити параметри магнітних полів в інші фізичні величини і виміряти їх або візуалізувати поле за його дією на інші речовини та об'єкти.

Магнітні методи НК застосовують для *феромагнітних* матеріалів, що знаходяться в намагніченому стані. Тому їх реалізація передбачає обов'язкову підготовку ОК до контролю та його намагнічування/розмагнічування. Отже, одними з основних в МНК є операції намагнічування та розмагнічування ОК.

2.4. Намагнічування об'єктів контролю

Вибір оптимальних умов намагнічування – складне завдання. Чим це викликано? З одного боку, чим менше $\mu_d \cong \frac{\Delta B}{\Delta H}$, тим менша частина потоку

пройде під дефектом, отже, більша частина буде проходити над дефектом.

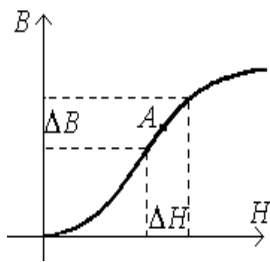


Рис. 2.5. Вибір режиму намагнічування за початковою кривою намагнічування

Це вимагає вибору за кривою намагнічування області з низькими значеннями μ_d (рис. 2.5). Менше значення μ_d можна було б забезпечити в слабких полях, але в цьому випадку виявляється малою індукція B , що неприпустимо, оскільки в ОК необхідно створити значний магнітний потік. З іншого боку великі зовнішні поля більше маскують дефект. На рис.2.5 на кривій намагнічування точка A відповідає найкращому виявленню дефектів.

В більшості випадків ці суперечливі умови задовольняють експериментальним шляхом – підбором такого значення напруженості поля намагнічування, для якого отримують найбільші поля розсіювання для нових типів дефектів.

Відомо декілька способів намагнічування ОК, які відрізняються за родом струму намагнічування, впливом поля на ОК та взаємною орієнтацією ОК та вектора \vec{H} .

2.4.1. Класифікація способів намагнічування об'єктів контролю

Від правильного вибору способу, напрямку і виду намагнічування, від роду струму намагнічування залежить чутливість і можливість виявлення дефектів. Класифікація способів намагнічування наведена на рис. 2.6.

Дефекти найкраще виявляються у випадку, якщо напрямок намагнічування ОК перпендикулярний площині в якій розташована тріщина. Тому прості деталі намагнічуються в двох напрямках, а деталі складної форми – у декількох напрямках.

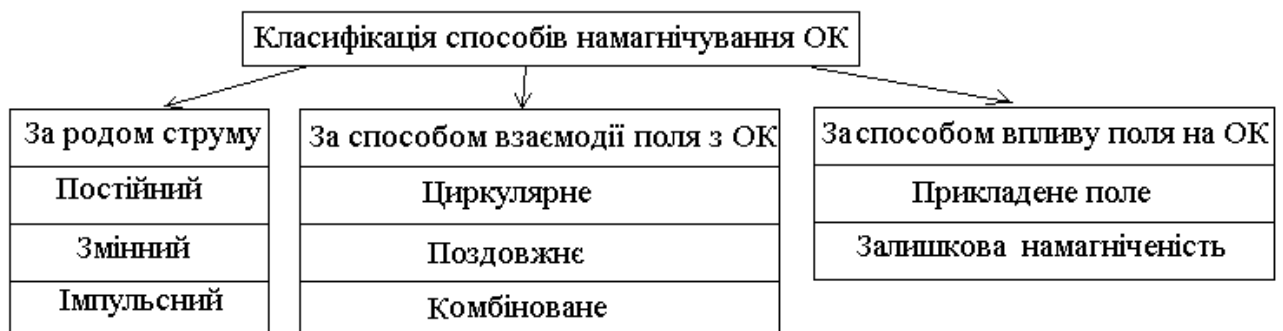


Рис. 2.6. Класифікація способів намагнічування ОК

Для намагнічування деталей застосовують такі струми.

1. Постійний струм (двонапівперіодний випрямлений, трифазний випрямлений). Цей спосіб характеризується стабільністю, відсутністю впливу вихрових струмів. Проте він дещо складний з огляду на необхідність використання потужних випрямлячів струму і тому застосовується для намагнічування малогабаритних ОК.
2. Змінний струм. Цей род струму більш зручний, оскільки дозволяє застосовувати трансформатори для отримання великих струмів. Однак в цьому випадку необхідно забезпечити відключення струму в момент досягнення амплітудного значення струму, коли деталь намагнічується до насичення. В іншому разі індукція в деталі після відключення струму може бути значно нижчою за B_r .
3. Імпульсний струм. Використання такого струму намагнічування поєднує переваги обох способів, але технічно є достатньо складним. Потужний імпульс струму найчастіше реалізується в результаті розряду конденсатора великої ємності. Недоліком способу є те, що внутрішні ділянки ОК не намагнічуються. Однак в цьому є і позитивна сторона: зменшується розмагнічуюча дія кінців ОК.

Для створення оптимальних умов контролю за способом взаємодії з ОК розрізняють 3 способи намагнічування: циркулярне, повздовжнє, комбіноване.

1. Циркулярне намагнічування здійснюється під час пропускання струму через контрольовану деталь (рис. 2.7, а), або через провідник (стрижень), що розміщується в отворі деталі (рис. 2.7, б).

Циркулярне намагнічування найбільш ефективно для деталей, що мають форму тіл обертання. При пропусканні струму по деталях складної форми, виступи й інші нерівності можуть виявитися недостатньо намагніченими. У таких місцях необхідно вимірювати напруженість поля намагнічування і спеціально стежити, щоби вона досягала необхідної для контролю величини.

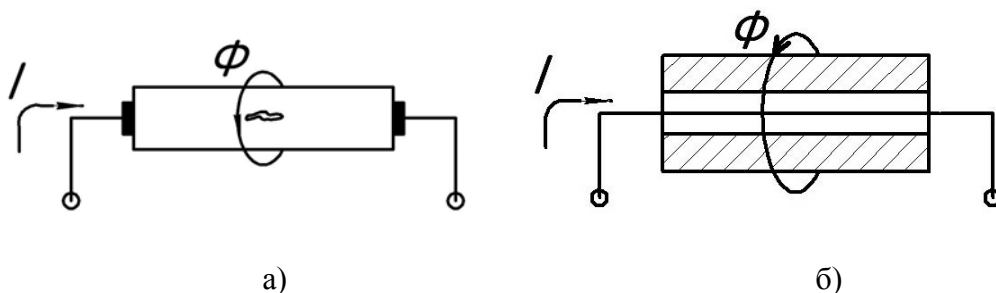


Рис. 2.7. Варіанти реалізації циркулярного намагнічування: а) пропускання струму через ОК, б) пропускання струму через окремий струмопровід

У випадку циркулярного намагнічування напрямок магнітного потоку перпендикулярний напрямку струму, тому оптимально виявляються дефекти, протяжність яких збігається з напрямком струму.

Різновидами циркулярного намагнічування є намагнічування за допомогою установлених на деталі контактів (рис. 2.8, а) і намагнічування шляхом індукованого в ОК струму (рис. 2.8, б). Обладнання останнього являє собою трансформатор, вторинною обмоткою якого є ОК.

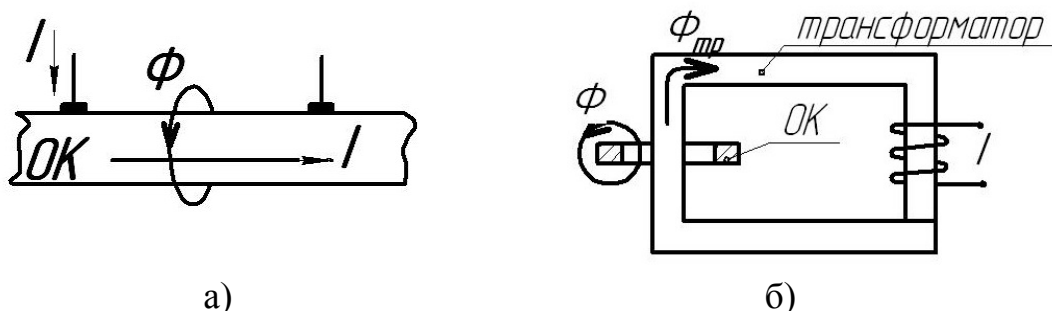


Рис. 2.8. Варіанти реалізації циркулярного намагнічування за допомогою: а) контактів, установлених на деталі, б) індукованого в ОК струму

2. Поздовжнє намагнічування здійснюється за допомогою: постійних магнітів (рис. 2.9, а), електромагнітів (рис. 2.9, б) та соленоїдів (рис. 2.9, в).

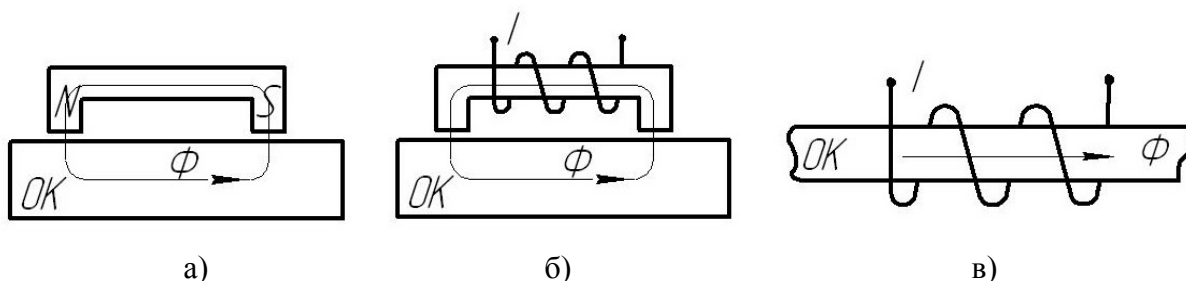


Рис. 2.9. Поздовжнє намагнічування ОК постійним магнітом (а), електромагнітом (б), соленоїдом (в)

ОК зазвичай намагнічується вздовж свого найбільшого розміру. На її краях утворюються смуги, що створюють поле зворотного напрямку.

3. Комбіноване намагнічування здійснюється за умови одночасного намагнічування деталі двома або кількома магнітними полями (рис. 2.10).

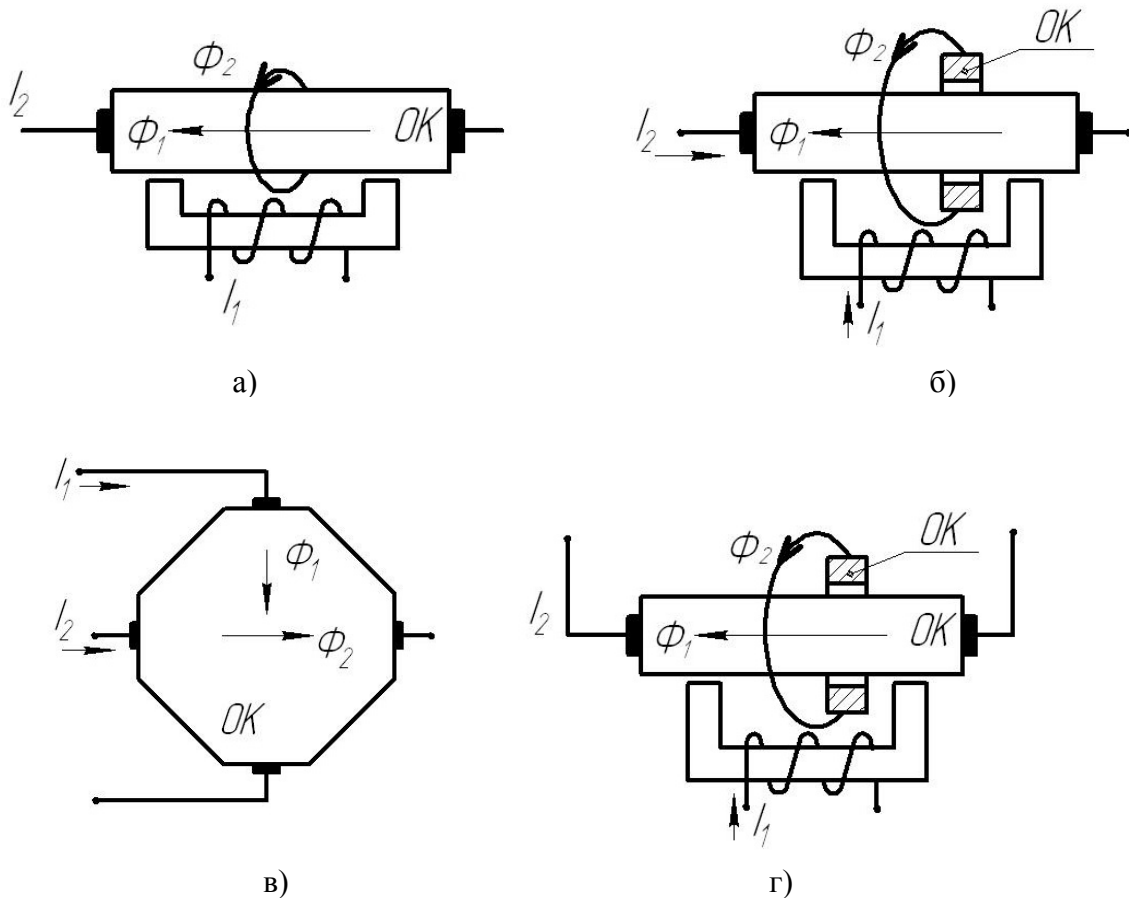


Рис. 2.10. Приклади комбінованого намагнічування: а) струмом та електромагнітом, б) індукованим струмом та електромагнітом, в) пропусканням двох (або більше) зсунутих по фазі струмів по деталі у взаємно перпендикулярних напрямках, г) за допомогою збудження струму в деталі і струмом, що проходить по провіднику, який знаходиться у отворі деталі

В цьому випадку можна застосовувати будь-яке сполучення роду струму і прагнути до того, щоби сумарний вектор намагніченості повертався у просторі відносно осі деталі хоча б на 90° (або на 360°). Це досягається в результаті одночасного поздовжнього і циркулярного намагнічування і використання для них струмів одного роду, що відрізняються за фазою (для гармонійних струмів), або часом умикання (для імпульсних струмів), або струмів різного роду з відповідними моментами вмикання і зміни їхньої величини і напрямку.

На рис. 2.10 розглянуті наступні приклади комбінованого намагнічування: 1) пропусканням струму по деталі та використанням електромагніту (рис.2.10,а); 2) намагнічування шляхом індукування струму в деталі і струмом, що проходить через провідник, який знаходиться в отворі деталі (рис. 2.10,б).

Приклад використання приставного ручного електромагніта 1 для намагнічування ділянки ОК 2 зі зварювальним швом 3 приведена на рис.2.11.

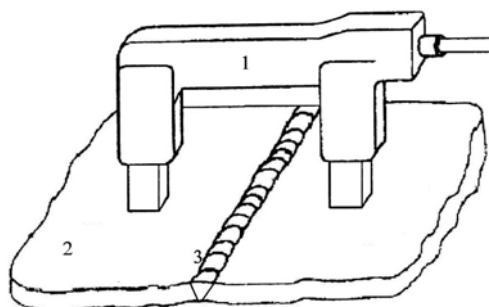


Рис. 2.11. Взаємне розташування приставного електромагніта та ОК

Для успішного застосування магнітних методів НК необхідно дотримуватись заданого режиму намагнічування деталі. Потрібне значення напруженості поля намагнічування заздалегідь розраховується або вимірюється.

2.4.2. Розрахунок магнітного поля намагнічування

Напруженість магнітного поля розраховується за величиною струму намагнічування в обмеженому числі випадків для деталей простої геометричної форми. Найбільш характерними є наступні три випадки.

1. Напруженість магнітного поля у випадку циркулярного намагнічування (амплітудне значення) на поверхні стрижня циліндричної форми з круглим перетином або труби радіусу r при проходженні струму по тілу деталі становить

$$H_m = \frac{I_m}{2\pi r}, \quad (2.7)$$

де I_m – амплітудне значення струму.

2. Для пластини з відношенням ширини b до товщини h $\frac{b}{h} > 10$ напруженість на поверхні пластини при пропусканні через неї електричного струму становить

$$H_m \cong \frac{I_m}{2b}. \quad (2.8)$$

У випадку $\frac{b}{h} < 10$ маємо

$$H_m = \frac{I_m}{2(b+h)}. \quad (2.9)$$

3. Для ділянок крупно габаритних об'єктів при пропусканні електричного струму через них напруженість магнітного поля на поверхні ОК становить

$$H_m \approx \frac{I_m}{k\sqrt{l^2 + C^2}}, \quad (2.10)$$

де l – відстань між електроконтактами,

C – ширина контрольованої зони,

k – коефіцієнт, що враховує род струму (для змінного струму $k = 1,8$, для спрямованого струму $k = 1,5$).

В більш складних випадках поле підбирається експериментальним шляхом, а потім вимірюється. При вимірі напруженості поля, котушку розміщують на ОК так, щоби вона щільно прилягала до поверхні і підключають до вимірювального приладу або балістичного гальванометра у випадку вимірювання у постійних магнітних полях, і приладу змінного струму у випадку вимірювання у змінних магнітних полях.

Для кільця з кількістю витків W розташованих рівномірно вздовж його вісі

$$H_m = \frac{WI_m}{2\pi R_{cp}},$$

де R_{cp} – середній радіус кільця.

2.4.3. Способи намагнічування у прикладеному і залишковому полях

З огляду на вплив поля намагнічування *розрізняють спосіб прикладеного магнітного поля і спосіб залишкової намагніченості*. Під час реалізації першого способу ОК намагнічують, і одночасно контролюють магнітне поле поблизу ОК. Це дозволяє створити достатньо великі індукції аж до індукції насичення. В цьому випадку одержують значні поля розсіювання дефектів і високу чутливість. Особливо ефективно застосування способу прикладеного магнітного поля у випадку ОК із магнітом'яких матеріалів із низким значенням B_r . До недоліків цього способу можна віднести наступні. По-перше, на первинний вимірюваль-

ний перетворювач разом з магнітним полем розсіювання дефекта діє сильне поле намагнічування. По-друге, під час контролю коротких деталей з'являється сильне поле розмагнічування.

Другий спосіб – спосіб залишкової намагніченості, полягає в тому, що деталь спочатку намагнічується до стану насичення, після чого поле намагнічування усувають і проводять контроль (вимірюють поле розсіювання дефектів). До недоліків цього способу, в першу чергу, слід віднести низьку чутливість, до переваг – виключення впливу на датчик поля намагнічування, що частково компенсує втрату чутливості. Цей спосіб найчастіше застосовують для контролю ОК з магнітотвердих матеріалів з високим значенням B_r .

Під час контролю способом залишкового намагнічування, напруженість магнітного поля обирають рівною H_{m*} , тобто напруженості насичення матеріалу деталі. В розрахункових формулах H_{m*} при контролі у прикладеному полі – це тангенціальні складові поля на поверхні ОК.

Значення магнітних характеристик деяких матеріалів наведені у таблиці 2.1.

Табл. 2.1. Магнітні характеристики деяких матеріалів

Марка сталі	Термічна обробка	Залишкова індукція, B_r , Тл	Коерцитивна сила, H_c , А/м	Напруженість поля насичення, H_H , А/м
10	В стані поставки	0,8	240	4000
45	Закалка з 860°C, відпуск при 380-420°C	0,79	2220	16000
08X14MФ	Закалка з 1000°C, відпуск при 760-780°C	0,9	780	9000
12ХНЗА	Цементация при 910°C. Закалка з 800-830 °C, відпуск при 160-200°C	0,7	1200	12000
		0,8	1030	20000
12X13	Нормалізація з 1020 °C, відпуск при 750°C	1,11	400	5000

Відповідно до ГОСТ 21105-87 передбачено три режими намагнічування А, В, С. Під час контролю способом прикладеного поля, значення напруженості прикладеного поля H_{III} , що відповідає режимам А, Б, В визначають за формулами (напруженості визначаються в А/м) :

для режиму А: $H_{III} = 41.3 + 1.3 \cdot H_c$;

для режиму Б: $H_{III} = 19.3 + 1.1 \cdot H_c$;

для режиму В: $H_{III} = 15.2 + 1.1 \cdot H_c$.

Вибір режиму А, В чи С залежить від умов, мети контролю, чутливості контролю.

Для зменшення нагріву ОК рекомендується застосовувати преривчастий режим намагнічування, тривалістю від 0.1с до 3.0с з паузами між циклами намагнічування 5с.

Відстань l між електродами у випадку циркулярного намагнічування повинна бути від 75 до 250мм. Тоді ширина контрольованої ділянки повинна бути не більше $0.6 \cdot l$.

З метою виключення пропусків дефектів у місцях стикових контрольованих ділянок, кожна наступна ділянка повинна перекриватись з попередньою на ширину приблизно 20мм для циркулярного, і на ширину близько 30мм для поздовжнього намагнічування.

У випадку циркулярного намагнічування способом пропускання струму через ОК з метою попередження підпалів рекомендується:

- використовувати наконечники електроконтактів або прокладки з метала з низькою температурою плавлення (свинець, цинк, сплав алюмінія та цинку, тощо);

- періодично зачищати наконечники електроконтактів, не допускати їх почорніння;

- вмикати і вимикати струм тільки за умови належного електричного контакту електрода пристрою намагнічування з ОК.

У випадку контролю ОК у поздовжньому магнітному полі в розімкненому магнітному ланцюгу, необхідно враховувати вплив на чутливість контролю фактора розмагнічування, пов'язаного з формою ОК, особливо для виробів з відношенням довжини до еквівалентного діаметра менше 5. В цьому випадку необхідно:

- складати контрольовані вироби у ланцюги;

- застосовувати подовжені наконечники;

- застосовувати змінний чи імпульсний струм намагнічування.

У випадку коли неможливо розрахувати струм намагнічування, його величину підбирають за виявленням відомих або штучних дефектів ОК.

За першим способом підбирають один з ОК, що перевіряється і має дрібний дефект. Цей ОК контролюють із застосуванням різних схем намагнічування та різних струмів і домагаються чіткого виявлення дефектів. Схему намагнічування і силу струму для яких досягається найкраще виявлення дефектів приймають за оптимальні. Такий спосіб виявлення режимів намагнічування є найбільш вірогідним і надійним оскільки дозволяє врахувати всі фактори, що впливають на чутливість контролю.

Другий спосіб ґрунтується на використанні виробів зі штучними дефектами і застосовується у випадках, коли немає можливості знайти деталь з дрібними дефектами. Тоді такі дефекти утворюють штучно. Їх розміри контролюють візуально під мікроскопом, або за допомогою лупи. Деталь контролюють у різних режимах намагнічування і досягають чіткого виявлення штучних дефектів. Режим, який відповідає чіткому виявленню штучних дефектів приймають за оптимальний.

2.5. Розмагнічування об'єктів контролю

Відомо два основних способи розмагнічування деталей.

1. Нагрів деталі до температури Кюрі, при якій зникають феромагнітні властивості матеріалу деталі. Він найбільш ефективний, проте практично застосовується рідко, тому що при нагріванні змінюються механічні властивості матеріалу деталі, що в більшості випадків є абсолютно не припустимим.

2. Розмагнічування деталі знакозмінним магнітним полем з амплітудою, що рівномірно зменшується від деякого максимального значення, більшого за поле насичення даного матеріалу (або більшого за величину намагнічуючого поля), до нуля. Магнітний стан матеріалу після такої операції характеризується значеннями $H=0$, $B=0$.

В залежності від матеріалу виробу, його розмірів і форми застосовують

змінні поля різних частот від декількох Гц до МГц. Чим більше товщина деталі, тим нижче повинна бути частота змінного розмагнічуючого поля.

Розмагнічування масивних деталей доцільно виконувати по ділянках за допомогою електромагнітів, плоских котушок, гнучкого кабелю. За необхідності використовують наступні технологічні прийоми: багатократне (повторне) розмагнічування ОК чи його ділянки, збільшення часу розмагнічування до 30 - 60с, зменшення частоти змінного розмагнічуючого поля, обертання ОК в різних площинах відносно розмагнічуючого поля.

При розмагнічуванні коротких ОК слід розташовувати їх ланцюжками, або використовувати подовжувачі з метою зниження розмагнічуючого фактору. Джерело розмагнічуючого поля необхідно розміщати таким чином, щоби вісь ОК була орієнтована з заходу на схід для зниження підмагнічуючої дії поля Землі.

Орієнтовну якісну оцінку степені розмагнічування проводять по притягненню до розмагнічених ОК малих феромагнітних мас або по відхиленню стрілки магнітного компаса.

Підсумок до розділу

Магнітна дефектоскопія ґрунтується на виявленні полів розсіювання дефектів типу порушення суцільності, що виходять на поверхню чи розташовані у підповерхневому шарі на невеликій глибині, в заздалегідь намагнічених виробках з феромагнітних матеріалів.

Магнітні поля розсфіювання дефектів можуть спостерігатись як у прикладених, так і в залишкових полях.

Дефекти найкраще виявляються у випадку, якщо напрямок намагнічування ОК перпендикулярний площині в якій розташована тріщина. З цією метою використовують різні за взаємодією з ОК способи намагнічування

Напруженість магнітного поля розраховується за величиною струму намагнічування в обмеженому числі випадків для деталей простої геометричної форми.

Розмагнічування деталі здійснюється знакозмінним магнітним полем з напруженістю, що рівномірно зменшується від деякого максимального значення (більшого за напруженість поля насичення матеріалу), до нуля.

Задачі

1. Під час контролю деталі з феромагнітного матеріалу циліндричної форми здійснюється її намагніченість шляхом пропускання через неї електричного струму. Знайдіть напруженість поля на зовнішній поверхні втулки, якщо її діаметр 50мм, а струм 1000А.

Розв'язання. Застосуємо закон повного струму і визначимо напруженість на поверхні деталі: $H = \frac{I}{2\pi R}$.

Підставивши відомі значення, отримаємо:

$$H = \frac{10^3}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.025} = 6369 \text{ А/м.}$$

Відповідь: $H = 6369 \text{ А/м.}$

2. Втулки з феромагнітного матеріалу намагнічуються шляхом пропускання через них електричного струму. Оберіть значення струму для створення магнітного поля напруженістю $H = 80 \frac{\text{А}}{\text{см}}$ на зовнішній поверхні циліндричної втулки з внутрішнім діаметром 16 мм і зовнішнім діаметром 24 мм? Чому дорівнює напруженість магнітного поля на внутрішній поверхні втулки для розрахованого значення струму?

Розв'язання. Для розв'язку задачі скористаємось законом повного струму для симетричного контура: $H = \frac{I}{2\pi R}$. З цього рівняння знаходимо, що для створення заданої напруженості поля на зовнішній поверхні втулки через неї необхідно пропустити струм $I = H_{\text{зв}} 2\pi R_{\text{зв}} = 8000 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 603 \text{ А.}$

Відповідь: $I = 603\text{A}$. Напруженість поля на внутрішній поверхні втулки дорівнює нулю, оскільки контур утворений внутрішньою поверхньою втулки не охоплює струм намагнічування.

3. Для умов задачі №2 запропонуйте спосіб намагнічування внутрішньої поверхні втулки постійним струмом та визначіть силу струму для намагнічування поверхні до значення $H = 80 \frac{\text{A}}{\text{см}}$.

Розв'язок. Необхідно в отворі втулки розмістити струмопровід і пропустити через нього струм $I = H\pi D_B = 8000 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \approx 402\text{A}$

Відповідь: $I = H\pi D_B \approx 402\text{A}$.

4. Визначити максимальне значення струму намагнічування, який пропускають через деталь для намагнічування її ділянки розміром $12 \times 4\text{см}$ до напруженості максимального значення $60 \frac{\text{A}}{\text{см}}$, якщо для цього застосовують змінний синусоїдальний струм.

Розв'язання. Формула для визначення напруженості поля на ділянці крупногабаритного ОК при пропусканні по ній струму має вигляд:

$$H_m = \frac{I_m}{K\sqrt{L^2 + C^2}},$$

де коефіцієнт $K = 1,8$ з умови використання змінного струму,

L і C – розміри ділянки деталі.

З наведеної формули визначаємо разити величину струму:

$$I_m = H_m \cdot K \cdot \sqrt{L^2 + C^2} = 60 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{144 + 16} \cong 1366\text{A}.$$

Відповідь: $I_m \cong 1366\text{A}$.

5. Визначити струм циркулярного намагнічування пластини з перетином 40×10 мм довжиною 60 мм до напруженості $180 \frac{\text{А}}{\text{см}}$ при контролі способом за-
лишкової намагніченості.

Розв'язання. При контролі деталей простих геометричних форм напруже-
ність поля на поверхні пластини з перетином розраховується за формулою:

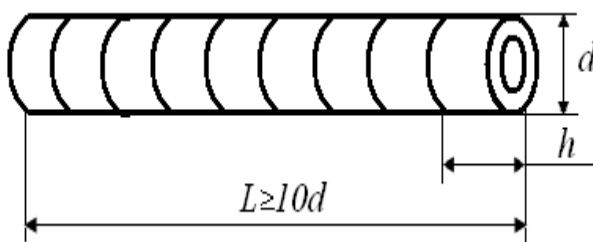
$$H = \frac{I}{2(b+h)} \text{ для випадку, якщо } b < 10h. \text{ Оскільки } \frac{b}{h} = \frac{40}{10} = 4, \text{ використаємо са-}$$

ме цю формулу для визначення напруженості поля, з якої отримаємо струм на-
магнічування пластини:

$$I = 2H(b+h) = 2 \cdot 18000 \cdot (0,04 + 0,01) = 1800 \text{ А.}$$

Відповідь: $I = 1800 \text{ А.}$

6. Необхідно намагнітити феромагнітні втулки з діаметрами 5 мм, тов-
щиною 3 мм до напруженості поля $150 \frac{\text{А}}{\text{см}}$ на їх зовнішній поверхні. Спосіб на-
магнічування – пропускання струму через деталь. Необхідно обґрунтувати спо-
сіб підведення струму о деталі і визначити силу струму.



Розв'язання. Оскільки деталь ко-
ротка, то для зменшення розмагнічува-
льної дії кінців деталі, необхідно на-
брати пакет втулок, щоб його довжина
 L була більшою від $10d$ (див. рису-

нок). Для цього необхідно взяти n втулок. Загальна довжина пакету втулок
становитиме $L = 5 \cdot 10 = 50$ мм, тоді кількість втулок дорівнюватиме:

$$n = \frac{L}{h} = \frac{50}{3} \cong 17 \text{ шт. Застосовуючи закон повного струму, маємо: } H_m = \frac{I_m}{2\pi R}. \text{ З}$$

цього рівняння знаходимо: $I_m = 2H_m \pi R = 15000 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 235,5 \text{ А.}$

Відповідь: $I_m = 235,5 \text{ А.}$

7. Знайдіть силу струму у тороїдній обмотці з 10 витками кабеля для намагнічування кільця підшипника до індукції 1 Тл. Площа перерізу кільця дорівнює 5 см^2 , його зовнішній діаметр – 200 мм, а внутрішній – 170 мм, абсолютна магнітна проникність матеріалу кільця становить $5,81 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/м}$.

Розв'язання. Знаходимо магнітний потік в деталі:
 $\Phi = BS = 1 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$. З урахуванням того, що довжина середньої лінії кільця підшипника становить $l_{\text{ср}} = \frac{170 + 200}{2} \pi \approx 0,581 \text{ м}$ визначимо магніторушійну силу що діє у кільці:

$$F = \Phi R_M = \Phi \frac{l_{\text{ср}}}{\mu S} = 5 \cdot 10^{-4} \frac{0,581}{5,81 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 10000 \text{ А}.$$

Тоді сила струму $I = \frac{F}{W} = \frac{10000}{10} = 1000 \text{ А}$.

Відповідь: Для намагнічування кільця підшипника до індукції 1 Тл необхідно пропустити через тороїдну обмотку струм силою 1 кА.

Контрольні запитання

1. Наведіть приклади дефектів виробів з феромагнітних матеріалів металургійного, технологічного та виробничого походження.
2. Дайте стислу порівняльну характеристику різних видів дефектоскопії
3. Наведіть граничні умови для напруженості та індуктивності магнітного поля на межі поділу двох середовищ
4. Поясніть особливості утворення магнітних полів розсіювання поверхневих дефектів в ОК з феромагнітних матеріалів.
5. Які чинники впливають на вибір способу, напрямку та роду струму намагнічування?
6. Які способи намагнічування використовуються у МНК?
7. При якій взаємній орієнтації тріщини і напрямку намагнічування виникає максимальний потік розсіювання дефекта?

8. Дефекти якої орієнтації виявляються при циркулярному намагнічуванні?
9. В чому полягає мета комбінованого намагнічування?
10. Наведіть приклади реалізації поздовжнього намагнічування ОК?
11. На які групи розділяються матеріали за значенням магнітної сприйнятливості?
12. Які інформативні параметри магнітного поля використовуються у МНК?
13. Охарактеризуйте основні види розмагнічування ОК.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ МАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

За способом отримання первинної інформації про магнітне поле розсіювання дефектів, первинними перетворювачами параметрів поля розрізняють наступні методи магнітної дефектоскопії:

- магнітопорошковий,
- магнітографічний,
- магнітонапівпровідниковий,
- індукційний,
- ефекта Холла,
- ефекта Гаусса (магніторезистивний),
- ферозондовий та інші.

Перші два метода передбачають наявність прямого контакту ОК з перетворювачем поля, а інші є безконтактними. Робота кожного з перетворювачів має ряд особливостей, які визначаються використаними в них фізичними ефектами та явищами. Наприклад, якщо поле візуалізується за допомогою дії на інше феромагнітне тіло, останнє намагнічується і на нього діє т.з. пондеромоторна сила. Ця сила намагається орієнтувати тіло вздовж магнітних силових ліній.

3.1. Магнітопорошковий метод

Одним із найбільше поширених методів магнітної дефектоскопії є магнітопорошковий метод, що полягає у використанні магнітного порошку для виявлення магнітного поля дефекту. Цим методом контролюються до 70 % усієї продукції, що піддається перевірці на наявність поверхневих і підповерхневих дефектів. Він одержав широке поширення завдяки:

- 1) високій чутливості;
- 2) підвищеній продуктивності;
- 3) простої технології.

Фізична сутність методу полягає в тому, що магнітні частинки порошку в полі дефекту намагнічуються і під дією пондеромоторної сили (сили механічної взаємодії) переміщуються в зону найбільшої неоднорідності магнітного поля. Цьому руху протидіють сили тертя, тому переміщення частинок відбувається під дією результуючих складових названих сил.

Якщо розглядати порошки як ізольовані магнітні частинки і помістити їх у неоднорідне магнітне поле, то пондеромоторна сила визначатиметься як

$$F_x = \chi V H_i \frac{dB}{dx}, \quad (3.1)$$

де V – об'єм частинки,

$\frac{dB}{dx}$ – складова градієнту магнітної індукції поля дефекта за координатою x ,

H_i – напруженість поля всередині частинки,

χ – магнітна сприйнятливність матеріалу порошку.

Отже пондеромоторна сила F пропорційна напруженості магнітного поля частинки і її градієнту. Вона зростає зі збільшенням об'єму частинки, причому він не повинний перевищувати величину, при якій ще можна вважати $H \frac{dB}{dx} = const$.

Оскільки частинки мають дуже малі розміри, їх розмагнічувальний фактор N також дуже малий. Тому $H' \ll H_0$ і можна вважати, що напруженості поля усередині частинок H_i дорівнює напруженості зовнішнього поля H_0 .

Частинки, притягуючись одна до одної, вибудовуються у ланцюжки. Ці ланцюжки орієнтуються вздовж магнітних силових ліній поля (аналогічно магнітній стрілці компаса) і, накопичуючись, утворюють характерні малюнки у виді валиків (скупчень), за якими приймають рішення про наявність чи відсутність дефекту. Топографія поля дефекту однозначно визначає особливості характеру розподілу магнітних частинок.

Магнітопорошковий контроль реалізується як послідовність таких операцій:

1. Підготовки деталі до контролю.

2. Намагнічування деталі.
3. Нанесення на деталь магнітного порошку або суспензії.
4. Огляду деталі.
5. Розбраковування.
6. Розмагнічування.

1. Підготовка деталі до контролю полягає в очищенні її поверхні від бруду, іржі що відшаровується та мастил, якщо контроль проводиться за допомогою водяної суспензії або сухого порошку. Якщо поверхня деталі чорна і чорний порошок на ній погано видний, деталь покривають тонким шаром білої фарби.

Захисні покриття на деталях невеликої товщини, як правило, не погіршують умови контролю за винятком електроізоляційних покриттів, що заважають пропусканню струму через деталь. У цьому випадку контроль проводять до нанесення покриття, або не пропускаючи струми через деталь. Якщо товщина покриття $h_{\text{П}} \in (20, 150)$ мкм, то застосовують спеціальні режими контролю.

2. Намагнічування деталі виконують відповідно наведених у п.2.2 рекомендацій. Для забезпечення намагнічування деталей складної форми полюсні наконечники електромагнітів системи намагнічування можуть виконуватись рухливими. Нижче в табл.1, як приклад, наведені значення коерцитивної сили, залишкової індукції напруженості поля насичення для деяких марок сталей.

Таблиця 3.1. Значення коерцитивної сили, залишкової індукції та напруженості поля насичення деяких марок сталей

Марка сталі	Термічна обробка	Залишкова індукція, B_r , Тл	Коерцитивна сила, H_c , А/м	Напруженість поля насичення, H_H , А/м
10	В стані поставки	0,8	240	4000
45	Закалка з 860°C, відпуск при 380-420°C	0,79	2220	16000
08X14MФ	Закалка з 1000°C, відпуск при 760-780°C	0,9	780	9000
12ХН3А	Цементация при 910°C. Закалка з 800-830°C, відпуск при 160-200°C	0,7 0,8	1200 1030	12000 20000
12X13	Нормалізація з 1020°C, відпуск при 750°C	1,11	400	5000

3. Нанесення на деталь магнітного порошку або суспензії. Магнітні порошки наносяться на поверхню ОК “сухим” (шляхом напилювання) або “вологим” методом за допомогою суспензії, що уявляє завесь феромагнітних частинок у воді, гасі або олії. Невеликі за розміром вироби цілком занурюють у ванну із суспензією. При контролі великогабаритних ОК суспензію наносять на контрольовану ділянку пульверизатором або іншими методами.

Порошок наносять на виріб сухим методом при виявленні підповерхневих дефектів або за наявності на них немагнітного покриття товщиною більше 30 мкм. Контроль із використанням суспензій відрізняється високою чутливістю, яка суттєво залежить від швидкості руху суспензії відносно контрольованої поверхні, оскільки збільшується дія потоку змащення рідини через погане зчеплення верхніх частинок із частинками що вже осіли.

На чутливість методу впливає також положення контрольованої поверхні. Якщо вона розташована горизонтально, то сила ваги сприяє переміщенню частинок до місця дефекту. У “стельовому” положенні ОК частинки порошку під дією сили ваги будуть відриватися від периферійних зон дефекту, в наслідок чого зменшуватиметься висота валика. При вертикальному розташуванні поверхні під впливом сили ваги частинки будуть скочуватися униз.

Дія сили тертя, що перешкоджає переміщенню частинок у зону дефекту, може бути зменшена відповідною підготовкою поверхні – механічним або піскострумним обробленням. Для контролю грубооброблених виробів лиття застосовується попередня ґрунтовка поверхні фарбами і лаками, які швидко висихають. Зварювальні шви рекомендується попередньо покривати розведеними лаками з метанолом. Колір ґрунтуючого покриття повинен мати контраст із кольором порошку. Це сприяє підвищенню чутливості методу.

Виявляємість дефектів залежить від властивостей магнітного порошку. Найбільш поширеними для магнітної дефектоскопії є наступні порошки:

1. Суміш гідроокислів заліза (відходи виробництва барвника індиго).
2. Порошки, одержувані роздрібненням нікель-цинкових ферітових виробів

марок Ф-600 і Ф-1000.

3. Оптичний крокус.

4. Окис заліза, окис-закис заліза Fe_2O_3 .

Нижче наведені приклади складів магнітних суспензій, що рекомендовані до використання у ПНАЭ Г-7-015-89

Склад 1.

Порошок магнітний чорний, ТУ 6-14-100979.....	25 ± 5 г
Хромпик калієвий $K_2C_2O_7$, ГОСТ 4220-75	5 ± 1 г
Сода кальцинована, гост 5100-73.....	10 ± 1 г
Речовина «Сульфанол», ТУ 6-01-1043-79	2 ± 0,5 г
Вода водопровідна, ГОСТ 2874-73	до 1000 мл

Склад 2.

Порошок магнітний чорний, ТУ 6-14-100979.....	25 ± 5 г
Нітрит натрію, ГОСТ 19906-74	15 ± 2 г
Речовина «Сульфанол», ТУ 6-01-1043-79	2 ± 1 г
Вода водопровідна, ГОСТ 2874-73	до 1000 мл

Для збільшення контрасту порошки змішують з люмінофором ясно-жовтого кольору, що світиться в ультрафіолетовому світлі. Розмір часток – $0,1 \div 60$ мкм.

Для контролю деталей із жовтою поверхнею високу контрастність забезпечують люмінесцентні магнітні порошки та олії, а також водорозчинні пасти. В цьому випадку деталі оглядають при затемненні у світлі ультрафіолетових ламп. Розроблено суміші двох і більше флюоресцентних порошків, що відрізняються за кольором і розміром часток. Це дозволяє при освітленні ультрафіолетовими променями виявляти різні за розмірами дефекти.

Відомий спосіб, при якому використовують чорний магнітний порошок і покриття з люмінофору, яке попередньо наноситься на контрольовану поверхню. Частинки склеюються в місцях розташування дефекту і при огляді в ультрафіолетовому світлі виявляються як темні лінії на світлому фоні.

4. Огляд деталі. Деталі перевіряють візуально. У випадках сумніву щодо

ідентифікації дефекту для розшифровки дефектогра застосовують оптику (із попереднім документуванням місця дефекту).

Картина розподілу магнітного порошку в місцях знаходження дефекту називається *дефектограмою*. Вона може бути отримана різними способами.

1. Найбільш поширеним є фотографування. Цей спосіб може бути використаний як у лабораторних, так і у виробничих умовах.

2. Останнім часом широко застосовують спосіб, що полягає в нанесенні на місце скупчення порошку (після його висихання) покриття що легко знімається, наприклад, у вигляді липкої прозорої плівки, що обережно притискають до поверхні виробу, а потім знімають разом із частками магнітного порошку і наклеюють на лист паперу.

3. Відомі способи фіксації скупчення порошку закріплюючими покриттями у вигляді безколірних лаків або інших розчинів, що наносяться, наприклад, розпиленням після висихання поверхні. Після висихання лаку утворюється достатньо міцне покриття, що за необхідності можна відокремити від поверхні виробу.

4. При нанесенні магнітного порошку в суміші з пігментом і лаком (у твердому стані) після їх розподілу в області дефектів суміш зволожують розчиняючою лак рідиною, що забезпечує зчеплення частинок і їх утримання на поверхні. Такий спосіб одержання дефектограм найбільш трудомісткий.

5. Для надання порошку клейких властивостей його обробляють лактоном. Поверхня виробу після осідання порошку в дефектних зонах покривається сумішшю, що складається з кислотного розчинника для розчинення лактона і смоли для утворення поверхневої плівки. Після розчинення лактона кислота починає реагувати з магнітним порошком, створюючи кольорове зображення дефектної зони з різною глибиною кольору в залежності від форми і розмірів дефектів ОК. Після сушки утворюється плівка що фіксує кольорове зображення.

6. Фіксування магнітного порошку в зоні дефекту можна здійснити за допомогою теплової обробки, що розплавляє барвник або парафін. Зразок

попередньо обробляють парафіном, а потім піддають контролю на наявність дефектів. Потім його розігрівають, і парафін фіксує положення порошку.

Одержання дефектограм дозволяє мати документальне підтвердження виконаного контролю, наявності дефектів і дозволяє аналізувати розміри та природу несучільностей по характерній морфології дефектів різного класу.

5. Розбраковування. Цю операцію повинен виконувати досвідчений контролер. На робочому місці контролера повинні бути:

- фотографії дефектів та відповідні дефектограми,
- контрольні зразки з допустимими розмірами дефектів.

Вигляд і форма валиків (скупчень) магнітного порошку або магнітолюмінуючого порошку в багатьох випадках дозволяє розпізнавати порушення суцільності. Важко виявити дефекти у вигляді тонких волосовин. Відкладення порошку на волосовинах має вигляд прямих або сильно вигнутих тонких ліній. Ступінь чорнуватості валиків порошку залежить від відношення глибини волосовини до їх розкриття та розташування відносно поверхні ОК. У деталях легше виявляються термічні зварювальні, шліфувальні й утомні тріщини. Осадження порошку над тріщинами має вид чітких ламаних ліній із щільним нанесенням порошку. Шліфувальні тріщини виявляються у вигляді сітки.

У багатьох випадках можна приблизно оцінити глибину дефектів, змінюючи режими і спосіб контролю. Дефекти з великим відношенням глибини до розкриття можуть бути виявлені при менших полях намагнічування, а також способом залишкової намагніченості.

Підповерхневі дефекти дають менш чітке відкладення валиків порошку і, як правило, можуть бути виявлені тільки способом прикладеного поля.

Складність визначення дефектів магнітопорошковим методом пов'язана з можливістю перебраковки через відкладення порошку на фальшивих дефектах. До них відносяться:

- різноманітні магнітні неоднорідності. Вони не є причиною браку і виявляються у вигляді суцільних чітких скупчень валиків порошку, зовнішньо

схожих на волосовини. Відомо, що така структурна неоднорідність може з'являтися вздовж волокон металу. В цьому випадку валикі мають характерний вигляд. Тому складність розбракування полягає не в їх розпізнаванні, а в тому, що серед ліній відкладення порошку можуть бути і порушення суцільності, які неможливо виявити на фоні магнітної неоднорідності. Отже, в деяких випадках доводиться змінювати режими контролю шляхом зменшення напруженості поля намагнічування, або переходити до способу залишкової намагніченості для того, щоб виявити хоча б грубі дефекти.

- Окремим видом фальшивих дефектів є місцевий наклеп, що виникає внаслідок ударів, кидків, надавлювань тощо.

- Помилкове осідання магнітного порошку може бути наслідком зіткнення деталі із немагнітним тілом.

- Помилкове осідання порошку може спостерігатись у місцях різкої зміни поперечного перетину деталі (отвір, різьба, і т.і.).

6. Розмагнічування деталі виконується за рекомендаціями п.2.3.

Нижче на рис.3.1 наведено приклад структури магнітопорошкового дефектоскопу.

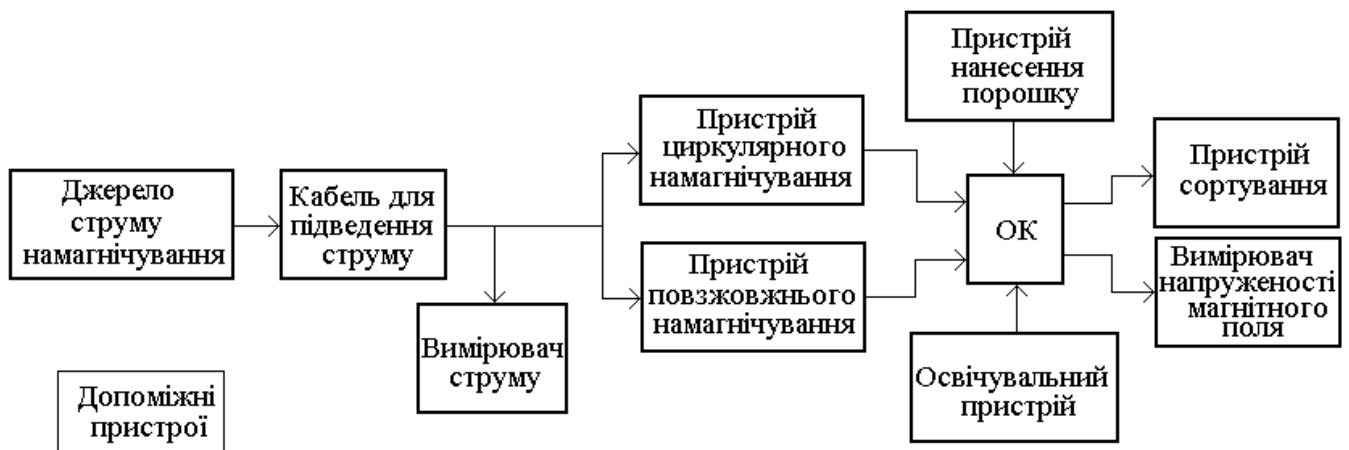


Рис.3.1. Структура магнітопорошкового дефектоскопу

Робота приладу зрозуміла зі структурної схеми. За такою схемою був розроблений і випускався серійно магнітопорошковий дефектоскоп МД-10 П (СРСР), який мав такі основні технічні характеристики:

- род струму намагнічування - змінний, імпульсний,

- сила струму – до 20 кА,
- напруженість магнітного поля – до 40 кА/м,
- максимальна довжина ОК – до 2 м.

При виборі струму намагнічування виходять з того, що для максимального діаметру ОК цей струм повинен створювати на поверхні ОК магнітне поле напруженістю 8000 А/м.

3.2. Магнітографічний метод

Цей метод контролю запропоновано у 1952 р. радянськими вченими С. Маховером та Ю. Усенко. Він полягає у записі на магнітну стрічку або плівку магнітного рельєфу ОК та їх дефектів. В даний час в дефектоскопії використовуються два типи магнітоносіїв.

1. Магнітні стрічки, що складаються з немагнітної еластичної основи, на якій нанесений тонкий прошарок (25 - 40 мкм) магнітного порошку з закріплювачем.

2. Монолітні магнітоносії, що складаються з монолітної немагнітної основи (поліамідні смоли, різноманітні типи гум), у які магнітний порошок уводиться як наповнювач.

Магнітні стрічки характеризуються нерухомим закріпленням магнітного порошку, тому ефект взаємодії індикатора з магнітним полем полягає в локальному намагнічуванні ділянок стрічки, що знаходяться в полі розсіювання дефекту. Запис полів дефектів на магнітній стрічці відтворюється за допомогою магнітографічних дефектоскопів. Чутливість методу залежить від магнітних характеристик стрічки, контрасту запису і чутливості апаратури відтворення. Контрастність зображення залежить від попереднього магнітного стану стрічки. Перед проведенням запису стрічка повинна бути ретельно розмагнічена.

Значний практичний інтерес викликають монолітні магнітоносії, що в пастоподібному стані наносять на поверхню. Магнітний порошок за рахунок відносної рухливості (це принципово відрізняє їх від стрічок і наближає до магнітопорошкового методу) накопичується в зоні поля розсіювання дефекту.

Після затвердіння носій знімають з поверхні і по розподілу порошку в ньому судять про наявність дефектів. Дефектограма може розглядатись під мікроскопом.

Переваги магнітографічного методу:

- висока чутливість (вдається виявити дефекти довжиною менше 0,05 мкм);
- можливість проведення контролю у важкодоступних місцях (в отворах та їх околах);
- висока рентабельність.

Розглянемо більш детально процес запису/зчитування на магнітну стрічку. В залежності від напрямку вектора намагніченості робочого прошарку магнітного носія відносно напрямку вектора швидкості його переміщення розрізняють повздовжню, поперечну і перпендикулярну намагніченості.

Процес запису/відтворення магнітограми в системі голівка-магнітний носій (МН) (рис.3.2.) може бути представлений як послідовність наступних передаточних ланок:

- $I_3(t)$ – струм в обмотці магнітної головки запису
- ↓
- $F_3(t)$ – магніторушійна сила магнітної головки запису
- ↓
- $H_3(x, y, z, t)$ – поле магнітної головки запису
- ↓
- $I_3(t, y, z)$ – залишкова намагніченість стрічки після впливу поля запису
- ↓
- $I_{rv}(l, y, z)$ – залишкова намагніченість стрічки під час відтворення поля
- ↓
- $\Phi_B(t)$ – магнітний потік у осерді сердечнику магнітної головки відтворення
- ↓
- $e_B(t)$ – електрорушійна сила, яка наводиться в магнітній головці відтворення.

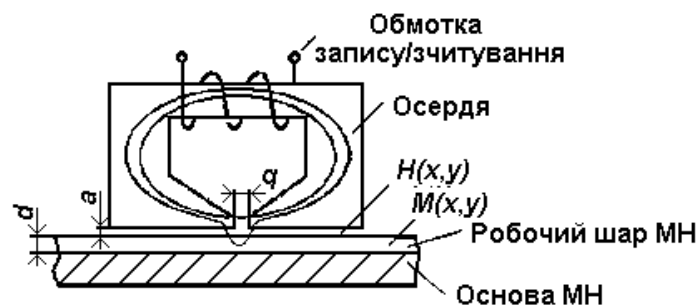


Рис. 3.2. Запис/зчитування даних з магнітного носія (стрічки)

В наведеному представленні (x, y, z) - просторові координати магнітних головок запису/відтворення, $l=V_3t$ - координата, яка пов'язана з носієм запису, V_3 - швидкість запису.

У кільцевій магнітній головці поле запису $H_3(x,y)$ - це поле розсіювання в районі щілини запису. Поле пронизує робочий шар магнітного носія, де утворюється залишкова намагніченість $\pm M_r$ і немагнітну основу. Полярність намагнічування визначається напрямком струму $I_3(t)$.

Напруженість поля магнітної головки при деяких припущеннях ($\mu_c \rightarrow \infty$, $\mu_H = 1$, μ_c, μ_H - початкові магнітні проникності осердя і основи магнітного носія) у багатьох практичних випадках можна визначити як

$$H_S(x, y) = \frac{H_0}{\pi} \left[\arctg \frac{1 + \frac{2x}{q}}{\frac{2y}{q}} + \arctg \frac{1 - \frac{2x}{q}}{\frac{2y}{q}} \right], \quad (3.2)$$

де H_0 - напруженість поля в центрі щілини магнітної головки.

Матеріал робочого шару магнітної головки починає перемагнічуватись якщо до нього прикладене поле з напруженістю, що перевищує H_c . Значення магнітного потоку на поверхні магнітного носія, отже і електрорушійна сила на виході магнітної головки мала, тому процес відтворення можна вважати лінійним. При відтворенні потік у осерді магнітної головки

$$\Phi_B(x) \approx \int_a^{a+d} dy \int_{-\infty}^{\infty} h(l, y) M_r(x-l) dl, \quad (3.3)$$

де $h(l, y)$ - чутливість магнітної головки відтворення, $M_r(x-l)$ - розподіл залишкової намагніченості носія.

Фізичний зміст $h(l, y)$ полягає в тому, що вона показує розподіл магнітної провідності в системі магнітна головка - магнітний носій і зв'язує потік у осерді з намагніченістю МН; для ідеалізованої системи

$$h(l, y) = \frac{1}{\pi q} \left[\operatorname{arctg} \frac{x + q/2}{\lambda} - \operatorname{arctg} \frac{x - q/2}{\lambda} \right]. \quad (3.4)$$

До магнітних стрічок (плівок) для магнітної дефектоскопії висуваються наступні вимоги:

- 1) незмінність значень H_c , B_r , μ по всій поверхні стрічки (плівки),
- 2) лінійна залежність $B_r = f(H_d)$,
- 3) легкість розмагнічування,
- 4) багатократна незмінна відтворюваність результатів контролю,
- 5) висока еластичність в широкому діапазоні температур.

Складність виконання комплексу цих вимог і атестації магнітоносіїв суттєво ускладнюють метрологію цього методу МНК.

Найчастіше в магнітографічному методі використовують плівки з оксиду заліза ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), залізо-кобальтового фериту (CoFe_2O_3) та діоксиду хрома (CrO_2). Ширина плівки зазвичай складає 35 мм чи 75 мм.

Взаємне розташування ОК, магнітної плівки та пристрою намагнічування показано на рис. 3.3.

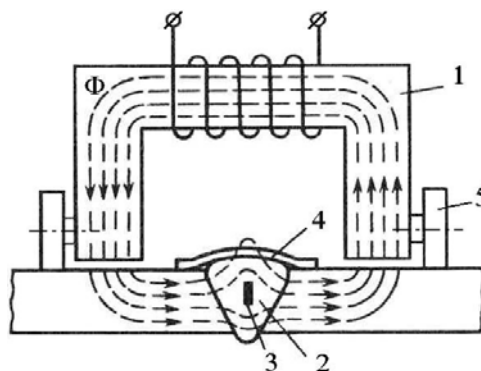


Рис. 3.3. Схема магнітографічного контролю зварювального шва: 1 – пристрій намагнічування, 2 – зварювальний шов, 3 – дефект, 4 – магнітна плівка, 5 – коліщатко

Пристрій намагнічування 1 на коліщатках 5 прокочується вздовж зварювального шва 2. В околі дефекту 3 утворюється магнітне поле розсіювання дефекту, яке фіксується на магнітній плівці 4.

3.3. Метод магніодіодів

Магніодіоди – це напівпровідникові діоди, в яких використовується явище зміни вольтамперної характеристики під дією зовнішнього магнітного поля. Завдяки малим розмірам, високій чутливості і задовільній повторювальності вольтамперних характеристик останнім часом ці прилади все частіше використовують в магнітній дефектоскопії, і особливо, у магнітній інтроскопії.

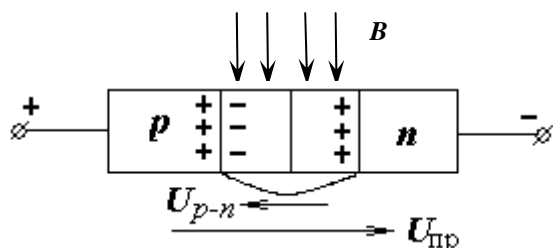


Рис. 3.4. Розподіл прикладеної до магніодіоду електричної напруги

В магніодіодах (рис. 3.4) пряма напруга $U_{пр}$, прикладена до діода, розподіляється між $p-n$ переходом (U_{p-n}) і опором бази діода R_b (база – це область напівпровідникового приладу, в якій відбувається інжекція неосновних носіїв заряду)

$$U_{пр}(B) = U_{p-n}(B) + I_{пр}R_b(B). \quad (3.5)$$

Опір бази діода збільшується в поперечному магнітному полі через зменшення рухливості основних і неосновних носіїв заряду. Збільшення опору бази може бути пов'язано також із зменшенням часу життя неосновних носіїв заряду, якщо через викривлення траєкторії їх руху вони будуть швидше досягати поверхні базової області, де спостерігається велика швидкість їх рекомбінації. Внаслідок збільшення R_b значення $U_{пр}$ перерозподіляється в напрямку зменшення долі U_{p-n} .

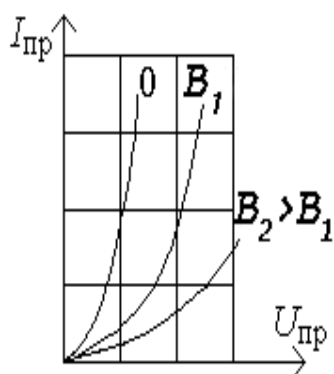


Рис. 3.5. Вольтамперна характеристика германієвого магніодіода

Зазвичай магніодіоди виготовляються з товщиною бази, що відповідає декільком дифузійним довжинам неосновних носіїв зарядів, тобто товщиною в декілька міліметрів. Основна вимога до матеріалу бази магніодіодів – висока рухливість носіїв заряду.

Для оцінки чутливості користуються поняттям питомої чутливості

$$\gamma = \frac{1}{I_{пр}} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta B}, \quad (3.6)$$

де ΔU - зміна напруги на магніодіоді при внесенні його в магнітне поле.

Питома чутливість магнітодіодів вище, ніж у перетворювачів Холла і ферозондів. Приклад магнітодіоду – кремнієвий магнітодіод типу КД304Ж з розмірами 2×1 мм і 5×1 мм та внутрішнім опором $R_0(B=0)=2400$ Ом.

3.4. Метод магніотранзисторів

Магніотранзистори - це транзистори, в яких використовується залежність характеристик і параметрів від зовнішнього магнітного поля.

Звичайні біполярні транзистори малочутливі до магнітного поля, оскільки поперечне магнітне поле призводить тільки до викривлення траєкторії руху неосновних носіїв заряду, що проходять через базу від емітера до колектора. У зв'язку з невеликою товщиною бази в звичайних біполярних транзисторах практично всі інжектованні емітером носії досягають колектора, незважаючи на викривлення траєкторії руху при $B \neq 0$.

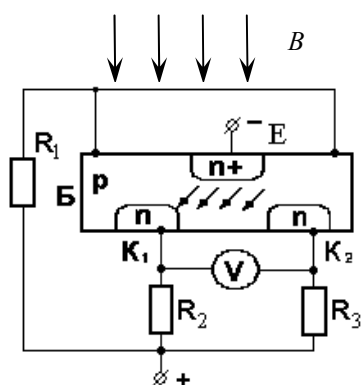


Рис. 3.6. Мостова схема включення магніотранзисторів

Для підвищення чутливості до B роблять два колекторних переходи. В цьому випадку магнітне поле відхиляє носії заряду від одного колектора до іншого. Основною схемою включення магніотранзисторів є мостова схема рис. 3.6.

Для слабких полів магніторезистори можуть забезпечити чутливість на декілька порядків більше, ніж чутливість перетворювачів Холла.

3.5. Індукційний метод

Індукційний метод базується на використанні закону електромагнітної індукції, який полягає у наведенні електрорушійної сили (е.р.с.) в електричній котушці при її розташуванні в змінному магнітному полі (рис. 3.7). Вхідною величиною індукційного перетворювача може бути магнітний потік Φ , який має з котушкою потокозчеплення

$$\Psi = W\Phi = WBS_{cp} \cos \alpha = W\mu HS_{cp} \cos \alpha, \quad (3.7)$$

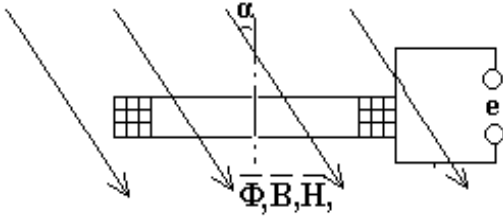


Рис. 3.7. Розташування котушки індуктивності у магнітному полі

де α – кут між віссю котушки та напрямком дії векторів $\vec{\Phi}, \vec{B}, \vec{H}$,

W – кількість витків котушки,

S_{cp} – середня площа котушки (для круглої катушки

$S_{cp} = 0,25\pi D_{cp}^2$, D_{cp} – середній діаметр котушки).

Вихідною величиною індукційного перетворювача є наведення в ній е.р.с. В однорідному магнітному полі та за умови $\mu = const$ е.р.с. становить

$$e(t) = -\frac{d\Psi}{dt} = -W \frac{d\Phi}{dt} = -W \frac{d}{dt} (BS_{cp} \cos \alpha) = -W\mu \frac{d}{dt} (HS_{cp} \cos \alpha). \quad (3.8)$$

Отже крім магнітного потоку як вхідні величини можуть розглядатись магнітна індукція або напруженість магнітного поля.

З (3.8) витікає, що застосування індукційних перетворювачів передбачає необхідність зміни в часі або параметрів магнітного поля, або геометричних розмірів котушки чи їх просторового розташування. У змінному магнітному полі, наприклад, гармонічному з круговою частотою ω , миттєве значення магнітного потоку $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$, а $e(t)$ становить $e(t) = -\omega W \Phi_m \cos \omega t$. Е.р.с. може вимірюватись вольтметрами амплітудних, діючих або середньоспрямлених значень. В цих трьох випадках амплітудне значення магнітного потоку визначається за формулами:

$$\Phi_m = \frac{U_m}{\omega W}, \quad (3.9)$$

$$\Phi_m = \frac{k_a U_d}{\omega W}, \quad (3.10)$$

$$\Phi_m = \frac{k_a k_\Phi U_{cc}}{\omega W}, \quad (3.11)$$

де U_m, U_d, U_{cc} – показання відповідно вольтметрів амплітудного, діючого та середньоспрямлених значень.

Для синусоїдального сигналу коефіцієнти амплітуди та форми становлять відповідно $k_a = U_m / U_d = \sqrt{2}$, $k_\phi = U_d / U_{cc} = \pi / 2\sqrt{2} \approx 1.11$.

Найчастіше індукційні перетворювачі конструктивно виготовляються у вигляді багатовиткових котушок прямокутної або круглої форми, прохідних (які охоплюють ОК) чи накладних (які "накладаються" на ОК для сканування його поверхні). В залежності від орієнтації котушки відносно поверхні ОК можна вимірювати тангенціальну (площина котушки розлашована перпендикулярно поверхні ОК) чи нормальну (площина котушки лежить паралельно поверхні ОК) складові магнітного поля розсіювання дефекта. Для підвищення чутливості перетворювачів та зменшення розмірів їх обладнують магнітними осердями з високою магнітною проникністю.

При виконанні завдань магнітної дефектоскопії у залишкових полях намагнічування виникає задача вимірювання параметрів постійних магнітних полів. Такі вимірювання із застосуванням індукційних перетворювачів виконують шляхом: 1) внесення і віддалення котушки з області досліджуваного поля при збереженні незмінною її орієнтацію у просторі відносно ОК, 2) вібрації котушки при її частковому виході за межі поля, 3) зміною кутового положення котушки у полі – обертанням у просторі з певною кутовою частотою Ω . В останньому випадку в конструкції перетворювача необхідно передбачити закріплення котушки на валу, який обертається двигуном. Отримання е.р.с. з котушки що обертається у найпростішому випадку можна реалізувати за допомогою колектора. Оскільки площа котушки відносно напрямку магнітного потоку при її обертанні змінюється за законом $S_{cp} \sin \Omega t$, то

$$e(t) = -\Omega WBS_{cp} \cos \alpha \cos \Omega t . \quad (3.12)$$

Чутливість такого перетворювача збільшується зі збільшенням Ω і може ся-

гати величини $\sim 100 \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$.

Інша оригінальна ідея вимірювання постійних магнітних полів за допомогою індукційного перетворювача реалізована у перетворювачі Барнетта. Хоча мініатюрне виконання такого перетворювача, необхідне для його використання в МНК, нашо́вхується на певні труднощі, варто познайомитись з принципом його дії. Конструкція перетворювача Барнетта представлена на рис. 3.8.

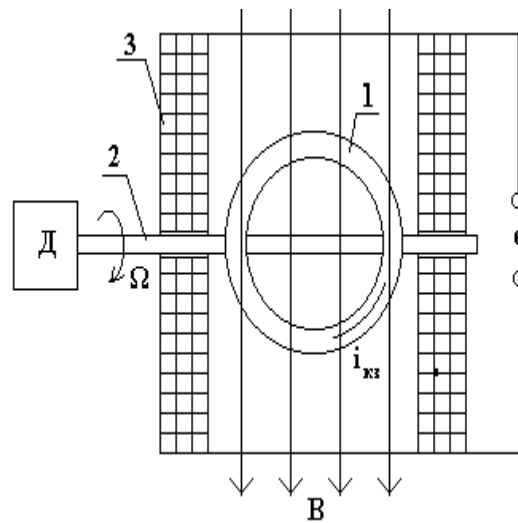


Рис. 3.8. Перетворювач Барнетта

Короткозамкнене провідне кільце 1 закріплене на валу 2, який обертається двигуном Д. Кільце 1 розташовано всередині нерухомої котушки індуктивності 3. Якщо такий перетворювач внести у досліджуване постійне магнітне поле з індукцією B , в кільці 1 буде індукуватись струм $i_{к3}(t)$, який створює вторинний магнітний потік $\Phi_2(t)$. Цей потік пронизує витки котушки 3 і наводить змінну е.р.с. $e(t)$. Отже ланцюжок перетворень можна представити послідовністю: $B \rightarrow i_{к3}(t) \rightarrow \Phi_2(t) \rightarrow e(t)$. Струм короткозамкненого витка в комплексному вигляді, який викликається індукованою у ньому е.р.с. $\dot{e}_{к3}(t)$ в аналітичній формі представляється виразом

$$i_{к3}(t) = \frac{\dot{e}_{к3}(t)}{\sqrt{R^2 + (j\Omega L)^2}}, \quad (3.13)$$

де R та L – активний опір та індуктивність кільця (для великих значень Ω маємо $R \ll \omega L$).

У відповідності з основним законом електромагнітної індукції

$$\dot{e}_{\text{к3}}(t) = -j\Omega S_{\text{к}} B e^{j\Omega t}, \quad (3.14)$$

де $S_{\text{к}}$ – площа кільця.

Вторинний магнітний потік становить

$$\dot{\Phi}_2(t) = L \dot{i}_{\text{к3}}(t) = -S_{\text{к}} B e^{j\Omega t}, \quad (3.15)$$

або в тригонометричній формі

$$\Phi_2(t) = -S_{\text{к}} B \cos \Omega t. \quad (3.16)$$

Проекція цього потоку на повздовжню вісь нерухомої котушки 3 та сумарний потік, що пронизує котушку 3, відповідно становлять

$$\Phi_{2n}(t) = \Phi_2(t) \sin \Omega t = -S_{\text{к}} B \cos \Omega t \sin \Omega t, \quad (3.17)$$

$$\Phi_{\text{с}}(t) = \Phi + \Phi_{2n}(t) = S_{\text{к}} B (1 - \cos \Omega t \sin \Omega t) = S_{\text{к}} B (1 - 0,5 \sin 2\Omega t). \quad (3.18)$$

Тепер нескладно визначити е.р.с., що наводиться у котушці 3

$$e(t) = -W \frac{d\Phi_{\text{с}}(t)}{dt} = W\Omega S_{\text{к}} B \cos 2\Omega t. \quad (3.19)$$

Розглянутий перетворювач має ряд переваг: 1) відсутність колектора, отже і відсутність шумів колектора, 2) подвійну частоту вихідного сигналу, що дозволяє застосувати частотну фільтрацію для зменшення рівня завад та шумів під час обробки сигналів. Даний метод перетворення дозволяє створювати давачі з порогом чутливості $\sim 10^{-10}$ Тл. Певні труднощі реалізації перетворювача пов'язані з наявністю в його конструкції деталей що обертаються.

3.6. Гальваномагнітні ефекти та їх використання в магнітній дефектоскопії

Гальваномагнітні ефекти – це сукупність ефектів, пов'язаних з впливом магнітного поля на електричні властивості провідників зі струмом. До їх числа належать ефекти Холла, Гаусса, Еттінгсгаузена, Нерста-Еттінгсгаузена Рігі-ледюка. Основна причина цих ефектів – викривлення траєкторій руху заряджених часток (електронів чи дірок) у магнітному полі під впливом сили Лоренца. Траєкторії руху заряджених часток у магнітному полі можуть суттєво відрізнятися від траєкторії руху вільних електронів у магнітному полі ("навитої" на магнітну силову лінію кругової спіралі) і залежать від електрофізичних властивостей речовини. Саме це і породжує цілий спектр гальваномагнітних явищ до яких належить і ефект Холла.

В практиці МНК найбільшого розповсюдження набули ефекти Холла та Гаусса.

3.6.1. Метод ефекта Холла

Метод ефекту Холла – це метод МНК, який ґрунтується на реєстрації магнітних полів ОК перетворювачами Холла. Ефект Холла був відкритий американським фізиком Е. Холлом у 1879 р.



Рис. 3.9. Едвін Герберт Холл (1855 – 1938)

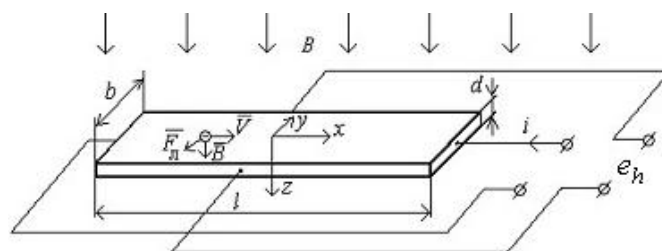


Рис. 3.10. Механізм виникнення е.р.с. Холла

Ефект Холла полягає у виникненні поперечної різниці потенціалів (е.р.с. Холла) під впливом струму і магнітної індукції, що діє у просторі перпендику-

лярно струму. В цьому випадку в перетворювачі має місце ще один ефект – ефект Еттінгсгаузена, який полягає у виникненні поперечної різниці температур і, як наслідок, – у виникненні поперечної термо-е.р.с. Але цей ефект значно слабший за ефект Холла і в перетворювачах Холла маскується останнім.

Розглянемо механізм виникнення е.р.с. Холла та отримаємо рівняння перетворення. Перетворювач Холла представлений на рис. 3.10 у вигляді напівпровідникової пластини з лінійними розмірами $l \times b \times d$ в системі координат xuz .

Для випадку, коли вектори $\bar{V}, \bar{F}_L, \bar{B}$ спрямовані вздовж координат xuz на заряджену частку – електрон, діє сила Лоренца $F_L = e_0VB$, де e_0 - заряд електрона. Під впливом сили Лоренца відбувається перерозподіл носіїв зарядів у перетворювачі - електрони концентруються біля однієї з поздовжніх граней перетворювача (на рис.3.8 біля дальньої грані). Внаслідок цього виникає різниця потенціалів між поздовжніми гранями перетворювача – е.р.с. Холла.

У свою чергу е.р.с. Холла створює електричне поле, яке діє вздовж координати y з напруженістю E_y . Отже на електрон крім сили Лоренца діє ще й сила електричної взаємодії $F_e = -e_0E_y$. Процес просторового розподілу зарядів йтиме до тих пір, поки сили, що діють на електрон, не врівноважуються. З умови рівноваги цих сил витікає рівняння: $E_y = VB$. Отже е.р.с. Холла

$$e_h(B) = E_y b = VBb. \quad (3.20)$$

Визначимо середню швидкість електронів V через струм i та концентрацію n електронів у матеріалі перетворювача

$$V = \frac{l}{t} = \frac{li}{Q} = \frac{i}{e_0 n b d}. \quad (3.21)$$

де Q – повний заряд електронів у об'ємі перетворювача lbd .

Підставивши (3.21) у (3.20) отримаємо

$$e_h(B) = \frac{iB}{e_0 n d} = \frac{R_h}{d} iB, \quad (3.22)$$

де $R_h = \frac{1}{e_0 n}$ – постійна Холла, має розмірність $\left[\frac{\text{м}^3}{\text{Кл}} \right]$.

R_h – це основна кількісна характеристика ефекту Холла, має знак, який співпадає зі знаком заряду частки.

Ефект Холла знайшов широке застосування в техніці магнітометрії і в магнітній дефектоскопії тільки після появи напівпровідникових матеріалів з високим коефіцієнтом Холла. Значення R_h та ν для деяких матеріалів наведено у табл.3.2.

Таблиця 3.2. Значення R_h та ν для деяких металів та напівпровідників

Параметри	метали	Si	Ge	InAs	InSb	InAs плівка	InSb плівка
$R_h, \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$	10^{-4}	10^6	10^3	10^2	55	~100	~400
$\nu, \frac{\text{см}^2}{\text{Вс}}$	~10	1900	3900	27000	55000	10000	12000

Рівняння перетворення (3.22) отримано у випадку, коли кут між векторами \vec{i}, \vec{B} становить $\alpha = 90^\circ$. Якщо ця умова не виконується, праву частину рівняння слід доповнити множником $\sin \alpha$. Крім того отримане рівняння справедливе для $l/b > 2 \div 3$ та $B > 1$ Тл. Тому у загальному випадку рівняння перетворення корегують певною функцією $f\left(\frac{l}{b}, B\right)$: $e_h(B) = \frac{R_x}{d} i B f\left(\frac{l}{b}, B\right) \sin \alpha$.

В технічних розрахунках постійна R_h часто визначається через *рухливість* ν носіїв зарядів. Рухливість визначається як відношення середньої швидкості носіїв зарядів до напруженості зовнішнього електричного поля, яке викликає цей рух. Для розглянутого на рис.3.8 перетворювача $\nu = \frac{V}{E_x} \left[\frac{\text{м}^2}{\text{Вс}} \right]$. Враховуючи останнє співвідношення вираз (3.22) представимо у вигляді

$$e_h(B) = VBb = vE_x Bb. \quad (3.23)$$

Оскільки струм перетворювача викликається е.р.с., яка дорівнює $E_x l$, можна записати

$$i = \frac{E_x l}{R} = \frac{E_x b d}{\rho}, \quad (3.24)$$

де R, ρ – відповідно електричний та питомий опори матеріалу перетворювача.

З урахуванням останнього співвідношення рівняння перетворення (3.22) можна представити у наступній формі

$$e_h(B) = \frac{v\rho}{d} iB = \frac{R_h}{d} iB. \quad (3.25)$$

Отже коефіцієнт Холла в цьому випадку представляється як $R_h = v\rho$.

Під час проектування приладів з перетворювачами Холла використовують таке поняття як *кут Холла*. За відсутності магнітного поля $e_h = 0$. Еквіпотенціальні лінії електричного поля в перетворювачі будуть перпендикулярні до поздовжніх граней перетворювача рис. 3.11. За умов дії індукції B перпендикулярно до

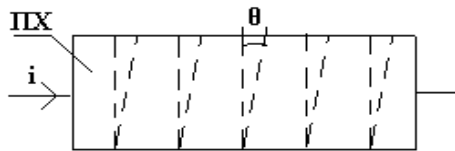


Рис. 3.11. Графічне представлення кута Холла

площини перетворювача еквіпотенціальні лінії відхиляються на деякий кут θ , який і називається кутом Холла і визначається як

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{E_y}{E_x} = vB. \quad (3.26)$$

Перетворювачі Холла конструктивно можуть бути виконані у різній формі, та найчастіше їх виготовляють у формі прямокутних паралелепіпедів (з розмірами $\sim 0,1 \times 0,5 \times 0,5$ мм і менше). До поперечних граней пластини підключають струмові електроди для пропускання через перетворювач струму. Поздовжні грані перетворювача з'єднують з т. з. холловськими електродами, на яких утворюється е.р.с. Холла. Останні електроди, як правило, підключаються за допомогою точкових контактів. Несиметричність цих контактів є причиною додаткової похибки перетворення Δe_h , яка може бути зменшена апаратурним шляхом.

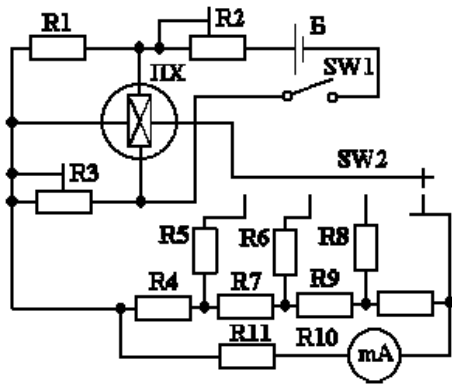


Рис. 3.12. Вимірювач магнітної індукції з перетворювачем Холла

розширено діапазон вимірювання вольтметра, який складається з міліамперметра та додаткового резистора R11.

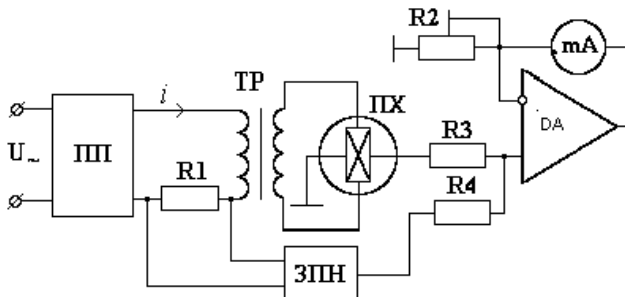


Рис. 3.13. Схема вимірювача магнітної індукції з визначенням e_h компенсаційним способом

напруги. Перетворювач Холла ПХ живиться змінним струмом амплітудою $ik_{тр}$, де $k_{тр}$ – коефіцієнт трансформації трансформатора ТР. Вихідна напруга ПХ компенсується напругою ЗПН, яка складає величину $ik_{ЗПН}R1$, де $k_{ЗПН}$ – коефіцієнт передачі напруги ЗПН. Регулюванням $k_{ЗПН}$ досягається рівність вихідних напруг ПХ та ЗПН. Момент досягнення цієї рівності фіксується міліамперметр mA (нульові показання mA). З рівності напруг ПХ та ЗПН витікає рівняння перетворення всієї схеми:

$$B = \frac{R1d}{R_h k_{тр}} k_{ЗПН}. \text{ Отже магнітна індукція однозначно ви-}$$

значається коефіцієнтом $k_{ЗПН}$ і не залежить від робочого струму (нестабільності джерела струму).

Розглянемо основні схеми вмикання перетворювачів Холла. Перетворювач ПХ в схемі рис. 3.12 живиться постійним струмом від батареї Б. Сила робочого струму регулюється резистором R2. Резистори R1 та R3 компенсують напругу несиметрії холловських електродів перетворювача. Резистори R4 ÷ R10 утворюють подільник напруги за допомогою якого

Суттєвим недоліком розглянутої схеми є залежність результатів вимірювань від нестабільності робочого струму. Цей недолік усунуто в схемі на рис.3.13, на якій позначено: ПП– підсилювач потужності, ЗПН – зразковий подільник напруги.

Перетворювачі Холла мають малу інерційність і тому можуть використовуватись не тільки для вимірювання параметрів постійних магнітних полів, але й імпульсних та змінних полів у частотному діапазоні до 10^{12} Гц.

Перетворювачі Холла знайшли широке застосування в техніці магнітних вимірювань завдяки цілому ряду унікальних властивостей і насамперед завдяки: 1) лінійній залежності е.р.с. від індукції, 2) можливості регулювання чутливості за рахунок зміни струму, 3) можливості вимірювань постійних, змінних та імпульсних полів, 4) малим розмірам, 5) практично нескінченному терміну роботи.

Найсуттєвішими вадами цих перетворювачів слід вважати: 1) залежність їх параметрів від температури, 2) значний розкид параметрів, що ускладнює взаємозамінність давачів.

Перетворювачі Холла широко застосовуються не тільки в магнітометрії, але й в інших областях техніки для вимірювання переміщень, безконтактного контролю просторової орієнтації ОК, пристроях магнітної автоматики, як аналогові перемножувачі сигналів.

3.6.2. Метод ефекта Гаусса

Метод ефекта Гаусса – це метод МНК, який ґрунтується на реєстрації магнітних полів розсіювання дефектів ОК магніторезисторами.

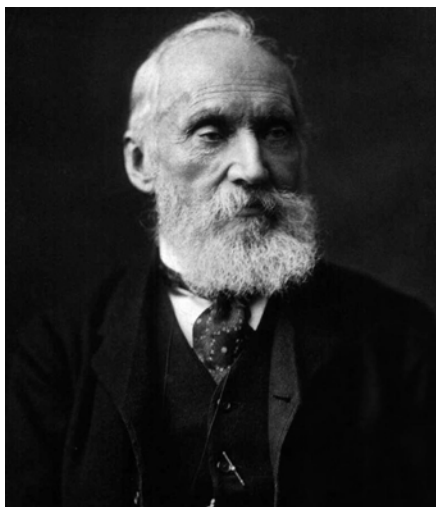


Рис. 3.14. Уільям Томпсон (Лорд Кельвін)
(1824 – 1907)

Магніторезистивний ефект (ефект Гаусса) вперше виявив у 1856 р. відомий британський фізик Уільям Томпсон (Лорд Кельвін). Цей ефект полягає у зміні поздовжнього опору провідника чи напівпровідника під впливом магнітного поля. Така зміна викликана викривленням траєкторій руху носіїв зарядів у магнітному полі внаслідок дії сили Лоренца.

У перетворювачах Холла магніторезистивний ефект маскується ефектом Холла: е.р.с. Холла протидіє викривленню траєкторій руху заряджених часток. Якби всі частки рухались з однаковою швидкістю, цей ефект був би зовсім відсутній у перетворювачах Холла. В дійсності швидкості руху часток у перетворювачі різні. Внаслідок цього для частини часток умови компенсацій електричної та магнітної складових сили Лоренца (3.20) не виконуються, тому траєкторії їх руху дещо подовжуються, а електричний опір перетворювача підвищується.

Кількісно магніторезистивний ефект характеризується відносною зміною питомого електричного опору перетворювача

$$\frac{\Delta\rho(B)}{\rho_0} = \frac{\rho_B(B) - \rho_0}{\rho_0} = Av^m B^m \quad (3.27)$$

де A – коефіцієнт форми, $A < 1$,

$\Delta\rho$ – абсолютна зміна питомого електричного опору, викликана дією індукції B ,

ρ_0 – питомий електричний опір перетворювача для $B=0$,

m – показник ступеня ($m=2$ у слабких магнітних полях при $B < 0,4$ Тл, $m=1$ при $B \gg 1$ Тл).

Наближений вивід формули (3.27) для слабких полів можна виконати з геометричних міркувань (див. рис. 3.15).

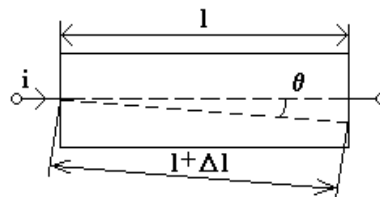


Рис. 3.15. Геометричне пояснення магніторезистивного ефекту

Оскільки відносна зміна питомого електричного опору пропорційна відносній зміні довжини шляху зарядженої частки у перетворювачі, то

$$\frac{\Delta\rho(B)}{\rho_0} = \frac{\Delta l(B)}{l} = \frac{l/\cos\theta - l}{l} = \frac{1 - \cos\theta}{\cos\theta} \approx 2\sin^2\frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta^2}{2} \approx \frac{v^2 B^2}{2}. \quad (3.28)$$

Чутливість магніторезистивного перетворювача залежить не тільки від електрофізичних властивостей матеріалу перетворювача, але й від його геомет-

ричної форми. Останнє враховано коефіцієнтом A у рівнянні (3.27). Магніторезистори виготовляються у вигляді плоских спіралей, пластин, решіток. Та найбільший магніторезистивний ефект отримують в перетворювачах спеціальної форми – дисках Корбіно (рис. 3.16).

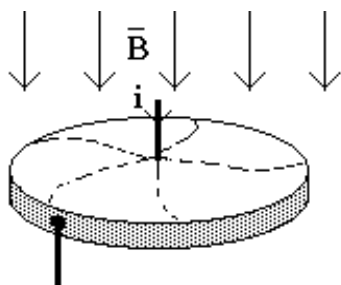


Рис. 3.16. Диск Корбіно



Рис. 3.17. Орсо Марио Корбіно (1876 – 1937)

Центральний електрод перетворювача підключено до центру диска, а другий – до периферії диска. В наслідок такої конструкції у перетворювача відсутні поздовжні грані, на яких утворюється е.р.с. Холла. За відсутності поля струм i від центрального електрода розповсюджується радіально до периферії напівпровідникового диску. При дії поля траєкторії часток викривляються і перетворюються з радіальних на логарифмічні спіралі (на рис. 3.15 умовно позначені преривчастими кривими). Орієнтовні залежності $\frac{\Delta\rho(B)}{\rho_0}$ від B для різних форм перетворювачів наведені на рис. 3.18.

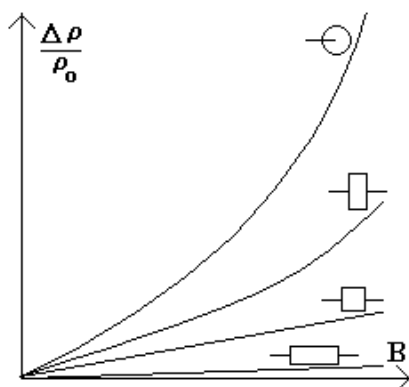


Рис. 3.18. Залежність $\frac{\Delta\rho(B)}{\rho_0}$ для різних форм магніторезисторів

Слід зауважити, що диск Корбіно має найменшу порівняно з перетворювачами інших форм навантажувальну спроможність. Це пояснюється підвищеною

густиною струму в області центрального електроду диска.

З рівняння (3.27) можна отримати рівняння перетворення магніторезистора, яке пов'язує його електричний опір R_B з індукцією поля B

$$R_B(B) = R_0(1 + Av^m B^m), \quad (3.29)$$

де R_0 – опір перетворювача при $B=0$.

Як правило опір перетворювачів не перевищує одиниць-десятків омів, що ускладнює їх застосування у високоомних ланцюгах. Для підвищення опору перетворювача та його чутливості використовують послідовне включення декількох перетворювачів.

Основною вимірювальною схемою магніторезисторів є мостова схема Максвелла (рис. 3.19). Для підвищення чутливості схеми магніторезистори вмикаються у протилежні плечі моста. У випадку живлення схеми від джерела постійного струму силою $I_{ВХ}$ для контуру ABC у відповідності до другого закону Кірхгофа складемо рівняння

$$R_B(B)I - U_{ВИХ}(B) - R_0I = 0. \quad (3.30)$$

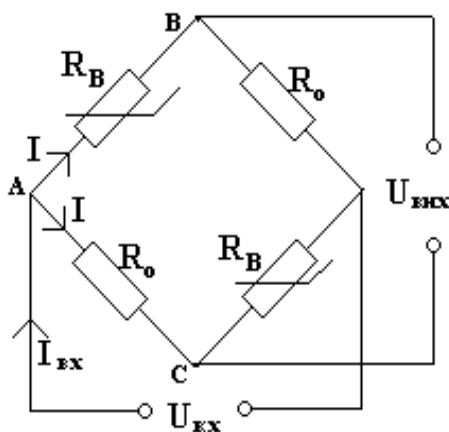


Рис. 3.19. Схема включення магніторезистивних перетворювачів

З урахуванням того, що $I = 0.5I_{ВХ}$ вихідна напруга становить

$$U_{ВИХ}(B) = \frac{I_{ВХ}}{2}(R_B(B) - R_0) = \frac{I_{ВХ}}{2} R_0 \frac{\Delta R(B)}{R_0} = \frac{I_{ВХ}}{2} R_0 Av^m B^m. \quad (3.31)$$

З останнього рівняння визначимо магнітну індукцію

$$B = \frac{1}{v} m \sqrt{\frac{2U_{ВИХ}(B)}{R_0 I_{ВХ} A}}. \quad (3.32)$$

Чутливість мостової схеми з магніторезистивними перетворювачами становить

$$S_B = \frac{dU_{\text{вих}}(B)}{dB} = \frac{I_{\text{вх}}}{2} R_o A m v^m B^{m-1}. \quad (3.33)$$

У випадку живлення мостової схеми від джерела напруги силою $U_{\text{вх}}$ маємо

$$U_{\text{вих}}(B) = \frac{U_{\text{вх}}}{1 + 2A^{-1}v^{-m}B^{-m}}, \quad (3.34)$$

$$B = \frac{1}{v} m \sqrt{\frac{2U_{\text{вих}}(B)}{A(U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}(B))}}. \quad (3.35)$$

Порівнюючи вирази (3.32) та (3.35) можна зробити висновок, що більш доцільним для вимірювання значних магнітних індукцій є варіант живлення мостової схеми від джерела струму оскільки в цьому випадку для $m=1$ рівняння перетворення стає лінійним.

Розглянуті рівняння перетворення для мостової схеми отримані з припущення, що магніторезистори мають ідентичні параметри. Але цю вимогу виконати на практиці неможливо. Навіть якщо виготовити магніторезистори з одного матеріалу (з однаковою рухливістю носіїв зарядів) та з ідентичними геометричними розмірами (з однаковими коефіцієнтами форми) перетворювачі відрізнятимуться показниками ступенів – $m_1 \neq m_2$. Викликана цією причиною відносна зміна вихідної напруг мостової схеми становить

$$\gamma_U = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} \cdot 100\% = 50 \left[(vB)^{m_2 - m_1} - 1 \right] \%. \quad (3.36)$$

Магніторезистори порівняно з перетворювачами Холла є більш простими приладами. Магніторезистори мають невеликі розміри і дозволяють вимірювати компоненти магнітного поля як на поверхні намагнічених ОК, так і в щілинах та зазорах. Певним недоліком магніторезисторів є значна температурна (до $\sim 1.2\%$) та частотна (до $\sim 10\%$ в діапазоні від 0 до 10 мГц) залежності.

3.7. Метод ферозонда

Ферозонди – це магніточутливі магнітомодуляційні перетворювачі, в яких реалізується процес взаємодії двох полів – зовнішнього (постійного вимірюваного) з напруженістю H_x і власного змінного поля збудження напруженістю H_{\sim} .

Принцип дії ферозондів ґрунтується на явищі зміни магнітного стану феромагнетика, намагнічуваного змінним магнітним полем збудження. Існує декілька різновидів ферозондів, які відрізняються: а) способом збудження (диференціальний і недиференціальний); б) просторовою орієнтацією магнітних полів – ферозонди з поздовжнім і поперечним збудженням; в) формою феромагнітного осердя (стержневі, кільцеві, трубчасті).

3.7.1. Недиференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням

Найпростіший ферозонд (рис. 3.20) складається з осердя, виконаного із магнітом'якого матеріалу у формі стержня, на якому розміщено дві обмотки: збуджуюча з числом витків W_1 та вимірювальна W_2 .

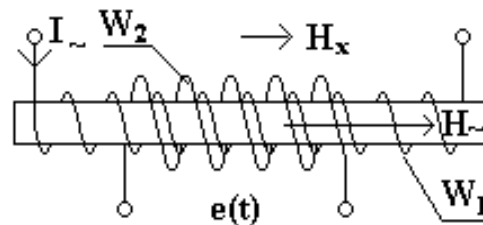


Рис. 3.20. Недиференційний ферозонд з поздовжнім збудженням

Нагадаємо, що магнітом'які матеріали характеризуються високим значенням початкової і максимальної магнітної проникності та малою коерцитивною силою, здатні намагнічуватись до насичення в слабких магнітних полях і мають малі витрати на перемагнічування.

Обмотка збудження живиться змінним струмом такої амплітуди, щоби довести осердя до стану близькому до насичення. Е.р.с. вимірювальної котушки такого

феррозонда дорівнює

$$e(t) = -W_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} = -W_2 S_o \frac{dB(t)}{dt} = -W_2 S_o H \frac{d\mu(t)}{dt}, \quad (3.37)$$

де W_2 – кількість витків вимірювальної обмотки,

S_o – площа перетину осердя ферозонду,

Φ – магнітний потік осердя,

B – магнітна індукція осердя,

μ – абсолютна магнітна проникність осердя.

Формула (3.37) складена з урахуванням того, що за межами осердя магнітний потік практично дорівнює нулю. Такий ферозонд має багато вад, найсуттєвішою з яких є та, що вихідна е.р.с. залежить не тільки від напруженості H_x вимірюваного поля, але й від напруженості H_{\sim} поля збудження ($H_{\sim} \gg H_x$). Дійсно, представивши магнітну індукцію в осерді рядом Тейлора і обмежившись першими трьома членами маємо

$$\begin{aligned} B(H) &= B(H_{\sim} + H_x) = \\ &= B(H_{\sim}) + H_x \frac{dB(H_{\sim})}{dH_{\sim}} + \frac{1}{2} H_x^2 \frac{d^2 B(H_{\sim})}{dH_{\sim}^2} + \dots \cong B(H_{\sim}) + \mu_d H_x + \frac{1}{2} H_x^2 \frac{d\mu_d}{dH_{\sim}}. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Магнітний потік в осерді дорівнює

$$\Phi = S_o B = S_o \left[B(H_{\sim}) + \mu_d H_x + \frac{1}{2} H_x^2 \frac{d\mu_d}{dH_{\sim}} \right]. \quad (3.39)$$

Тоді вихідна е.р.с. ферозонда

$$\begin{aligned} e(t) &= -W_2 S_o \frac{d}{dt} \left[B(H_{\sim}) + \mu_d H_x + \frac{1}{2} H_x^2 \frac{d\mu_d}{dH_{\sim}} \right] = \\ &= -W_2 S_o \left[\frac{dB(H_{\sim})}{dt} + H_x \frac{d\mu_d}{dt} + \frac{1}{2} H_x^2 \frac{d}{dt} \frac{d\mu_d}{dH_{\sim}} \right]. \end{aligned} \quad (3.40)$$

У формулі (3.40) μ_d – диференційна магнітна проникність. Аналітична залежність між μ_d і нормальною (недиференціальною) магнітною проникністю μ

відома: $\mu_d(H) = \mu + H \frac{d\mu}{dH}$. Вона свідчить, що $\mu_d = \mu$ тільки тоді, коли або $H = 0$, або $\mu_d = const$ (в слабких магнітних полях). У всіх інших випадках $\mu_d \neq \mu$. Крім того, залежність $\mu_d(H)$ характеризується набагато більшою нелінійністю, ніж залежність $\mu(H)$. Співпадаючи з μ в слабких магнітних полях ($H_x \rightarrow 0$), μ_d різко зменшується при насиченні осердя (μ мале і $\frac{d\mu}{dH}$ також). Залежність $\mu_d = f(H)$ має вигляд зображений на рис. 3.21, і виходить із залежності $B = f(H)$ шляхом диференціювання магнітної індукції по напруженості магнітного поля.

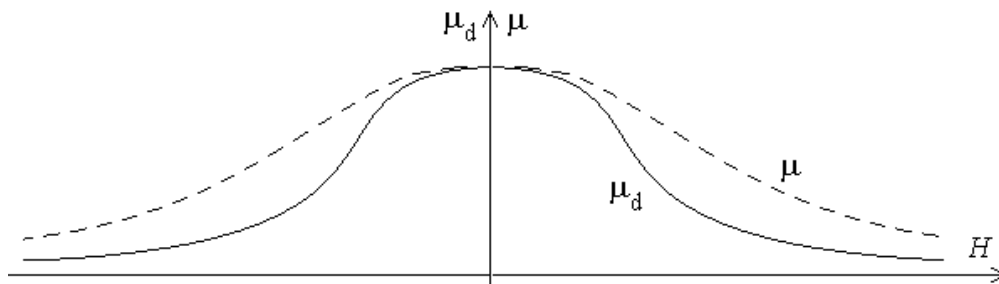


Рис. 3.21. Загальний вид залежностей $\mu(H)$ та $\mu_d(H)$

Таким чином вихідна е.р.с. (3.40) є сумою двох складових:

- 1) складової, обумовленої магнітним полем збудження H_{\sim} ;
- 2) складової, обумовленої магнітним полем ОК H_x .

Якщо $H_x = 0$, то $e_2(t) = -W_2 S_o \frac{dB(H_{\sim})}{dt} \neq 0$. Наприклад, якщо магнітна індукція в

осерді змінюється за синусоїдальним законом – $B(t) = B_m \sin 2\pi f t$ з частотою f , то

$$e(t) = -2\pi f W_2 S_o B_m \cos 2\pi f t,$$

і амплітуда цієї е.р.с. становитиме $E_m = 2\pi f W_2 S_o B_m$.

Таким чином, навіть при $H_x = 0$ вихідна е.р.с. не дорівнює нулю. Цей недолік відсутній у диференціальному ферозонді.

3.7.2. Диференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням

Розглянемо диференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням (рис. 3.22). Він має два ідентичні пермалоевих (пермалой – магнітомякий сплав Ni та Fe) стержні з нанесеними на них обмотками намагнічування W' і W'' , включеними послідовно і назустріч. Вимірювальна обмотка з числом витків W_2 є загальною для обох стержнів. Амплітудне значення напруженості поля намагнічування H_{\sim} повинно бути значно більшим за напруженість досліджуваного постійного поля H_x і достатнім для намагнічування осердь до стану насичення.

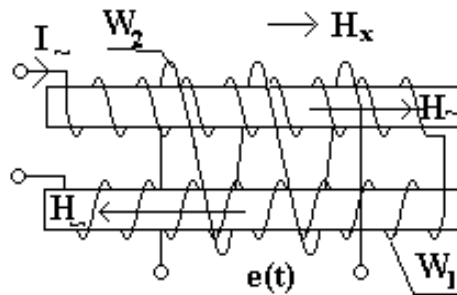


Рис. 3.22. Диференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням

За відсутності досліджуваного поля ($H_x=0$) в результаті зустрічного включення ідентичних напівобмоток збудження значення наведеної у вимірювальній обмотці е.р.с. практично дорівнює нулю. За наявності досліджуваного поля напруженістю H_x магнітні потоки в першому і другому осердях будуть відрізнятися внаслідок чого у вимірювальній обмотці індукватиметься е.р.с. пропорційна поздовжній складовій напруженості вимірюваного поля (напруженості H_x).

Оскільки $H_x \ll H_{\sim}$, залежність магнітної індукції в кожному осерді від напруженості поля $H = H_{\sim} \pm H_x$ можна з достнім ступенем точності представити у вигляді ряду Тейлора (за умови, що функція $B(H)$ на інтервалі $[H_{\sim}, H_{\sim} \pm H_x]$ неперервна і має неперервні похідні від першої до n -ної включно). Обмежуючись трьома першими членами ряду одержимо вираз для магнітної індукції в 1 і 2 осердях:

$$B_1(t) = B(H_{\sim}(t) + H_x) \approx B(H_{\sim}) + H_x \frac{dB(t)}{dH_{\sim}} + \frac{1}{2} H_x^2 \frac{d^2 B(t)}{dH_{\sim}^2}, \quad (3.41)$$

$$B_2(t) = B(H_{\sim}(t) - H_x) \approx B(H_{\sim}) - H_x \frac{dB(t)}{dH_{\sim}} + \frac{1}{2} H_x^2 \frac{d^2 B(t)}{dH_{\sim}^2}. \quad (3.42)$$

Результуюча дія магнітного потоку на вимірювальну обмотку W_2 оцінюється за різницею індукцій B_1 і B_2 :

$$\Phi_{\text{рез}}(t) = \Phi_1(t) - \Phi_2(t) = S_o(B_1(t) - B_2(t)) = 2S_o H_x \frac{dB(t)}{dH_{\sim}} = 2S_o H_x \mu_d(t), \quad (3.43)$$

а індукована в обмотці W_2 е.р.с. становить

$$e_2(t) = -\frac{\partial \Psi_{\text{рез}}}{dt} = -W_2 \frac{d\Phi_{\text{рез}}}{dt} = -2W_2 S_o H_x \frac{d\mu_d(t)}{dt} \quad (3.44)$$

Одержаний загальний вираз для е.р.с. (3.44) свідчить про те, що вона визначається тільки напруженістю досліджуваного постійного магнітного поля H_x і швидкістю зміни диференціальної магнітної проникності. При $H_x=0$ або $\mu_d = \text{const}$ маємо $e_2(t) = 0$.

Якщо осердя збуджуються синусоїдним змінним струмом (рис. 3.23,б) достатнім для їх насичення, то характер зміни $\mu_d(\omega t)$ матиме вигляд, зображений на рис. 3.23,в.

На рис. 3.23,г показана залежність $e(\omega \cdot t)$, пропорційна похідній $-\frac{d\mu_d}{dt}$. Як видно з цього рисунка на ділянці зміни ωt від 0 до $\pi/2$ ця залежність не залишається постійною: коли ωt прямує до значень $k\pi/2$, $k = 0,1,2,\dots$, значення $\frac{d\mu_d}{dt}$ (отже і $e(\omega t)$) прямує до 0, а при $\omega t = k\pi \pm \theta$ (θ - т.з. кут насичення осердя) $e(\omega t)$ приймає екстремальні значення.

З цієї причини форма вихідної е.р.с. $e(\omega t)$ навіть за наявності близького до нуля значення H_x відрізняється від синусоїдальної і має вид гострих піків.

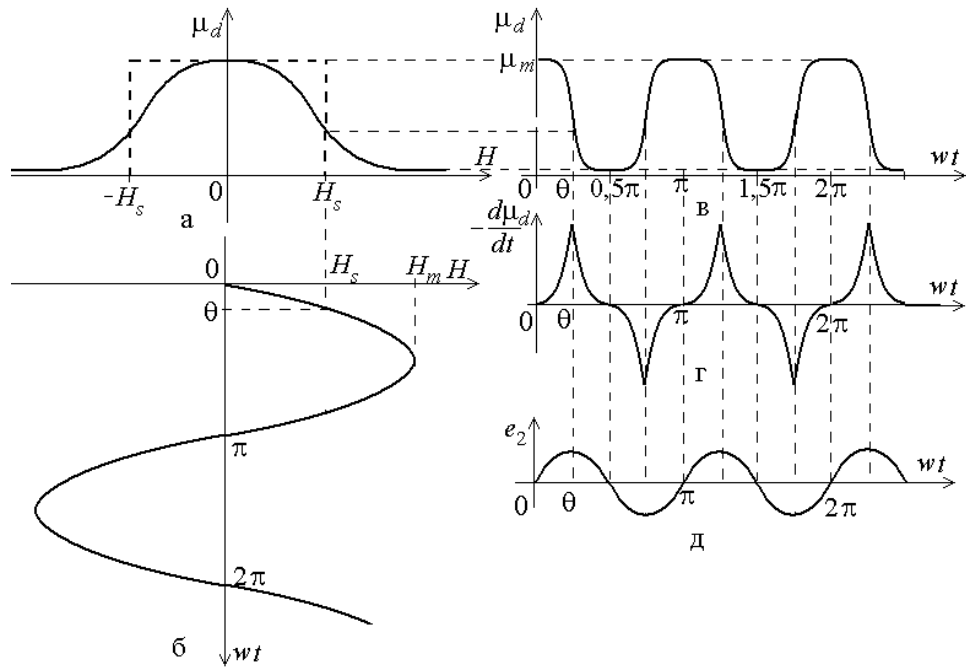


Рис. 3.23. Графіки, що пояснюють процес утворення вихідної е.р.с. ферозонда

Оскільки функція $\mu_d(H)$ парна, то криві $\mu_d(\omega t)$ і $e(\omega t)$ міститимуть тільки парні гармоніки. Про це, зокрема, свідчать і криві цієї залежності, оскільки частоти їх змін перевищують в 2 рази частоту напруженості магнітного поля збудження H_{\sim} , (частоту струму збудження I_{\sim}). Через це і за умови $H_{\sim} \gg H_x$ часова залежність диференціальної магнітної проникності може бути представлена рядом Фур'є

$$\mu_d(\omega t) = \mu_{\text{cp}} + \sum_{n=1}^{\infty} \mu_{2n} \cos 2n\omega t, \quad (3.45)$$

де μ_{cp} – середнє значення (постійна складова) диференціальної магнітної проникності

$$\mu_{\text{cp}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \mu_d(\omega t) d\omega t,$$

μ_{2n} – амплітуди парних гармонік диференціальної магнітної проникності

$$\mu_{2n} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \mu_d(\omega t) \cos 2n\omega t d\omega t. \quad (3.46)$$

З урахуванням цих виразів е.р.с. що наводиться у вимірювальній котушці ферозонда дорівнює

$$e(t) = 4\omega W_2 S_o H_x \sum_{n=1}^{\infty} n \mu_{2n} \sin(2n\omega t). \quad (3.47)$$

Амплітуди парних гармонік диференціальної магнітної проникності (коефіцієнти розкладання в ряд Фур'є) можна обчислити якщо відома функціональна залежність $B(H)$ або $\mu_d(H)$. Оскільки, аналітичний вираз цієї залежності невідомий, то $\mu_d(H)$ апроксимують ламаною лінією П-подібної форми (рис. 3.23а) (рівною μ_m на інтервалі $(-H_s, +H_s)$, де H_s – напруженість магнітного поля насичення, і рівною нулю за межами цього інтервалу). Отриманий при цьому кут θ називається *кутом насичення осердь* і визначається за вельми наближеними формулами:

$$\frac{H_s}{H_m} \approx \frac{\sin \theta}{\sin 0.5\pi} = \sin \theta, \quad (3.48)$$

або

$$\frac{H_s}{H_m} \approx \frac{2\theta}{\pi}. \quad (3.49)$$

Визначення коефіцієнтів μ_{2n} з (3.47) виконується на основі використання П-подібної апроксимації функції $\mu_d(\omega t)$ (див. рис. 3.23, а)

$$\mu_{2n} \approx \frac{\mu_m}{H_m} \int_{-H_m}^{H_m} \cos \frac{\pi n H}{H_m} dH = \frac{2\mu_m}{\pi n} \sin \left(\pi n \frac{H_s}{H_m} \right) = \frac{2\mu_m}{\pi n} \sin(2n\theta). \quad (3.50)$$

Оскільки амплітудне значення е.р.с. будь-якої парної гармоніки дорівнює

$$E_{2n} = 4\omega W_2 S_o H_x n \mu_{2n} \quad (3.51)$$

чутливість ферозонда по цій гармоніці становить

$$S_{2n} = \frac{dE_{2n}}{dH_x} = 4\omega W_2 S_o n \mu_{2n} = 8\omega W_2 S_o n \frac{\mu_m}{\pi n} \sin(2\pi n \theta). \quad (3.52)$$

Зазвичай для вимірювання вихідної е.р.с. використовують тільки другу гармоніку. Е.р.с. цієї гармоніки становить $e_2(t) = 4\omega W_2 S_{cm} H_x \mu_2 \sin 2\omega t = E_2 \sin 2\omega t$,

де $E_2 = 4\omega W_2 S_o H_x \mu_2$ – амплітуда другої гармоніки е.р.с. Чутливість ферозонда по другій гармоніці складає

$$S_2 = \frac{8\omega W_2 S_o m}{\pi} \sin 2\theta. \quad (3.53)$$

Оскільки $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$, то $\sin 2\theta = 2 \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m}\right)^2}$. Підставляючи цей

вираз у (3.55) отримаємо

$$S_2 = \frac{16\omega W_2 S_o \mu_m}{\pi} \cdot \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m}\right)^2}.$$

На практиці для розрахунку диференціального ферозонда з поздовжнім збудженням користуються формулою

$$S_2 = 32 f W_2 S_o \mu_m \varepsilon \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m}\right)^2}, \quad (3.54)$$

що враховує конструктивні параметри ферозонда за рахунок уведення у формулу безрозмірного коефіцієнта ε , який залежить від конструктивних параметрів ферозонда :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3,$$

де ε_1 – коефіцієнт, який залежить від відстані між осердями ферозонда

ε_2 – коефіцієнт, який залежить від середнього діаметра вимірювальної обмотки

ε_3 – коефіцієнт, який враховує шунтуючу дію осердь або яких-небудь металевих частин, створюючих короткозамкнуті витки по відношенню до вимірювальної обмотки.

Коефіцієнт ε_1 , при $\frac{l}{L} > 20$, де l – довжина осердя, L – відстань між серединними

площин осердь, визначається за формулою $\varepsilon_1 = \frac{2 - \exp(-\frac{L}{V})}{2}$.

Параметр V для осердя прямокутної форми перерізу (рис. 3.24,а) визначається як

$$V = 2b \left(\ln \frac{kl}{b+h} - 1 \right),$$

де b – ширина поперечного перерізу осердя,

h – його товщина,

k – коефіцієнт, залежний від форми осердя.

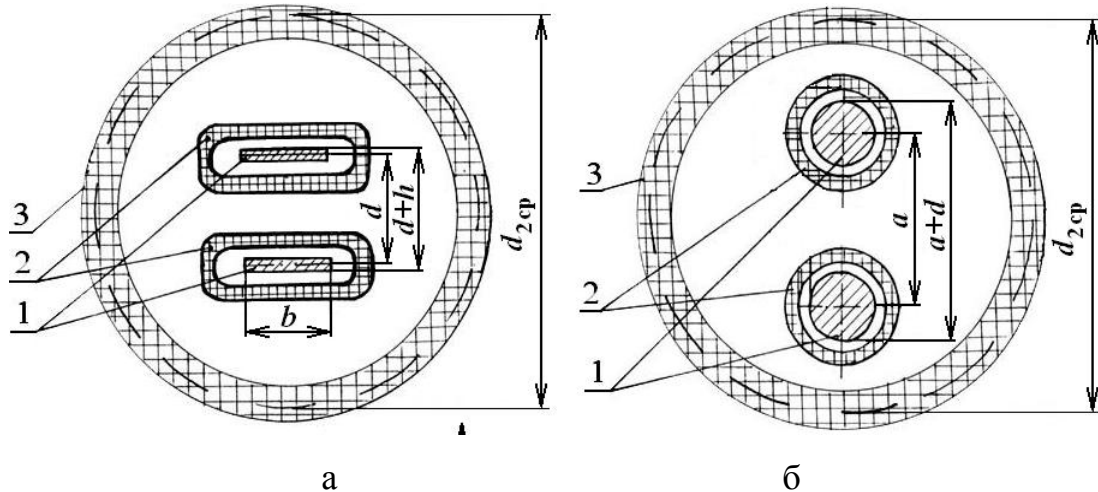


Рис. 3.24. Перетини ферозондів з осердями прямокутної (а) та круглої (б) форми

Для циліндричного осердя (рис. 3.24,б) діаметра d маємо $b=h=d$ і

$$V = 2d \left(\ln \frac{kl}{2d} - 1 \right).$$

Коефіцієнт ε_2 визначається за формулою

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\sqrt{1.5 \left(\frac{d_{cp}}{l} \right)^2 + 1}},$$

де d_{cp} – середній діаметр вимірювальної обмотки ферозонда.

Коефіцієнт ε_3 , як правило, прирівнюється одиниці, оскільки у конструкціях ферозондів уникають утворення короткозамкнених по відношенню до вимірювальної котушки контурів.

Виконаємо аналіз виразу (3.54) як функції виду $S_2 = f\left(\frac{H_s}{H_m}\right)$ на наявність екстремумів. Для зниження трудомісткості диференціювання позначимо $\frac{H_s}{H_m} = p$, $32fW_2S_{cm}\mu_{\max}\varepsilon = k$. Представимо рівняння чутливості ферозонда як

$$S_2 = kp\sqrt{1-p^2} = kp(1-p^2)^{\frac{1}{2}}.$$

Розв'язок рівняння $\frac{dS_2}{dp} = k \left[(1-p^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}(1-p^2)^{-\frac{1}{2}}(-2p) \right] = 0$ дає наступний

результат: $p = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Отже максимальна чутливість ферозонда досягається при $\frac{H_m}{H_s} = \sqrt{2}$.

Зазвичай амплітудне значення напруженості магнітного поля збудження ферозонда обирають з умови $H_m > \sqrt{2}H_s$ для забезпечення стійкості роботи і низького рівня шумів.

3.7.3. Способи включення ферозондів з поздовжнім збудженням

Відомі різні типи та модифікації ферозондів. Однак в магнітній дефектоскопії найбільшого поширення набули дві модифікації диференціальних ферозондів з поздовжнім збудженням.

Полемір (рис. 3.25, а): котушки струмом збудження вімкнені диференціально, а вимірювальні - узгоджено. В цьому випадку вихідна е.р.с. перетворювача пропорційна абсолютному значенню напруженості вимірюваного магнітного поля.

Градiєнтомір (рис.3.25, а) : котушки зі струмом збудження вімкнені узгоджено, а вимірювалі – диференціально. Вихідна е.р.с. перетворювача пропорційна різниці напруженостей вимірюваного магнітного поля, що діють на осердя ферозонда. Таке

включення дозволяє суттєво зменшити вплив магнітних завад, що утворені віддаленими від ферозонда джерелами магнітного поля (наприклад, поля Землі), визначити нерівномірність розподілу магнітного поля над ОК, і таким чином, виявити місцерозташування дефектів у намагніченому ОК.

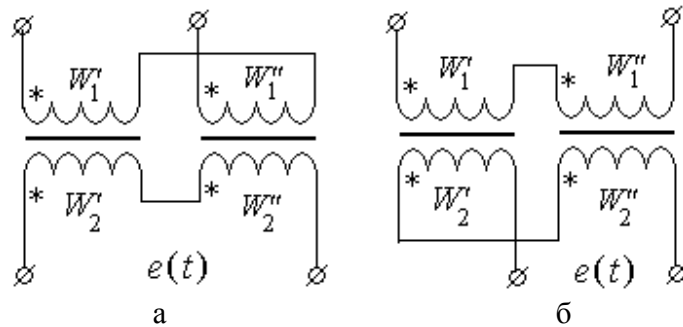


Рис. 3.25. Включення котушок диференціальних ферозондів з поздовжнім збудженням за схемою полеміра (а) та градієнтміра (б)

Рівняння вимірювання для градієнтміра лишається практично незмінним з тією різницею, що замість значення напруженості магнітного поля H_x необхідно врахувати $\Delta H_x = H'_x - H''_x$,

$$E_2 = 4\omega W_2 S_0 \Delta H_x \mu_2,$$

де H'_x, H''_x - напруженості контрольованого магнітного поля, що діють на перше і друге осердя ферозонда.

3.7.4. Ферозонди з поперечним збудженням

Такі ферозонди вперше запропоновані в СРСР групою співробітників Горьківського фізико-технічного інституту. Конструкція ферозонда надзвичайно проста. В якості осердя використаний пермалоевий дріт (рис. 3.26), по якому протікає змінний струм, що створює циркулярне (поперечне до поздовжньої осі дроту) магнітне поле, що періодично намагнічує дріт. У напрямку поздовжньої осі дроту нанесена вимірювальна обмотка, в якій за наявності зовнішнього магнітного поля напруженістю H_x індукується е.р.с.

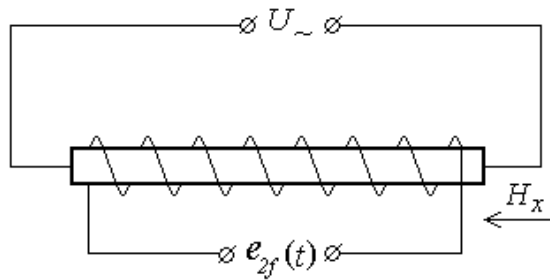


Рис. 3.26. Найпростіший ферозонд з поперечним збудженням

Удосконалені модифікації дротових ферозондів наведені нижче на рис.3.27: а) ферозонд з трубчастим осердям; б) ферозонд з коаксіальним осердям; в) диференціальний ферозонд. У цих конструкціях замість дротових осердь використані трубчасті які: 1) не розігріваються струмом збудження, тому що він протікає по тороїдальній обмотці або по осьовому проведенню; 2) рівномірно намагнічуються по товщині в повному об'ємі внаслідок малої товщини трубок; 3) мають необхідну твердість.

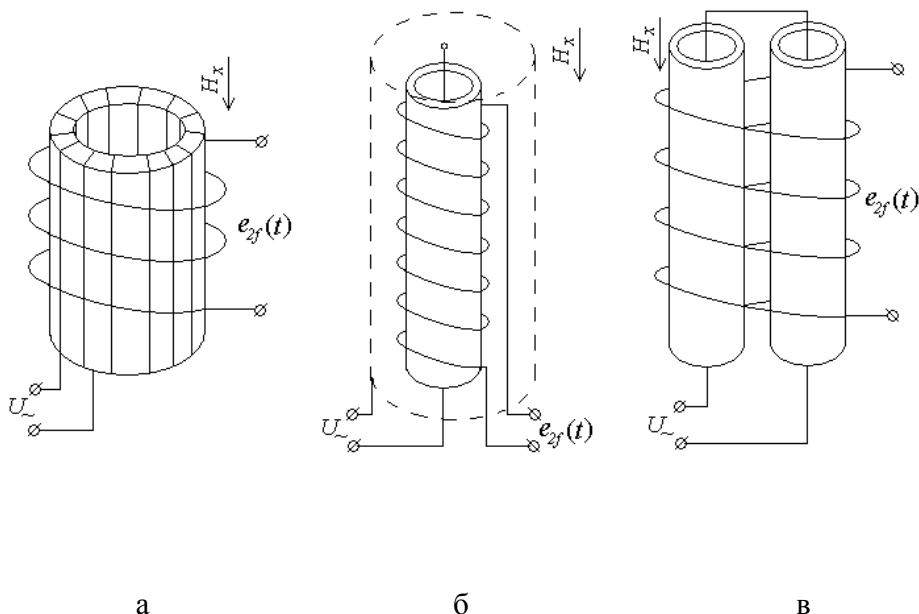


Рис. 3. 27. Конструкції ферозондів з поперечним збудженням з трубчастим осердям (а), з коаксіальним осердям (б) та диференціальний (в)

На звукових частотах (1...10 кГц) найбільш доцільною формою осердя є трубчаста (рис. 3. 27,а).

Якщо напруженість $H_x = \frac{B_x}{\mu_0}$ досліджуваного магнітного поля (поздовжнього по відношенню до осердя ферозонда) мала, то напруженість в осерді $H_{oc} = \frac{B_{oc}}{\mu}$ дорівнює напруженості досліджуваного магнітного поля H_x (B_{oc} – магнітна індукція в осерді, створювана зовнішнім досліджуваним полем). Це пояснюється тим, що магнітне поле часток порошку в осерді

$$H_{oc} = H_x - H' = H_x - NJ.$$

Оскільки коефіцієнт розмагнічування $N \ll 1$, а намагніченість осердя J мала внаслідок невеликої напруженості H_x , то $H_{oc} \approx H_x$. Отже магнітна індукція в осерді, створювана зовнішнім магнітним полем визначається як

$$B_{oc} = \mu H_{oc} = \mu H_x = \frac{\mu}{\mu_0} \mu_0 H_x = \mu_0 \mu^* H_x.$$

При накладенні на постійне досліджуване поле H_x поперечного поля з напруженістю H_N (при включенні струму збудження) і при $H_x = const$, нормальна відносна магнітна проникливість осердя μ^* змінюється за рахунок впливу поперечного магнітного поля H_N . Тоді

$$B_{oc}(H_x, H_N) = \mu_0 \mu^*(H_N) H_x.$$

Якщо $H_N(t) = H_m \sin(\omega t)$ то при $H_m = const$

$$B_{oc}(t) = \mu_0 \mu^*(t) H_x$$

Тоді е.р.с, що наводиться у вимірювальній обмотці ферозонда становить

$$e = -W_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} = -W_2 S_0 \frac{dB_{oc}(t)}{dt} = -\mu_0 W_2 S_0 H_x \frac{d\mu^*(t)}{dt}$$

Чутливість ферозонда по другій гармоніці визначається виразом

$$S_2 = 2\pi f W_2 S_0 \mu_0 \mu_c^* \varepsilon \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2H_S}{H_m}\right) = \pi f W_2 S_0 \mu_0 \mu_c^* \varepsilon \left(1 - \frac{2H_S}{H_m}\right). \quad (3.55)$$

Дослідження функції $S_2 = f\left(\frac{H_S}{H_m}\right)$ (3.55) на екстремуми засвідчують, що чутливість фєрозонда з поперечним збудження не має максимуму. У той же час маємо $S_2 = 0$ при $\frac{H_m}{H_S} = 2$. Криві залежності $S_2 = f\left(\frac{H_S}{H_m}\right)$ для фєрозондів з поздовжнім і поперечним збудження наведені на рис. 3.28 (крива 1 для фєрозонду з поздовжнім збудженням, 2 – з поперечним збудженням, 3 - експериментальна крива для ф. з із поперечним збудженням).

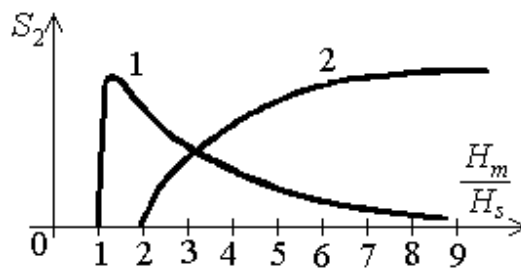


Рис. 3.28. Залежності чутливості фєрозондів з поздовжнім (крива 1) і поперечним (крива 2) збудженням від відношення H_m/H_S

Порівнюючи криві 1 і 2 можна зробити висновок, що крива 2 має більш монотонний характер, причому зі зростанням H_m чутливість S_2 фєрозонда залишається досить близькою до максимального значення. В той же час чутливість фєрозонда з поздовжнім збудженням має максимум при $\frac{H_m}{H_S} = \sqrt{2}$.

Похибка результату розрахунку чутливості за наведеними вище формулам (3.54) та (3.55) не перевищує 20-30%, що пов'язано з похибками апроксимації функції $\mu^*(\omega t)$.

3.8. Метод віброзонда

Цей метод ґрунтується на використанні віброзондів – пристроїв, в яких обертальний рух замінюється коливальним, а електромеханічний привід міститься безпосередньо в самому перетворювачі.

Відомі віброзонди двох типів: α -типа і s -типа.

Віброзонди α -типу представлені на рис. 3. 29 на якому позначено: 1 – силова котушка, 2 – вимірювальна котушка, 3 – протидіюча пружина.

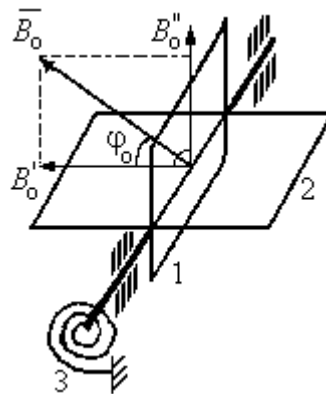


Рис. 3.29. Схематичне зображення віброзонда α -типу

Для отримання кутових коливань вимірювальної котушки 2 застосовують додаткову силову котушку 1, яка жорстко зв'язана з котушкою 2 та пружиною 3. По силовій котушці пропускають змінний струм, який взаємодіє з вимірюваним постійним магнітним полем і викликає її коливання.

Миттєве значення обертального моменту котушки дорівнює

$$M(t) = \lambda W_1 S_1 i(t) B_0 \cos \varphi_0, \quad (3.56)$$

де λ – коефіцієнт, що залежить від моменту інерції і резонансних властивостей коливальної системи,

W_1 – число витків силової котушки,

S_1 – площа поперечного перетину силової котушки,

φ_0 – початковий кут (для спрощення передбачаємо, що вектор магнітної індукції \vec{B}_0 лежить в площині коливання).

Вимірювальна котушка встановлена перпендикулярно до силової. Це зроблено для того, щоби у вимірювальній котушці наводилась е.р.с. за рахунок

трансформації струму силової котушки.

Визначимо повну е.р.с., що виникає у вимірювальній котушці тільки за рахунок її переміщення у магнітному полі з індукцією B_0 . Вимірювальна котушка здійснює кутове коливання на кут $\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_1(t)$. Нехай $\varphi_1(t) = \varphi_m \cos \omega t$, де φ_m, ω – амплітуда і частота коливань. Тоді якщо $\Phi(t) = B_0 S_2 \cos \varphi(t)$, на виході вимірювальної котушки маємо

$$e(t) = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -W_2 B_0 S_2 \frac{d}{dt} \cos(\varphi_0 + \varphi_m \cos \omega t), \quad (3.57)$$

де W_2 – число витків вимірювальної котушки,

S_2 – площа вимірювальної котушки.

Диференціювання (3.56) дає наступний результат:

$$e(t) = -\varphi_m \omega W_2 S_2 B_0 \sin(\varphi_0 + \varphi_m \cos \omega t) \sin \omega t. \quad (3.58)$$

Оскільки зазвичай $\varphi_m \ll \varphi_0$, то можна вважати, що

$$e(t) = -\varphi_m \omega W_2 S_2 B_0 \sin \varphi_0 \sin \omega t = -\varphi_m \omega W_2 S_2 B_0' \sin \omega t. \quad (3.59)$$

З (3.59) отримаємо амплітудне значення е.р.с.: $E_m = \varphi_m \omega W_2 S_2 B_0'$.

В розглянутій конструкції вібрзонда амплітуда кутових коливань вимірювальної котушки залежить від початкового кута φ_0 . Це пояснюється таким. У відповідності до (3.56) максимальний момент становить $M_m = \lambda W_1 S_1 I_m B_0 \cos \varphi_0$, де I_m – амплітуда струму збудження. Ця котушка буде переміщуватись до тих пір, доки її кут відхилення не стане максимальним і рівним φ_m . А це відбудеться при рівності обертального і протидіючого моменті, який створюється пружиною 3: $M_m = M_{\text{пр}} = k\varphi_m$, де k – питомий протидіючий момент. З цього рівняння маємо

$$\varphi_m = \frac{\lambda}{k} W_1 S_1 I_m B_0 \cos \varphi_0, \quad (3.60)$$

що і пояснює залежність φ_m від φ_0 .

Здавалося б, що е.р.с. $e(t)$ повинна досягати максимуму при

$\varphi_0 = \frac{\pi}{2}; \pi; \frac{3}{2}\pi; \dots$ $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}; \pi; \frac{3}{2}\pi; \dots$ у відповідності до (3.59). Але в цьому випадку не буде виникати обертальний момент оскільки згідно з (3.60) $\varphi_m = 0$.

Для отримання умови досягнення максимального значення е.р.с. підставимо (3.60) в рівняння (3.59)

$$\begin{aligned} e(t) &= -\frac{\lambda}{k} W_1 S_1 I_m B_0 \cos \varphi_0 \omega W_2 S_2 B_0 \sin \varphi_0 \sin \omega t = \\ &= -\frac{\lambda}{2k} W_1 W_2 S_1 S_2 I_m \omega B_0^2 \sin 2\varphi_0 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (3.61)$$

З аналізу (3.61) можна визначити умову досягнення максимуму е.р.с. : $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}; \frac{3\pi}{4}; \frac{5\pi}{4}; \dots$ $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}; \pi; \frac{3}{2}\pi; \dots$. В цьому випадку чутливість віброзонда дорівнює

$$S'_{\max} = \frac{dE_m}{dB_0} = \frac{\lambda}{k} W_1 W_2 S_1 S_2 I_m \omega B_0, \quad (3.62)$$

отже залежить не тільки від параметрів віброзонда і амплітуди струму збудження, але й від магнітної індукції. Ця властивість не дозволяє застосовувати віброзонди цього типу для вимірювання слабких магнітних полів. Значні проблеми у використанні віброзонда пов'язані зі значними наводками з ланцюгів збудження на вимірювальну котушку.

Варто відмітити наступну особливість цих віброзондів – при $\varphi_0 = 0$ вихідна е.р.с. має подвоєну частоту. Дійсно в цьому випадку в рівнянні (3.58) маємо $\sin(\varphi_m \cos(\omega t)) \approx \varphi_m \cos(\omega t)$, отже

$$e(t) = -\frac{\varphi_m^2}{2} \omega W_2 S_2 B_0 \sin(2\omega t).$$

Віброзонди α -типу можуть бути рекомендовані для вимірювання індукції сильних магнітних полів.

У віброзондах s -типу перетворення здійснюється за рахунок впливу на параметр S .

Розглянемо спочатку віброзонд (рис. 3.30), робочою частиною якого є струна, що коливається у заданій площині (т. з. струнний віброзонд).

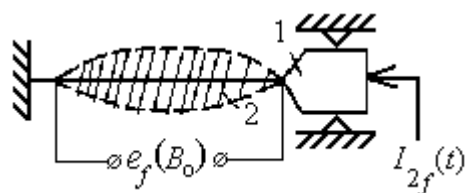


Рис. 3.30. Схематичне зображення віброзонда *s*-типу

До електромеханічного перетворювача 1 підводиться струм подвоєної частоти. Перетворювач діє на струну в такий спосіб, щоби її довжина змінювалась також з подвоєною частотою.

Якщо резонансна частота струни відповідає основній частоті, тобто $f_0 = 0,5f$, виникають поперечні коливання струни. Цей ефект названий на честь відомого німецького фізика Франца Мельде (1832 – 1901), який вперше спостерігав і дослідив його. В струні відбуваються процеси під дією періодичних механічних сил, які проявляються у напрямку перпендикулярному напрямку руху струни. Ці сили безпосередньо не можуть виконати механічної роботи, однаке їх енергетичний прояв, шляхом зміни параметра системи (довжини струни), вводиться в систему. Частота зміни параметра у двічі вища за частоту збуджуваних коливань струни.

Резонансна частота струни визначається за формулою

$$f_0 = \frac{k^2}{l^2} \sqrt{\frac{EGL}{m}},$$

де k – коефіцієнт, який характеризує спосіб закріплення струни,

l – довжина струни,

m – маса коливального елемента,

E – модуль Юнга,

G – осьовий момент інерції поперечного зміщення струни.

Струна розміщується у магнітному полі і за рахунок поперечних коливань в ній індукується е.р.с. $e = Blv$, де v – швидкість переміщення.

Інший вид віброзондів – це електродинамічні віброзонди (рис.3.31).

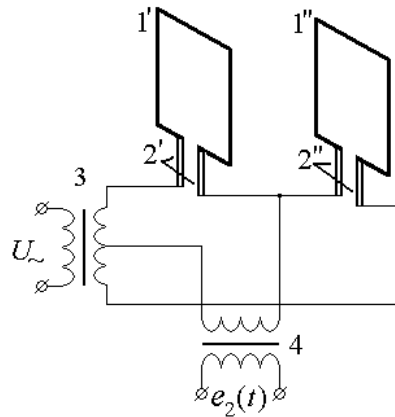


Рис. 3.31. Електродинамічний вібростанд

Дві плоскі багато виткові рамки $1'$ і $1''$ на пружних провідних стояках $2'$ і $2''$ встановлені безпосередньо близько один від одного. Рамки з'єднані послідовно і узгоджено і підключені через трансформатор 3 до джерела змінної напруги U_{\sim} . Е.р.с. подвоєної частоти, пропорційна вимірюваній індукції магнітного поля B утворюється на вторинній обмотці вихідного трансформатора 4.

Сила взаємодії двох контурів зі струмом пропорційна добутку струмів. Оскільки рамки $1'$ і $1''$ ідентичні, а струми однакові то

$$F'(t) = F''(t) = ki^2(t),$$

де $i(t)$ – струм ;

F – сила взаємодії рамок;

k – коефіцієнт, що залежить від параметрів рамок, пружності стояків і проникності середовища.

Якщо $i(t) = I_m \sin \omega t$, то

$$F'(t) = F''(t) = \frac{k}{2} I_m^2 (1 - \cos 2\omega t). \quad (3.63)$$

З (3.63) витікає, що сила взаємодії призводить до механічних коливань рамок з подвоєною частотою по відношенню до частоти живлення.

Оскільки рамки здійснюють кутові коливання, для визначення корисної е.р.с. $e_2(t)$ можна скористатись виразом (3.58). Якщо для кожної рамки окремо

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_m \cos(2\omega t),$$

то, з урахуванням $\varphi_0 \gg \varphi_m$, маємо

$$e_2(t) = -WSB_I \frac{d}{dt} \cos(\varphi(t)) = -2\varphi_m WSB \sin \varphi_0 \sin(2\omega t)$$

Вихідна е.р.с сягає максимуму, якщо $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}; \frac{5\pi}{2}; \dots$

В цьому випадку амплітудне значення е.р.с становить $E_{2m} = 2\varphi_m \omega WSB$, а чутливість – $S' = 2\varphi_m \omega WS$.

При $\varphi_0 = 0$ маємо $E_{2m} = -\varphi_m^2 \omega WSB \sin(4\omega t)$. В цьому випадку частота вимірюваної е.р.с. в 4 рази більша за частоту струму живлення.

Вібронди, дія яких ґрунтується на електродинамічній взаємодії двох контурів зі струмами мають суттєві переваги: високу чутливість, відсутність гістерезису, простота, економічність. В наслідок цього вони вважаються перспективними для використання в МНК.

Підсумок до розділу

За способом отримання первинної інформації про магнітне поле розсіювання дефектів, первинними перетворювачами параметрів поля розрізняють такі методи магнітної дефектоскопії: магнітопорошковий, магнітографічний, магнітонапівпровідниковий, індукційний, ефекта Холла, ефекта Гаусса (магніторезистивний), ферозондовий та інші.

Магнітопорошковий метод має високу чутливість, але не піддається автоматизації. Інші методи передбачають перетворення характеристик магнітного поля в електричні величини – е.р.с., струм, електричний опір тощо.

Методи магнітодіодів, магнітотранзисторів, ефекту Холла, ефекту Гаусса (магніторезистивний) відрізняються тим, що відповідні первинні вимірювальні перетворювачі характеристик магнітного поля мають мінімальні розміри отже забезпечують високу розрізнявальну здатність вимірювання і мінімальний вплив на вимірювані поля розсіювання дефектів.

Задачі

1. Визначити рухливість електронів у перетворювачі Холла, якщо керуючий струм дорівнює 1мА, чутливість перетворювача $100 \frac{\text{мкВ}}{\text{Тл}}$, товщина перетворювання $d = 0,2\text{мм}$, а питомий електричний опір $0,5 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Розв'язання. Визначимо чутливість перетворювача:

$$S_B = \frac{de_h}{dB} = \frac{R_h}{d} I = \frac{\nu \rho}{d} I.$$

Розв'язуємо отримане рівняння відносно ν :

$$\nu = \frac{S_B d}{\rho I} = \frac{10^{-4} \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 40 \frac{1}{\text{Тл}}.$$

Відповідь: рухливість електронів дорівнює $40 \frac{1}{\text{Тл}}$.

2. Вирахувати е.р.с. Холла під час вимірювання магнітної індукції величиною 1мТл перетворювачем Холла, який має товщину 0,5мм і постійну Холла 50Тл^{-1} . Робочий струм 0,5мА. Оцінити чутливість перетворювача для даних параметрів.

Розв'язання. Е.р.с. Холла становить:

$$e_h = \frac{R_h}{d} BI = \frac{50}{0,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 50 \text{мВ},$$

отже чутливість перетворювача дорівнює:

$$S = \frac{de_h}{dB} = \frac{R_h}{d} I = \frac{50}{0,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 50 \frac{\text{В}}{\text{Тл}}.$$

Відповідь: чутливість перетворювача становить $50 \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$.

3. Вирахувати питому чутливість навантаженого на опір $R=10 \text{ Ом}$ перетворювача Холла, якщо перетворювач має розміри: $l=8\text{мм}$, $b=2\text{мм}$,

$d=0.2\text{мм}$, а питомий опір матеріалу перетворювача і постійна Холла дорівнюють відповідно $10 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ та $20 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$.

Розв'язання. Питома чутливість не навантаженого перетворювача становить

$$\gamma = \frac{1}{I} \frac{de_h}{dB} = \frac{R_h}{d} = \frac{20 \cdot 10^{-5}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 1 \frac{\text{м}^2}{\text{Кл}}$$

Навантаження R з внутрішнім опором r перетворювачу утворюють подільник напруги, тому падіння напруги на навантаженні становить

$$U = \frac{e_h}{1 + \frac{r}{R}}, \quad \text{де} \quad r = \rho \frac{l}{bd} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} = 0,2 \text{ Ом}. \quad \text{Отже, чутливість}$$

$$\text{навантаженого перетворювача } \gamma_n = \frac{\gamma}{1 + \frac{r}{R}} = \frac{1}{1 + \frac{0,2}{10}} = 0,98 \frac{\text{м}^2}{\text{Кл}}.$$

Відповідь: чутливість навантаженого перетворювача становить $0,98 \frac{\text{м}^2}{\text{Кл}}$.

4. Яким повинен бути робочий струм перетворювач Холла, щоби при вимірюванні магнітного поля з індукцією 2 Тл, е.р.с. Холла складала 0.05В. Товщина перетворювача, рухливість носіїв зарядів і питомий електричний опір матеріала перетворювача відповідно дорівнюють 0.48мм, 400 1/Тл, $10 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

$$\text{Розв'язання. } I = \frac{e_h d}{R_h B} = \frac{e_h d}{\nu \rho B} = \frac{0,05 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 3 \text{ мА}.$$

Відповідь: робочий струм перетворювач дорівнює 3 мА.

5. Вимірювання магнітної індукції намагніченого ОК виконується за допомогою двох магніторезистивних перетворювачів, включених в протилежні плечі мостової схеми, яка живиться від джерела струму. Визначити напругу у вимірювальній діагоналі моста, якщо індукція магнітного поля на поверхні ОК дорівнює 0.2 Тл, опір магніторезисторів при $B=0$ становить 100 Ом. Мостова схема живиться від джерела струму силою 20 мА. Параметри магніторезистора: $A=0.2$, $m=1$, а рухливість зарядів матеріалу перетворювача 100 1/Тл.

Розв'язання. Напруга у вимірювальній діагоналі моста дорівнює:

$$U = \frac{I}{2} R_0 A \gamma^m B^m = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 100 \cdot 0.2 \cdot 100 \cdot 0.2 = 4 \text{ В.}$$

Відповідь: 4 В.

6. Магнітне поле, що змінюється в часі за синусоїдальним законом з частотою 50 Гц вимірюється індукційним перетворювачем. Кількість витків котушки перетворювача дорівнює 50, е.р.с. котушки визначається вольтметром діючих значень і становить 100В. Знайдіть максимальне значення магнітної індукції вимірюваного поля, якщо площа середнього витка котушки 0.1 м^2 .

Розв'язання. Запишемо закон магнітної індукції: $e(t) = -WS \frac{dB(t)}{dt}$. Магнітна індукція в часі змінюється за синусоїдальним законом: $B(t) = B_m \sin \omega t$, тому $e(t) = -WSB_m \omega \cos \omega t$. Тому амплітудне значення е.р.с. становить $E_m = WSB_m \omega$. Розв'язок цього рівняння відносно магнітної індукції з урахуванням співвідношення $U_m = \sqrt{2}U_d$ дає наступний результат

$$B_m = \frac{U_d}{\sqrt{2}WS\pi f} = \frac{100}{\sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0.1 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.09 \text{ Тл.}$$

Відповідь: $B_m = 0.09$ Тл.

7. Знайдіть активний опір збуджуючої котушки ферозонду, яка виготовлена з мідного дроту і має 100 витків. Середній діаметр витків котушки

становить $d_B = 1\text{мм}$, а радіус дроту $r_{др} = 0.1\text{мм}$. Питомий опір міді

$$\rho = 0.0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Розв'язання. Активний опір збуджуючої котушки ферозонду дорівнює:

$$R = \rho \cdot \frac{l \cdot W}{S_n}, \text{ де } S_n \text{ – площа перетину дроту, } l = 2\pi R = \pi d \text{ – довжина одного}$$

витка

Отже, маємо:

$$r = \rho \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot W}{\pi \cdot r^2}.$$

Підставивши відомі значення, отримаємо:

$$R = \rho \frac{2\pi r_B W}{\pi r_{др}^2} = 0.0175 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{3.14 \cdot 0.1^2 \cdot 10^{-6}} = 0.175 \text{ Ом}.$$

Відповідь: $R = 0.175 \text{ Ом}$.

8. Визначити максимальну чутливість диференціального феррозонда з поздовжнім збудженням по другій гармоніці якщо число витків вимірювальної обмотки дорівнює 1000, форма перетину осердя – прямокутна з розмірами $2\text{мм} \times 0,2\text{мм}$, а частота струму збудження дорівнює 5кГц . Відносну диференціальну магнітну проникність осердя прийняти рівною 8000.

Розв'язання. Чутливість феррозонда по другій гармоніці визначається за формулою

$$S_2 = 32 \cdot f \cdot W_2 \cdot S_0 \cdot \mu_m \cdot \frac{H_S}{H_m} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H_S}{H_m}\right)^2},$$

де S_0 визначається як $S_0 = a \times b$.

Чутливість ферозонду залежить від відношення H_S/H_m . Максимальне значення чутливості феррозонда досягається при $\frac{H_S}{H_m} = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Максимальне

значення магнітної проникності визначається як: $\mu_m = \mu_d^* \cdot \mu_0$. Тоді остаточна формула має вигляд:

$$S_2 = 32 f W_2 a b \mu_d^* \mu_0 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2} =$$

$$= 32 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 8000 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{2} = 0,3215 \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{А}}.$$

Відповідь: $S_2 = 0,3215 \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{А}}.$

Контрольні запитання

1. Наведіть приклади дефектів виробів з феромагнітних матеріалів металургійного, технологічного та виробничого походження.
2. Наведіть граничні умови для напруженості та індуктивності магнітного поля та межі поділу двох середовищ.
3. Поясніть особливості утворення магнітних полів розсіювання поверхневих дефектів в ОК з феромагнітних матеріалів.
4. Які чинники впливають на вибір способу, напрямку та роду струму намагнічування?
5. В чому полягає сутність магнітопорошкового методу магнітної дефектоскопії?
6. Які сили діють на магнітну частку у магнітному полі розсіювання дефекту ОК?
7. Назвіть основні етапи магнітопорошкового способу магнітної дефектоскопії.
8. В чому полягає сутність магнітографічного методу магнітної дефектоскопії?
9. Яким вимогам повинні відповідати магнітні носії, що використовуються у магнітографічному контролі?
10. Дайте пояснення дії магнітного поля на характеристики магнітодіода.
11. Наведіть мостову схему підключення магнітотранзистора і поясніть її роботу.
12. Розкрийте фізичну сутність індукційного методу магнітної дефектоскопії.
13. Наведіть конструкцію перетворювача Барнета та поясніть його роботу.
14. В чому полягає фізична сутність ефекта Холла?

15. Виведіть рівняння перетворення для перетворювача Холла та виконайте його аналіз.
16. Наведіть приклади основних схем підключення перетворювачів Холла.
17. Подайте визначення постійної Холла через концентрацію та рухливість носіїв заряду матеріалу перетворювача Холла.
18. Розкрийте зміст поняття «кут Холла».
19. В чому полягає магніторезистивний ефект?
20. Наведіть рівняння перетворення магніторезистора та мостову схему його включення.
21. Поясніть, чому в диску Корбіно магніторезистивний ефект виявляється найбільш відчутно?
22. В чому полягає ефект Мельде?
23. Поясніть чому вихідна е.р.с. диференціального ферозонда з поздовжнім збудженням містить парні гармоніки?
24. Поясніть принцип роботи перетворювача Барнета.
25. Поясніть наявність парних гармонік у вихідній е.р.с. диференціального ферозонда з поздовжнім збудженням.
26. З якою метою здійснюють модуляцію магнітних характеристик осердь диференціального ферозонда з поздовжнім збудженням?

РОЗДІЛ 4. КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ НЕМАГНІТНИХ ПОКРИТТІВ ФЕРОМАГНІТНИХ ВИРОБІВ

На практиці широко розповсюджено застосування захисних покриттів виробів із феромагнітних матеріалів тонкими шарами немагнітних чи слабомагнітних матеріалів. Застосовують, наприклад, покриття із хрому, цинку, олова та інших металів, нанесених електролітично чи в інший спосіб. З метою захисту виробів чи напівфабрикатів (листового заліза, проволочи) від корозії застосовують шари емалі, лаку, фарби, хімічні покриття (анодування, оксидування і т. п.). Товщина таких покриттів здебільшого коливається у межах $10^{-6} \div 10^{-3}$ мм. В багатьох випадках одним із важливих показників якості шарів захисних покриттів є їх товщина. Задача визначення товщини немагнітних покриттів на феромагнітній основі вирішується за допомогою методів магнітної товщинометрії, які поділяються на:

- 1) пондеромоторний;
- 2) магністатичний;
- 3) індуктивний;
- 4) індукційний.

4.1. Пондеромоторний метод магнітної товщинометрії

Ідея цього методу полягає у перетворенні товщини немагнітного покриття у механічну силу, необхідну для відриву постійного магніту чи електромагніту від феромагнітного ОК з покриттям (рис. 4.1).

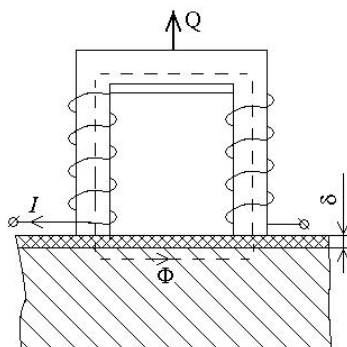


Рис. 4.1. Електромагніт пондеромоторного магнітного товщиноміра

Як визначити цю силу аналітично і чому вона залежить від товщини покриття?

Як відомо, абсолютне значення сили, що припадає на одиницю поверхні магніту (питоме значення сили) дорівнює:

$$Q_{\Pi} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0}.$$

Магніт відривається від деталі з силою

$$Q = 2SQ_{\Pi} = \frac{B^2 S}{\mu_0} = \frac{\Phi^2 S}{\mu_0 S^2} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 S}, \quad (4.1)$$

де S – площа поперечного перетину наконечника електромагніта,

Оскільки за законом Босанквета (прототипом закону Ома для електричних кіл) маємо

$$\Phi = \frac{F}{R_M} = \frac{IW}{R_M},$$

де W – число витків котушок електромагніта,

R_M – магнітний опір магнітного ланцюга,

рівняння (4.1) представимо наступним чином

$$Q = \frac{(IW)^2}{\mu_0 S R_M^2}.$$

З урахуванням того, що магнітний опір ланцюга визначається як

$$R_M = R_{M_1} + R_{M_2} + 2R_{\delta},$$

де R_{M_1} – магнітний опір кола електромагніта; R_{M_2} – магнітний опір кола виробу;

R_{δ} – магнітний опір ділянки з контрольованим покриттям, маємо

$$Q = \frac{(IW)^2}{\mu_0 S (R_{M_1} + R_{M_2} + 2R_{\delta})^2} = \frac{(IW)^2}{\mu_0 S (R_{M_1} + R_{M_2} + 2\frac{\delta}{\mu_0 \cdot S})^2}, \quad (4.2)$$

З рівняння (4.1) можна визначити δ :

$$\delta = \frac{\mu_0 S}{2} \left(\frac{IW}{\sqrt{\mu_0 QS}} - R_{M_1} - R_{M_2} \right) = \frac{IW \sqrt{\mu_0 QS}}{2Q} - \frac{\mu_0 S}{2} (R_{M_1} + R_{M_2}).$$

На результат вимірювання δ значною мірою впливають магнітні властивості матеріалу деталі. Тому магнітні товщиноміри калібруються за допомогою робочих зразків, виготовлених із того ж матеріалу, що й ОК з покриттям відомої товщини. На результат вимірювання δ також чинить значний вплив шорсткість поверхні виробу. Тому останню потрібно завжди оговорювати.

Розглянемо одну з конструкцій таких товщиномірів (рис. 4.2). В конструкції відсутні будь-які види підшипників оскільки частина системи закріплена лише на пружних зв'язках.

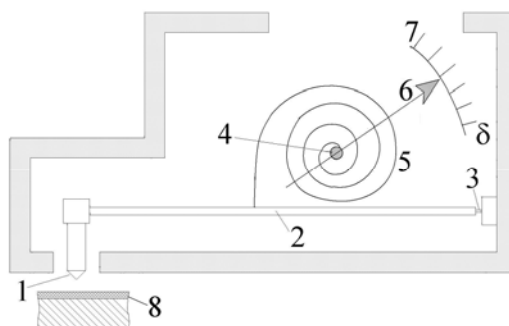


Рис. 4.2. Конструкція пондеромоторного товщиноміра

Постійний магніт 1 закріплений на легкому коромислі 2; останнє зв'язано через пружну пластину 3, з корпусом приладу, а в середині – із спіральною пружиною 5, інший кінець якої з'єднаний з валом 4. Останній спирається на підшипники в бокових стінках корпусу. Повороти валика 4 змінюють вертикальне зусилля, що передається пружиною 5 на коромисло, і визначаються за положенням стрілки 6 над шкалою 7.

Досліджуване місце виробу 8 підводиться впритул до корпусу у отворі під постійним магнітом. Останній доводиться до стикання з виробом за допомогою зворотного повороту валика 4. Тепер цей валик повертають повільно в прямому напрямку (за годинниковою стрілкою) до тих пір, поки магніт не відірветься від виробу. Досягнуте до цього моменту часу положення стрілки 6 над шкалою 7 служить показником товщини немагнітного шару.

Основний недолік приладів пондеромоторного типу – складність автоматизації процесу контролю.

4.2. Магнітостатичний метод магнітної товщинометрії

Прилади магнітостатичного типу позбавлені недоліку пондеромоторних товщиномірів. Їх дія ґрунтується на визначенні варіації (зміни) магнітної індукції в ланцюгу “перетворювач –ОК” за допомогою перетворювачів Холла, ферозондів, рамки зі струмом, магнітної стрілки в колі електромагніту чи постійного магніту при зміні відстані між ним та феромагнітним виробом через наявність немагнітного покриття. Приклад перетворювача магнітостатичного типу з датчиком Холла і П-подібним електромагнітом та його розташування на ОК показано на рис. 4.3.

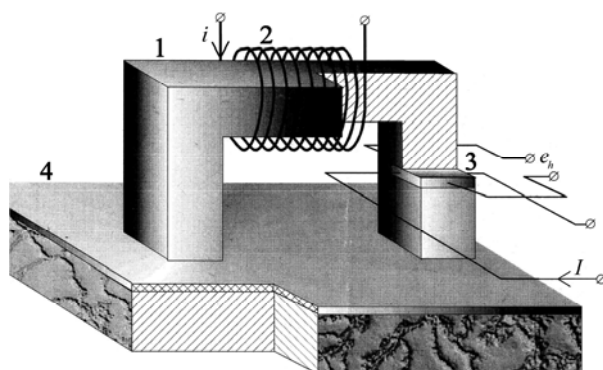


Рис. 4.3. Перетворювач магнітного товщиноміра магнітостатичного типу з датчиком Холла:

1 – магнітопровід; 2 – котушка; 3 – датчик Холла; 4 – немагнітне покриття.

Оскільки, е.р.с. Холла визначається як $e_h = \frac{R_h}{d} IB$, магнітна індукція як

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{F}{S \cdot R_M} = \frac{W \cdot i}{S \cdot R_M}, \text{ магнітний опір для магнітного потоку в ланцюгу ОК –}$$

перетворювач становить

$$R_M = R_1 + R_2 + R_3 + 2R_\delta = R_\Sigma + 2R_\delta = R_\Sigma + \frac{2\delta}{\mu_0 \cdot S},$$

де R_1, R_2, R_3 – магнітні опори відповідно основи ОК, магнітопроводу та зазору з перетворювачем Холла, то

$$e_h = \frac{R_h}{d} I \frac{W i \mu_0}{\mu_0 S R_\Sigma + 2\delta} = \frac{R_h W i I \mu_0}{d \mu_0 S R_\Sigma + 2\delta d},$$

звідки товщина покриття визначається через e_h як

$$\delta = \frac{R_h W I \mu_0 - e_h d \mu_0 S R_{\Sigma}}{2 d e_h} \quad (4.3)$$

4.2. Індуктивний метод магнітної товщинометрії

В таких перетворювачах товщина покриття δ перетворюється в індуктивність L котушки індуктивного перетворювача (рис. 4.4). Дійсно, потокощеплення котушки становить

$$\psi_L = W\Phi = W \frac{F}{R_M} = \frac{W W I}{R_M} = \frac{W^2 I}{R_M} = L I,$$

де R_M – магнітний опір магнітного ланцюга ОК –перетворювач.

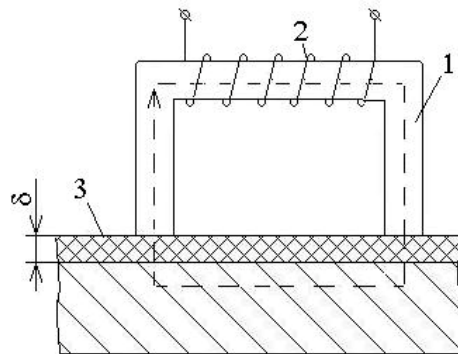


Рис. 4.4. Перетворювач магнітного товщиноміра індуктивного типу:

1 – магнітопровід, 2 – котушка, 3 – ОК

Отже індуктивність котушки зв'язана з товщиною покриття співвідношенням

$$L = \frac{W^2}{R_{M\Sigma}} = \frac{W^2}{R_M + \frac{2\delta}{\mu_0 S}} = \frac{\mu_0 S W^2}{2\delta + \mu_0 S R_M},$$

звідки маємо

$$\delta = \frac{\mu_0 S (W^2 - R_M L)}{2L} = \frac{\mu_0 S W^2}{2L} - \frac{R_M}{2}. \quad (4.4)$$

Вимірявши індуктивність за допомогою, наприклад, моста змінного струму можна непрямим методом здійснити вимірювання δ .

З рівняння (4.4) видно, що функція $\delta = f(L)$ має обернено пропорційний характер. У випадку вимірювання тільки відносних змін товщини покриття

(варіацій товщини покриття) $\varepsilon_\delta = \frac{\Delta\delta}{\delta}$, де $\Delta\delta$ – абсолютне значення змін товщини покриття, залежність $\delta = f(L)$ набуває лінійного характеру. Дійсно, для випадку вимірювання товщини покриття $\delta + \Delta\delta$ маємо

$$\delta + \Delta\delta = \frac{\mu_0 SW^2 - \mu_0 SR_M(L + \Delta L)}{2(L + \Delta L)},$$

звідки отримаємо:

$$\Delta\delta = \frac{\mu_0 SW^2 - \mu_0 SR_M(L + \Delta L)}{2(L + \Delta L)} - \delta,$$

або, враховуючи (2):

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= \frac{\mu_0 SW^2 - \mu_0 SR_M(L + \Delta L)}{2(L + \Delta L)} - \frac{\mu_0 S(W^2 - R_M L)}{2L} = -\frac{\mu_0 SW^2 \Delta L}{2L(L + \Delta L)} = \\ &= -\frac{\mu_0 SW^2 \Delta L}{2L \cdot L \left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right)} = -\frac{\mu_0 SW^2 \varepsilon_L}{2L(1 + \varepsilon_L)}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

де ε_L – відносна варіація індуктивності котушки перетворювача.

Відносна варіація товщини покриття становить

$$\varepsilon_\delta = -\frac{\mu_0 SW^2 \Delta L}{2L(L + \Delta L)} \cdot \frac{2L}{\mu_0 S(W^2 - R_M L)} = -\frac{W^2 \varepsilon_L}{(1 + \varepsilon_L)(W^2 - R_M L)} \quad (4.6)$$

При $\varepsilon_L \ll 1$ маємо

$$\varepsilon_\delta \approx -\frac{W^2 \varepsilon_L}{W^2 - LR_M} = -\frac{\varepsilon_L}{1 - \frac{LR_M}{W^2}}, \quad (4.7)$$

а при виконанні додаткової вимоги $LR_M \ll W^2$, отримаємо $\varepsilon_\delta \cong -\varepsilon_L$.

4.3. Індукційний метод магнітної товщинометрії

Індукційний (взаємоіндукційний, або трансформаторні) метод вимірювання товщини немагнітного покриття ґрунтується на вимірюванні магнітної індукції в

ланцюгу перетворювач – ОК (рис.4.5). Дійсно, у випадку живлення збуджуючої котушки перетворювача змінним струмом маємо

$$e_2(t) = -\frac{d\psi(t)}{dt} = -W_2 \frac{d\Phi(t)}{dt}.$$

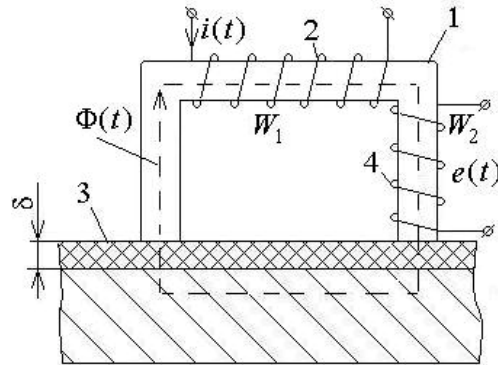


Рис. 4.5. Перетворювач магнітного товщиноміра трансформаторного типу:

1 – магнітопровід, 2 – збуджуюча котушка, 3 – ОК, 4 – вимірювальна котушка

Якщо збуджуюча котушка живиться синусоїдальним струмом $i(t) = I_m \sin(\omega t)$, в магнітному ланцюгу існує магнітний потік $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$, який генерує у вимірювальній котушці змінну е.р.с. $e_2(t) = -\omega W_2 \Phi_m \cos \omega t$ з амплітудним значенням $E_{2m} = \omega W_2 \Phi_m$.

Оскільки амплітудне значення магнітного потоку в перетворювачі визначається як

$$\Phi_m = \frac{F_m}{R_{M\Sigma}} = \frac{W_1 I_m}{R_{M1} + R_{M2} + 2R_\delta} = \frac{W_1 I_m}{R_M + \frac{2\delta}{\mu_0 S}} = \frac{\mu_0 S W_1 I_m}{\mu_0 S R_M + 2\delta}. \quad (4.8)$$

З урахуванням (4.8) значення E_{2m} дорівнює

$$E_{2m} = \frac{2\pi f W_1 W_2 \mu_0 S I_m}{\mu_0 S R_M + 2\delta}. \quad (4.9)$$

Розв'язавши рівняння (4.9) відносно δ отримаємо рівняння вимірювання:

$$\delta = \frac{\mu_0 S (2\pi f W_1 W_2 I_m - E_{2m} R_M)}{2E_{2m}}. \quad (4.10)$$

З рівняння (4.10) видно, що функція $\delta = f(E_{2m})$ має нелінійний характер. У випадку вимірювання відносної варіації товщини немагнітного покриття маємо лінійну залежність ε_δ від варіації амплітудного значення е.р.с.

Диференціальний трансформаторний вимірювач варіацій товщини немагнітних покриттів на феромагнітній основі. Розташування перетворювачів диференціального трансформаторного вимірювача ε_δ на ОК наведена на рис.4.6.

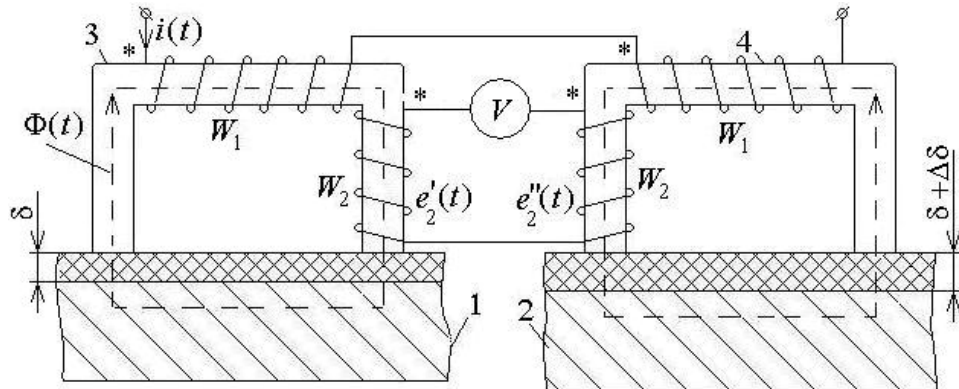


Рис. 4.6. Перетворювач диференціального трансформаторного вимірювача варіацій товщини немагнітних покриттів на феромагнітній основі : 1 – ОК з покриттям номінальної товщини, 2 – ОК з вимірюваним покриттям 3, 4 – перетворювачі трансформаторного типу

В цій схемі вольтметр V вимірює різницю амплітудних значень е.р.с., що наводяться у вимірювальних котушках двох трансформаторних перетворювачів 3 і 4

$$E_2' = \frac{\omega \mu_0 S_M W_1 W_2 I}{2\delta + \mu_0 S_M R_M},$$

$$E_2'' = \frac{\omega \mu_0 S_M W_1 W_2 I}{2(\delta + \Delta\delta) + \mu_0 S_M R_M}.$$

Отже покази вольтметра амплітудних значень становлять

$$E_2 = E_2' - E_2'' = \frac{2\omega \mu_0 S_M W_1 W_2 I \Delta\delta}{(2\delta + \mu_0 S_M R_M)(2\delta + 2\Delta\delta + \mu_0 S_M R_M)}. \quad (4.11)$$

У випадку $\Delta\delta \ll \delta$ розв'язок рівняння (4.11) відносно $\Delta\delta$ наближено можна представити як

$$\Delta\delta \approx \frac{E_2(2\delta + \mu_0 S_M R_M)^2}{2\omega\mu_0 S_M W_1 W_2 I \Delta\delta}, \quad (4.12)$$

тобто маємо лінійну залежність $\Delta\delta$ від амплітудного значення сумарної е.р.с.

Чутливість перетворювача диференціального трансформаторного вимірювача варіацій товщини покриття становить

$$S = \frac{\partial E_2}{\partial \Delta\delta} = \frac{2\omega\mu_0 S_M W_1 W_2 I}{(2\delta + \mu_0 S_M R_M)^2}. \quad (4.13)$$

Аналіз виразу (4.13) свідчить про те, що чутливість перетворювача підвищується при:

- 1) збільшенні частоти ω і сили I намагнічуючого струму;
- 2) зменшенні магнітного опору R_M перетворювача і основи ОК.

Підсумок до розділу

Магнітні товщиноміри широко застосовуються для вимірювання товщини немагнітних покриттів (лакофарбових, гальванічних, хімічних) на феромагнітній основі. Діапазон вимірювання товщиномірів коливається від декількох мікрон до 1...2 мм.

Дія магнітних товщиномірів ґрунтується на тому, що ділянка феромагнітного ОК з немагнітним покриттям включається у магнітний ланцюг перетворювача і впливає на величину магнітного потоку. Останній перетворюється в проміжну величину – силу відриву магніту від ОК, індуктивність котушки перетворювача, магнітну індукцію або е.р.с. вимірювальної котушки, які більш зручні для вимірювання.

В рівняння перетворення магнітних товщиномірів входять значення магнітних опорів основи ОК і магнітопроводу перетворювача. Їх врахування потребує виконання калібрування товщиномірів при вимірюванні товщини покриттів. Для цього необхідно мати контрольні зразки з покриттями відомої товщини на тій самій основі, що й ОК.

Задачі

1. Товщина немагнітного покриття на феромагнітному ОК контролюється магнітостатичним методом із застосуванням перетворювача Холла. Довжина робочого повітряного зазору, в якому розташований перетворювач, дорівнює $l = 1,5$ мм. Номінальне значення товщини покриття $0,25$ мм. Яка відносна варіація товщини покриття викличе відносну зміну е.р.с. Холла величиною 1% ?

Магнітним опором магнітопровода перетворювача та ОК знехтувати.

Розв'язання. Е.р.с. Холла знаходимо за формулою: $e_h = \frac{R_h}{d} Bi$. Магнітна індукція в ланцюгу “перетворювач-ОК” визначається як $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{F_M}{R_M S}$, де магнітний опір ланцюга складає $R_M = \frac{2\delta}{\mu_0 S} + \frac{l}{\mu_0 S} = \frac{1}{\mu_0 S} (2\delta + l)$, S – площа поперечного перетину магнітопровода. З урахуванням цього вирази для е.р.с. Холла у випадках вимірювання номінальної товщини покриття δ та покриття з приростом $\Delta\delta$ набувають вигляду:

$$e_h = \frac{R_h}{d} \frac{1}{\mu_0 S} (2\delta + l) i,$$

$$e'_h = \frac{R_h}{d \mu_0 S} (2\delta + \Delta\delta + l) i.$$

Відносна зміна е.р.с. Холла дорівнює: $\varepsilon_e = \frac{\Delta e_h}{e_h} = \frac{e'_h - e_h}{e_h}$, підставивши

вирази e_h і e'_h в дану формулу, одержимо:

$$\begin{aligned} \varepsilon_e &= \frac{\Delta e_h}{e_h} = \frac{e'_h - e_h}{e_h} = \frac{\frac{R_h}{d} \frac{1}{\mu_0 S} i ((2\delta + \Delta\delta + l) - (2\delta + l))}{\frac{R_h}{d} \frac{1}{\mu_0 S} i (2\delta + l)} = \\ &= \frac{(2\delta + \Delta\delta + l) - (2\delta + l)}{2\delta + l} = \frac{\Delta\delta}{2\delta + l} = \frac{\varepsilon_\delta \delta}{2\delta + l}. \end{aligned}$$

З останнього рівняння визначимо відносну варіацію товщини покриття як

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{\varepsilon_e(2\delta + l)}{\delta} = \frac{0,01(2 \cdot 0,25 + 1,5)}{0,25} = 0,08.$$

Відповідь: $\varepsilon_{\delta} = 0,08$, що впроцентах становить 8%.

2. Сила відриву магніту від деталі з феромагнітного матеріалу з немагнітним покриттям становить 2 Н. Якою буде товщина покриття, якщо магніторушійна сила в магнітопроводі дорівнює 200 А, а площа його поперечного перетину становить 20мм^2 .

Магнітним опором магнітопроводу і деталі в розрахунках знехтувати.

Розв'язання. Товщину немагнітного покриття знаходять за формулою:

$$\delta = \frac{F}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 S}{Q}} = \frac{200}{2} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{2}} = 354 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,354 \text{ мм}.$$

Відповідь: $\delta = 0,354 \text{ мм}$

3. Визначіть товщину немагнітного покриття на ОК з феромагнітного матеріалу, якщо індуктивність котушки індуктивного перетворювача з числом витків 500 дорівнює 60 мГн. Діаметр полюсних наконечників магнітопроводу дорівнює $d = 10 \text{ мм}$.

В розрахунках магнітним опором магнітопроводу перетворювача і ОК знехтувати.

Розв'язання. Товщину немагнітного покриття, з урахуванням того, що площа поперечного пертину магнітопроводу визначається як $S = \frac{\pi d^2}{4}$, становить

$$\delta = \frac{\mu_0 S (W^2 - LR_M)}{2L},$$

де опір магнітопроводу R_M дорівнює нулю за умовою задачі, L – індуктивність котушки. Підставивши дані у вираз, маємо:

$$\delta = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{3,14 \cdot 10^{-4}}{4} \cdot 500}{2 \cdot 60 \cdot 10^{-3}} \cong 205 \text{ мкм}.$$

Відповідь: $\delta = 205\text{мкм}$.

Контрольні запитання

1. Як впливає стан поверхні об'єкта контролю на результати вимірювання товщини покриття магнітним товщиноміром пондеромоторного типу?
2. Поясніть чи впливає питома електропровідність матеріалу об'єкта контролю на результат вимірювання товщини покриття?
3. Чи впливає магнітна проникність матеріалу об'єкта контролю на результат вимірювання товщини покриття?
4. З якою метою виконують калібрування магнітних товщиномірів?
5. В чому полягає фізична сутність пондеромоторних магнітних товщиномірів?
6. Поясніть принцип дії магнітостатичних товщиномірів на прикладі товщиноміра з перетворювачем Холла.
7. Виведіть рівняння перетворення та чутливості індуктивних магнітних товщиномірів та проаналізуйте їх.
8. Дайте порівняльну характеристику магнітних товщиномірів пондеромоторного, магніто статичного, індуктивного та індукційного типів.
9. Проаналізуйте роботу диференціального трансформаторного вимірювача варіацій товщини немагнітних покриттів на феромагнітній основі.

РОЗДІЛ 5. МАГНІТНА СТРУКТУРОСКОПІЯ

5.1. Вплив методів механічної та хіміко-термічної обробки феромагнітних сталей на їх магнітні властивості

Механічні, термічні і хімічні процеси утворення та перебудови структури та складу феромагнітних матеріалів одночасно змінюють і їх магнітні властивості.

Серед механічних та хіміко-термічних способів обробки феромагнітних сталей найбільш поширеними є наступні:

загартування – операція, що полягає у нагріві сталі до певної температури, витримці при цій температурі певний час і наступному швидкому охолодженні;

відпал – різновид термічної обробки, в результаті якої отримують стійкі структури, наприклад, для сталі – структури розпаду аустеніта (аустеніт – це розчин вуглецю у залізі);

відпуск – різновид термічної обробки сталі, яка полягає у нагріві сталі до певної температури, витримці при цій температурі певний час і наступному охолодженні;

наклеп – поверхневе зміцнення металу під час його пластичної деформації у холодному стані в результаті чого підвищується його міцність, твердість та зменшується в'язкість;

цементация – операція науглецювання сталевих виробів для підвищення твердості поверхневого шару, яка здійснюється шляхом їх розігріву у присутності науглецюючого середовища.

Встановлено, що намагнічування феромагнетика залежить від того, в якому кристалографічному напрямку прикладається зовнішнє магнітне поле. Ребро кристала у вигляді куба є напрямком легкого намагнічування, а просторова діагональ – напрямком важкого намагнічування. Тому фізикохімічні процеси утворення та перебудови структури та складу феромагнітних матеріалів одночасно змінюють і його магнітні властивості. Так, наприклад, відомо, що пластична деформація (наклеп) викликає зсув в

кристалах та спотворення просторової решітки. Площини зсуву і внутрішні напруження, які обумовлені викривленням решітки, ускладнюють процеси намагнічування/розмагнічування феромагнетиків. Тому магнітна проникність μ під час пластичної деформації зменшується.

Аналогічно наклепу впливає на магнітні властивості матеріалів подрібнення зерна.

Відпал викликає рекристалізацію і діє протилежно наклепу – він підвищує μ , знижує коерцитивну силу H_c та втрати на гістерезис.

Значно відчутніше за наклеп спотворює просторову решітку α -заліза загартування на мартенсіт (твердий розплав вуглецю та лігуючих елементів у α -залізі). Його решітка подібна до решітки α -заліза, в яку примусово введені атоми вуглецю. Закалка збільшує H_c та зменшує μ . В результаті закалки з'являється парамагнітний аустеніт в тим більшій кількості, чим вищий вміст в сталі вуглецю.

В процесі операції відпуску розпадаються переохолоджені тверді розчини (аустеніт, мартенсіт) і зменшуються внутрішні напруження (спотворення решітки). Це пояснює вплив відпуску на магнітні властивості сталі у напрямку протилежному впливу загартування.

Коерцитивна сила і твердість сталі залежить від степені дисперсності та кількісного вмісту карбідів (хімічних зв'язань вуглецю з іншими хімічними елементами), які вкраплені в α -залізо. У відпаленій вуглецевій сталі H_c збільшується, а μ зменшується з підвищенням вмісту вуглецю, тобто зі зростанням кристалітів Fe_3C (кристаліти – це дрібні кристали).

В процесі відпуску загартованої сталі значення H_c знижується зі зростанням температури відпуску. Під час цієї операції кількість цементита лишається постійною, проте змінюється ступінь його дисперсності (кількості кристалітів).

Вплив основних методів механічної та хіміко-термічної обробки феромагнітних сталей на їх магнітні характеристики зведено в табл. 5.1.

Табл. 5.1. Вплив основних методів механічної та хіміко-термічної обробки феромагнітних сталей та їх магнітні характеристики.

№ п/п	Метод обробки	Напрямок зміни магнітної проникності, μ	Напрямок зміни коерцетивної сили, H_c
1	Наклеп, зменшення зерна	↓	↗
2	Відпал	↗	↘
3	Загартування	↘ ↙	↗ ↘
4	Збільшення температури відпуску	-	↘
5	Цементация	↘	↗

5.2. Прилади для контролю структури і механічних властивостей виробів з феромагнітних матеріалів

В магнітній структуроскопії використовують відносні вимірювання, себто не вимірюють абсолютне значення певного магнітного параметра, а тільки фіксують його відповідність номінальному значенню. Останній отримують під час калібровки приладу за допомогою калібровочних зразків з відомими магнітними характеристиками та параметрами.

В даний час немає загальної теорії магнітної структуроскопії. Тому в

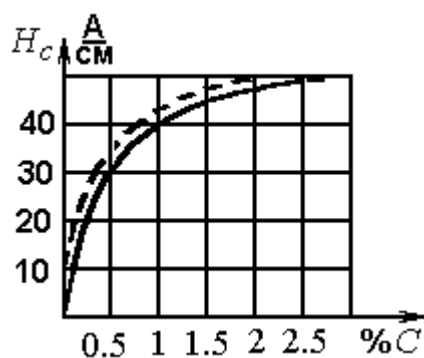


Рис. 5.1. Залежність H_c від вмісту вуглецю в сталі

кожному конкретному випадку знаходять кореляцію між магнітними й іншими властивостями матеріалів. В тих випадках, коли така кореляція існує, її наявність для кожного ОК необхідно перевірити і встановити можливість її реалізації при виконанні контролю в конкретних виробничих умовах. Найбільш відомим

прикладом кореляції є зв'язок між твердістю вуглецевих і низьколегованих сталей та їхньою коерцитивною силою. Чим більше вміст вуглецю в сталі, тим вище її коерцитивна сила (див. рис.5.1). Але в різних структурних складових вуглець збільшує H_c з різною інтенсивністю.

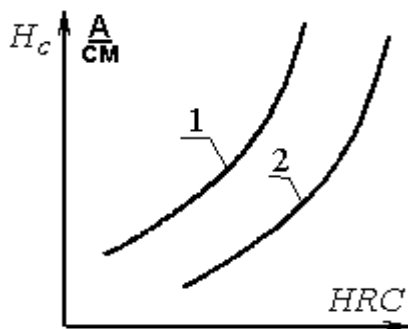


Рис. 5.2. Залежність H_c від твердості

Коерцитивна сила вуглецевих сталей як правило, добре корелює з їхньою механічною твердістю. На рис. 5.2. наведено криві, що показують зв'язок H_c і твердості сталей.

Задача про кореляцію магнітних і механічних властивостей сталей тісно пов'язана із встановленням залежності між магнітними властивостями сталей і режимом їхньої термічної обробки. Оскільки останній одночасно впливає і на магнітні, і на механічні властивості сталей, то практично в усіх випадках, коли магнітні властивості корелюють із твердістю або іншими механічними властивостями, вони також однозначно пов'язані з режимом термічної обробки. Отже H_c залежить і від температури загартування. Крім того, магнітними методами можна визначити глибину загартованого і цементованого прошарку вуглецевих сталей. В усіх цих випадках контроль проводять за допомогою спеціальних приладів – коерцитиметрів.

Одна з конструкцій коерцитиметра (вібраційного коерцитиметра) показана на рис. 5.3, на якому позначено: 1 – соленоїд, 2 – вимірювальні котушки, 3 – вольтметр, 4 – двигун, 5 – об'єкт контролю.

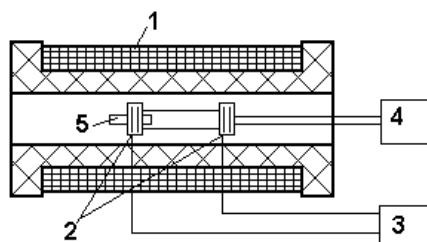


Рис. 5.3. Схема вібраційного коерцитиметра

Вимірювальні котушки 2 жорстко скріплені і розміщені на деякій відстані одна від іншої. Відстань між ними визначено розмірами зразка. Котушки з'єднані зустрічно. Ці котушки поміщають у соленоїд 1, соосно з ним. При вібрації котушок і за відсутності ОК сумарна е.р.с. дорівнює нулю (завдяки зустрічному з'єднанню котушок). Якщо поблизу однієї з них помістити попередньо намагнічений до насичення ОК, то його поле розсіювання викликає е.р.с. Подаючи в соленоїд струм розмагнічування, можна поступово шляхом його збільшення добитись того, щоби в котушках 2 сумарна е.р.с. стала рівною нулю, що фіксується приладом 3. У цьому випадку напруженість поля всередині соленоїда дорівнюватиме коерцитивній силі, оскільки в ОК 5 магнітний потік $\Phi=0$, отже і $B=0$. Значення коерцитивної сили розраховується за струмом I соленоїда

$$H_c = kI, \quad (5.1)$$

де k – постійна котушки, m^{-1} .

Такі прилади використовують для вимірювання H_c тільки зразків не великих розмірів і простої геометричної форми.

В МНК для контролю ОК значних геометричних розмірів застосовують коерцитиметри з приставними електромагнітами. Схема такого приладу показана на рис. 5.4. Його основу складає П-подібний електромагніт з обмоткою W для намагнічування/розмагнічування. Перемичкою електромагніта служить осердя ферозонду, який виконує функцію індикатора нуля.

Після намагнічування ділянки контрольованого виробу і вимикання струму намагнічування включають струм розмагнічування і плавно збільшують його доти, доки покази приладу у вимірювальному ланцюгу ферозонда не стануть рівними нулю, тобто коли на контрольованій ділянці ОК $\Phi=0$. Це свідчить про те, що створена приставним електромагнітом напруженість поля на контрольованій ділянці дорівнює H_c .

Апаратна частина установки (рис. 5.5) включає джерело живлення, нуль-індикатор на виході вимірювальної обмотки ферозонда і вимірювач струму розмагнічування, показання якого пропорційні H_c .

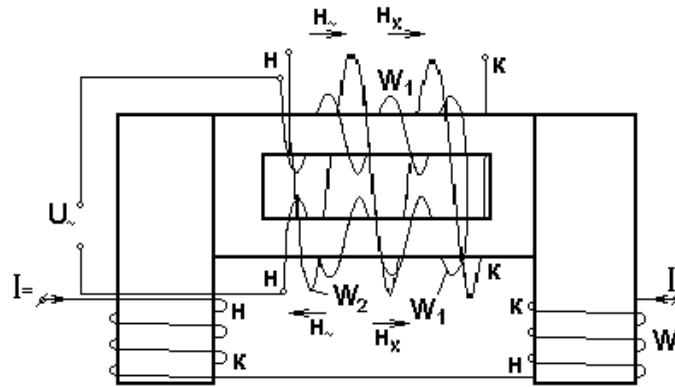


Рис. 5.4. Приставний електромагніт коерцитиметра

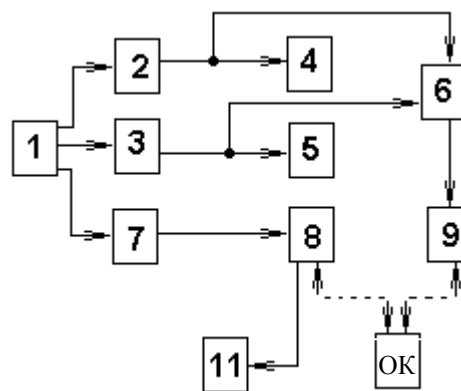


Рис. 5.5. Апаратна частина коерцитиметра з приставним магнітом: 1 – силовий трансформатор, 2, 3 – стабілізовані випрямлячі струму відповідно розмагнічування та намагнічування, 4, 5 – індикатори струмів відповідно розмагнічування та намагнічування, 6 – комутатор, 7 – ланцюг живлення ферозонду 8, 9 – електромагніт, 10 – ОК, 11 – пристрій вимірювання напруги на виході ферозонда

Напруга живлення приладу $U=220$ В ($f = 50$ Гц) подається на силовий трансформатор, до виходів якого підключені блоки 2, 3, 7.

Прилади для контролю фізико-хімічних властивостей матеріалів деталей, дія яких основана на вимірюванні магнітної проникності, поки що не знайшли широкого застосування у промисловості, хоча в ряді випадків кореляційна залежність між μ та фізико-хімічними властивостями ОК має більш чітко виражений характер, а прилади для вимірювання μ зручніші з огляду на автоматизацію процесу контролю.

Підсумок до розділу

Фізичні і хімічні процеси утворення та перебудови структури та складу феромагнітних матеріалів одночасно змінюють і їх магнітні властивості. Зв'язок між фізико-хімічними та магнітними характеристиками матеріалів має статистичний (кореляційний) характер. Цей зв'язок використовується для магнітного аналізу і структуроскопії феромагнітних матеріалів. Він виникає в тих випадках, коли хімічні і фізичні процеси утворення і перебудови структури і складу феромагнітного матеріалу одночасно формують і змінюють його магнітні властивості.

Форма і розміри петлі гістерезиса залежать від таких властивостей матеріалу, як хімічний склад, наявність домішок і атомів легуючих елементів, наявності в матеріалі мікро- і макронапружень, неоднорідності, розмірів зерен і т.і.

Складний характер одночасного впливу на магнітні властивості матеріалів (часто в протилежних напрямках) різноманітних чинників, як правило, не дозволяє їх виділити і визначити вплив окремо кожного з них. Тільки в деяких простих випадках є можливість визначити на якісному рівні вплив одного або декількох (основних) чинників на розміри і форму петлі гістерезиса.

Контрольні запитання

1. Наведіть приклади та викладіть сутність найбільш поширених способів механічної та хіміко-термічної обробки феромагнітних сталей.
2. Як впливають різні способи механічних та хіміко-термічних способів обробки феромагнітних сталей на їх магнітні характеристики?
3. Які властивості магнітних характеристик використовуються в неруйнівному контролі твердості феромагнітних об'єктів?
4. Наведіть залежність коерцитивної сили феромагнітних сталей від твердості та проаналізуйте цю залежність.
5. Викладіть основну ідею та принцип роботи вібраційного коерцитиметра.
6. Накресліть структуру та поясніть роботу коерцитиметра з приставним електромагнітом.

ДОДАТОК А

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВИХ ПРИЛАДІВ МАГНІТНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

А.1. Магнітні дефектоскопи

Дефектоскоп магнітний МД-01ПК ІІУ призначений для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів типу порушення суцільності металу магнітопорошковим методом на локальних ділянках крупно габаритних виробів у прикладеному змінному чи постійному магнітному полі.

Дефектоскоп МД-4К (на постійних магнітах) призначений для виявлення поверхневих дефектів типу порушення суцільності металу магнітопорошковим методом на локальних ділянках крупно габаритних деталей у прикладеному постійному магнітному полі елементи намагнічування використані постійні магніти, тому дефектоскоп не потребує електроживлення, що дозволяє використовувати його для роботи у вибухо- та пожежонебезпечних середовищах, на будівельних майданчиках, ділянках складання та зварювання у польових умовах. Блоки намагнічування комплектуються круглими постійними магнітами.

Дефектоскоп МД-4КМ (на постійних магнітах) – модифікація приладу МД-4К, призначений для контролю локальних ділянок крупно габаритних феромагнітних деталей магнітопорошковим методом. Для зручності роботи дефектоскоп оснащено набором полюсних наконечників, які дозволяють якісно контролювати деталі різноманітної форми, та полегшити роботу дефектоскопа. Блоки намагнічування комплектуються круглими постійними магнітами. Зусилля відриву блоків намагнічування від феромагнітної поверхні для дефектоскопів МД-4К та МД-4КМ становить не менше 30 кгс.

Дефектоскоп на постійних магнітах УніМАГ-01 призначено для намагнічування ділянок зварюваних з'єднань та поверхонь виробів з феромагнітних матеріалів прикладеним магнітним полем з метою виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів у процесі проведення НК магнітопорошковим методом. Пристрій

намагнічування може експлуатуватись у цехових, лабораторних та польових умовах, на висотних об'єктах і в умовах ускладненого енергопостачання чи неприпустимості його застосування у відповідності до правил техніки безпеки, за температури навколишнього середовища від -30 до $+50^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості до 95% за температури 35°C . Блоки намагнічування комплектуються постійними магнітами зі сплаву Fe-Nd-B і оздоблені гнучким магнітопроводом довжиною 400 мм.

Універсальний магнітопорошковий дефектоскоп МД-83 ПК ПУ застосовується для магнітопорошкового контролю сталених феромагнітних виробів циліндричної форми з отворами, (наприклад, таких як пружини, деталі буксового вузла, сегменти труб тощо), а також для контролю крупно габаритних виробів з намагнічуванням імпульсним струмом шляхом його пропускання через деталь.

Основні технічні характеристики дефектоскопів наведено в таблиці А1.

Табл. А.1.

№	Характеристика	Значення характеристик магнітних дефектоскопів				
		МД-01ПК ПУ	МД-4К	МД-4КМ	УніМАГ-01	МД-83 ПК ПУ
1	Тип	Переносний	Переносний	Переносний	Переносний	Стационарний
2	Розмір контрольованої ділянки, мм	10 - 240	120	120	200	-
3	Максимальний робочий струм, А: • мережева версія • акумуляторна версія	5	-	-	-	-
		25	-	-	-	-
4	Робоча напруга, В: • мережева версія • акумуляторна версія	220	-	-	-	220
		12	-	-	-	-
5	Частота (мережева версія), Гц	$50 \pm 0,4$	-	-	-	50
6	Максимальне значення імпульсного струму, А: • в мідному стрижні, не менше • в ОК, не менше	-	-	-	-	10000
		-	-	-	-	1500
7	Величина залишкової напруженості магнітного поля, мТл	-	-	-	-	5
8	Максимальна напруженість поля у полюсів, не менше А/см	-	1100	1100	2000	-
9	Габаритні розміри, мм	175 x 160 x 55	-	-	$\varnothing 35, L 120$	100x120x75
10	Діапазон робочих температур, $^{\circ}\text{C}$	$-20 \div + 50$	-	-	-	-
11	Маса у комплекті, не більше, кг	3 (8)	7	7,5	0,75	200

А.2. Магнітні товщиноміри.

Магнітний товщиномір МТ2007 (МТ-007) призначено для вимірювання товщин лакофарбових, гальванічних та інших немагнітних провідних та непровідних покриттів, які наносяться на феромагнітний метал. За рахунок пам'яті калібрувальних характеристик магнітоіндукційних перетворювачів дозволяє використовувати до семи типів перетворювачів з одним електронним блоком та проводити вимірювання товщин на нерівномірній основі. Такий товщиномір дозволяє визначити середнє арифметичне значення та середньоквадратичне відхилення, а також користуватися функціями статистичної обробки результатів вимірювання і передачу їх на комп'ютер.

Магнітний товщиномір покриттів МТП-1 застосовуються при контролі товщини теплоізоляційних покриттів сталевих труб та відхилення їх осевих ліній від вісі поліетиленових покриттів (ГОСТ 30732-2001). Застосовується при вихідному технологічному контролі та обстеженні теплотрас, трубопроводів. Діапазон покриттів 5...100мм.

Магнітний товщиномір покриттів ТМ-20МГ4 призначений для вимірювання товщини немагнітних покриттів (лакофарбових, гальванічних, плівкових та листових, діелектричних та електропровідних) на феромагнітній основі. Область застосування – контроль товщини покриття в машинобудуванні, металургії, автомобілебудуванні, електротехнічній промисловості.

Магнітний товщиномір ТПФ-1200 призначено для вимірювання товщини немагнітних покриттів на феромагнітних матеріалах в широкому діапазоні товщин - від 0.1 до 12 мм. Вимірювання в усьому діапазоні проводиться за допомогою одного перетворювача без перемикання діапазонів вимірювання та без перекалібрування приладу. Використовується даний товщиномір для вимірювання товщини немагнітних металів на феромагнітній основі (наприклад, для вимірювання товщини безвуглецевого шару хромонікелевих труб в хімічній промисловості). Змінне значення ціни поділки в залежності від товщини покриття дозволяє підтримувати відносну похибку на постійному рівні.

Цифровий товщиномір покриттів ТТ 220 – працює за принципом магнітної індукції. Дозволяє вимірювати товщини немагнітних покриттів на магнітній металевій основі (алюміній, цинк, хром, емаль, каучук та лакофарбові покриття на основі зі сталі, заліза і нержавіючої сталі).

Основні технічні характеристики товщиномірів наведено в таблиці А2.

Табл. А.2.

№	Характеристика	Значення характеристик магнітних товщиномірів				
		МТ2007	МТП-1	ТМ-20МГ4	ТПФ-1200	ТТ 220
1	Тип	Переносний	Переносний	Переносний	Переносний	Переносний
2	Діапазон вимірювання, мкм	5-2000	5-100	0-2000	100-1200	0-1250
3	Мінімальна товщина основи, мм	0,5	2	-	-	0,5
4	Похибка, %	3 (10мкм)	1	2	3	3
5	Мінімальний радіус кривизни, мм:					
	• випуклість	25	40	5	10	1,5
	• впадина	200	100	-	-	-
6	Розмір мінімальної зони контролю, мм	Ø20 (50)	-	-	28 x 6	Ø7
7	Максимальний робочий струм, мА:	12	9	12	-	-
8	Час одного вимірювання, с	-	< 3	-	-	-
9	Робоча напруга, В:	-	9	6-9	-	7,2
10	Габаритні розміри, мм	45 x 100 x 180	147x72x27	160x70x30-	Ø 35, L 120	150 x 53 x 22
11	Діапазон робочих температур, °С	-10 ÷ + 40	-10 ÷ + 40	-10 ÷ + 40	-10 ÷ + 40	0 ÷ + 45
12	Маса у комплекті, не більше, кг	0,3	0,5	0,36	0,75	0,2

А.3. Магнітні структуроскопи.

Структуроскоп КРМ-Ц-К3 призначений для контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій, виготовлених з магнітних марок конструкційних сталей і по величині коерцитивної сили визначає механічні властивості та структурний стан конструкційних марок сталі широкого застосування. Прилад забезпечує сортування сталі та чугунку по маркам, а також по хімічному складу в межах даної марки.

Магнітний структуроскоп КРМ-Ц-К2М призначено для неруйнівного контролю механічних властивостей, напружено-деформованого стану та степені втоми за визначенням магнітної характеристики металу – коерцитивної сили, визначення

ресурсу металоконструкцій, виготовлених з магнітних марок конструкційних сталей: вантажопідйомних механізмів (кранів, ескалаторів, підйомників, ліфтів), трубопроводів, котлів, судів під тиском, зварних з'єднань та ін. Особливістю приладу є висока стійкість від зазору, коли показання залежать тільки від властивостей металу та не залежать від заважаючих факторів (захисне покриття (фарба, плівка та ін.) товщиною до 6 мм на металі, що контролюється, або еквівалентні такому зазору корозія, шорсткість, кривизна поверхні та ін.).

Магнітний структуроскоп СМ-401.1 (СМ-401.2) відноситься до мікропроцесорних приладів та призначений для зняття петлі гістерезису, вимірювання та контролю коерцитивної сили (струму розмагнічення), а також залишкового магнітного потоку об'єкта контролю. Застосовуються найчастіше на залізничному транспорті. Програмне забезпечення передбачає статистичну обробку результатів вимірювання та контролю, формування документів з результатами (таблиці, протоколи), візуалізацію граничної петлі гістерезису ділянки, що контролюється, визначення фізико-механічних показників (межу текучості, товщину наклепу та ін.) за вимірюваною величиною коерцитивної сили та залишкового потоку.

Цифровий напівавтоматичний магнітний структуроскоп «КРМ-Ц» призначено для неруйнівного контролю фізико-механічних властивостей феромагнітних виробів за наявності експериментально визначеного зв'язку між коерцитивною силою та параметрами, що контролюються. Застосовується в різних галузях промисловості для сортування сталей по маркам, контролю якості термічної обробки, механічних та пластичних властивостей сталевого прокату та конструкційних матеріалів, виробів із чугунка, контролю виробів після поверхневого зміцнення (різних видів хіміко-термічної обробки, поверхневого загартування, наклепу та інші).

Основні технічні характеристики структуроскопів наведено в таблиці А3.

Табл. А.3.

№	Характеристика	Значення характеристик магнітних структуроскопів			
		КРМ-Ц-К3	КРМ-Ц-К2М	СМ-401.1	КРМ-Ц
1	Тип	Переносний	Переносний	Переносний	Стационарний
2	Діапазон вимірювання коерцитивної сили, А/см	1,0-40,0	1,0-60,0	1,5-45	1.0-40.0
3	Похибка, %	3	5	5	5

4	Амплітуда імпульсів намагнічування, А	2,0	3,0	10	2,0
5	Частота (мережева версія), Гц	-	50	-	50
6	Споживана потужність, Вт:	-	80	100	120
7	Діапазон вимірювання залишкового магнітного потоку, мкВб:	-	-	5-500	-
8	Час одного вимірювання, с	<8	6-8	-	8
9	Робоча напруга, В: • мережева версія • акумуляторна версія	- 6	220 12	220 ±10 36 ±10	220 -
10	Габаритні розміри, мм	215x210x80	230x250x60	250x140x200	230 x 250 x602
11	Діапазон робочих температур, °С	-20 ÷ + 50	-10 ÷ + 40	+5 ÷ + 40	-5 ÷ + 50
12	Маса у комплекті, не більше, кг	3,7	3,2	17	3,7

А.4. Обладнання для МНК

А.4.1. Дефектоскопічний індикаторний матеріал для магнітопорошкового контролю – магнітний порошок ПЖВ5-71, використовується для приготування масляної, керосиново-масляної суспензії, а також для сухого методу контролю. Області застосування: залізничний та авіаційний транспорт, енергетика, автомобільна, трубна, оборонна та інші галузі промисловості. Розміри часток не більше 0,450 мм.

А.4.2. Установа магнітопорошкового контролю коліс залізничного транспорту УМПК-1 призначена для магнітопорошкового контролю 55 типорозмірів коліс залізничного транспорту діаметром від 650 мм до 1300 мм на наявність поверхневих та підповерхневих дефектів довільної орієнтації на всіх поверхнях колеса за виключенням поверхонь внутрішнього отвору ступиці. Забезпечується реалізація методів контролю коліс у відповідності з ГОСТ 21105 “Контроль неразрушающий. Магнітопорошковий метод”; ISO 6933; PrEN 13262; DIN EN ISO – 9934 – 1,2,3; AAR M 107. Час контролю колеса не більше за 90 с, а час перенастроювання установки під інший типорозмір колеса не більше за 30 хвилин.

Додаток Б

Нормативно-технічна документація з питань магнітного неруйнівного контролю

ГОСТ 21104-75 Контроль неруйнівний. Магнітоферозондовий метод.

ГОСТ 21105-87 Контроль неруйнівний. Магнітопорошковий метод.

ГОСТ 24450-80 Контроль неруйнівний магнітний. Терміни та визначення.

ГОСТ 25225-82 Контроль неруйнівний. Шви зварних з'єднань трубопроводів.

Магнітографічний метод.

ГОСТ 26697-85 Контроль неруйнівний. Дефектоскопи магнітні та вихрострумові. Загальні технічні вимоги.

ГОСТ 26737-85 Контроль неруйнівний. Товщиноміри покриттів магнітні та вихрострумові. Загальні технічні вимоги.

ГОСТ 8283-93 Дефектоскопи електромагнітні. Методи та засоби перевірки.

ДСТУ 2954-94 Сталь. Методи магнітного контролю.

ДСТУ EN 1291—2001 Контроль неруйнівний зварних з'єднань.

Магнітопорошковий контроль. Метод.

ДСТУ EN 1291—2001 Контроль неруйнівний зварних з'єднань.

Магнітопорошковий контроль зварних з'єднань. Приймальні критерії.

ДСТУ EN 10228-1-2005 Контроль неруйнівний поковок зі сталі. Частина 1.

Магнітопорошковий контроль.

Література

1. Алешин Н.П. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий / Н.П. Алешин, В.Г. Щербинский. – М.: Высшая школа, 1991. – 271 с.
2. Афанасьев Ю.В. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки / Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Щелкин А.П. – Л. : Энергия, 1972. - 272с.
3. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы / Афанасьев Ю.В. – Л. : Энергия, 1982. – 188 с.
4. Белокур И.П. Дефектоскопия материалов и изделий / И.П. Белокур, В.А. Коваленко. – К. : Техника, 1989. – 192 с.
5. Білокур І.П. Основи дефектоскопії : підручник / Білокур І.П. – К. : Азімут-Україна, 2004. – 496 с.
6. Зацепин Н.Н. Магнитная дефектоскопия / Н.Н. Зацепин, Л.В. Коржова. – Минск : Наука и техника, 1981. – 206 с.
7. Неразрушающий контроль металлов и изделий : справочник / [ред. Г.С. Самойлович]. – М. : Машиностроение, 1976. – 456 с.
8. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник в 2кн. / [ред. Ключев В.В.]. – М. : Машиностроение, 1986. – . – кн. 2. – 1986. - 352 с.
9. Герасимов В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Ключев, В.Е. Шатерников. – М. : Энергоатомиздат, 1983. - 272 с.
10. Дорофеев А.Л. Индукционная толщинометрия / А.Л. Дорофеев, А.И. Никитин, А.Л. Рубин. – М. : Энергия, 1978. – 184 с.
11. Неразрушающий контроль : практ. пособие в 5 кн. / [сост. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В.; ред. Сухоруков В.В.]. – М. : Высшая школа, 1992. - . - кн. 3 : Электромагнитный контроль. – 1992. - 312 с.
12. Маєвський С.М. Основи побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі / С.М. Маєвський, В.П. Бабак, Л.М. Щербак. – К. : Либідь, 1993. – 200 с.
13. Матвеев В.И. Из истории неразрушающего контроля / В.И. Матвеев // Контроль. Диагностика. - 2005. - №10. - С. 3-15.

14. Методичні вказівки до курсового проектування з дисципліни "Магнітний та вихорструмний неруйнівний контроль" в 2 ч. / [укл. Алексеев Г.О., Куц Ю.В., Маєвський С.М., Протасов А.Г.] – К. : КПІ, 1997. - .- Ч.1. – 1997. – 43 с.
- 15.Соболев В.С. Накладные и экранные датчики / В.С. Соболев, Ю.П. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 142 с.
16. Бугров А.В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества / Бугров А.В. – М. : Машностроение, 1982. – 94 с.
17. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Магнитный контроль : ПНАЭ Г-7-015-89. – [Дата введения 01.07.1990]. – М. : Госатом-энергонадзор СССР, 1990. – 31 с.
- 18.Дефекты металлопродукции. Применение неразрушающих методов контроля для их выявления / [ред. Павлий И.В.]. / К. :НПФ “Ультракон”, 1997.– 16 с.
- 19.Панин В.В. Измерение импульсных магнитных и электрических полей / В.В. Панин, Б.М. Степанов. - М. : Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.
- 20.Протасов А. Г. Теоретико-методичні засади підготовки фахівців з неруйнівного контролю та технічної діагностики на компетентнісній основі. / Протасов А. Г. - Ів.-Франківськ : Симфонія форте, 2010. – 238 с.
- 21.Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідник - посібник / [ред. В.В. Панасюка]. – К. : Наук. Думка, 1988. – 230 с.
22. Неруйнівний контроль і технічна діагностика: довідниковий посібник в 5 т. / [ред. Назарчук З.Т.]. – Львів : Фізико-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2001. - .- Т. 5.– 2001. - 1134 с.
23. Семенов Н.М. Цифровые феррозондовые магнитометры / Н.М. Семенов, Н.И. Яковлев. – Л. : Энергия, 1978.– 168 с.
24. Белокур И.П. Дефектоскопия материалов и изделий / И.П. Белокур, В.А. Коваленко. – К. : Техника, 1989. – 192 с.
25. Троицкий В.А. Магнитный контроль сварных соединений и деталей машин / Троицкий В.А. – К. : Феникс, 2002.– 300 с.

26. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / Мельгуй М.А. – Минск : Наука и техника, 1980. – 184 с.
27. Цапенко В. К. Основы ультразвукового неруйнівного контролю / В. К. Цапенко, Ю. В. Куц. – К. : НТУУ „КПІ”, 2010. – 448 с.