

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА  
ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Методичні вказівки до самостійної роботи  
для підготовки бакалаврів з прикладної механіки за спеціалізацією  
«Технології та устаткування зварювання»

Затверджено на засіданні  
кафедри зварювального виробництва та  
автоматизованого проектування  
будівельних конструкцій,  
протокол №8 від 14.03. 2019 р.

**ЧЕРНІГІВ ЧНТУ 2019**

Контроль якості та технічна діагностика зварних конструкцій. Методичні вказівки до самостійної роботи для підготовки бакалаврів з прикладної механіки за спеціалізацією «Технології та устаткування зварювання». /Укл. Болотов Г.П., Болотов М.Г.– Чернігів. ЧНТУ, 2019. – 29 с.

Укладачі: Болотов Геннадій Павлович, доктор технічних наук, професор кафедри зварювального виробництва  
Болотов Максим Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва

Відповідальний: Прибитько Ірина Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри зварювального виробництва та АПБК

Рецензент: Ганєєв Тимур Рашитович, кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій Чернігівського національного технологічного університету

## Зміст

Вступ.....	3
1. Організація самостійної роботи.....	3
2. Загальні методичні вказівки.....	4
3. Робоча програма та методичні вказівки до самостійного вивчення тем Курсу	
3.1. Змістовний модуль 1. Дефектологічні характеристики зварних з'єднань	
3.1.1 Методичні вказівки .....	5
3.1.2 Питання до самоперевірки .....	6
3.2. Змістовний модуль 2. Неруйнівні методи контролю зварювання	
3.2.1 Методичні вказівки .....	7
3.2.2 Питання до самоперевірки .....	8
3.3 Змістовний модуль 3. Фізичні та статистичні методи контролю	
3.3.1 Методичні вказівки .....	9
3.3.2. Питання до самоперевірки .....	9
4 Виконання розрахунково-графічної роботи	
4.1 Методичні вказівки .....	10
4.2 Структура розрахунково-графічної роботи .....	10
4.3 Переклади розрахунків основних характеристик неруйнівних методів контролю .....	10
4.3.1 Радіоскопічний метод .....	10
4.3.2 Радіометричний метод .....	12
4.3.3 Ультразвуковий метод.....	14
4.3.4 Магнітний метод .....	17
4.3.5 Електромагнітний метод .....	21
5. Завдання на розрахунково-графічну роботу .....	25
6. Вибір варіанту завдання .....	27
Рекомендована література.....	28

## Вступ

Забезпечення високої якості зварювальних робіт – одна з найбільш важливих науково-технічних та виробничих проблем в галузі зварювання, значення якої зростає по мірі ускладнення конструкцій зварних виробів, застосування нових конструкційних матеріалів. Відповідальна роль у вирішенні цієї проблеми належить розробці та широкому застосуванню сучасних методів та засобів неруйнівного контролю, ефективність яких визначається, в першу чергу, їх достовірністю та продуктивністю.

Мета вивчення курсу «Контроль якості зварювання та технічна діагностика зварних конструкцій» - надати майбутнім фахівцям відповідні теоретичні знання та практичні навички в галузі дефектоскопії зварних з'єднань та конструкцій.

За результатами вивчення дисципліни студенти повинні знати основні способи контролю якості зварних конструкцій, принципи побудови та роботи дефектоскопічного устаткування; вміти визначити методи та методики діагностування зварної продукції, обирати обладнання та матеріали для проведення діагностування.

### 1 Організація самостійної роботи

Вивчення навчальної дисципліни складається з аудиторних занять (лекції та лабораторні роботи) та самостійної роботи студента. Кількість часу, що виділяється для цих видів робіт, визначається навчальним планом підготовки фахівців за напрямом «Зварювання» та навчальною програмою дисципліни «Контроль якості та технічна діагностика зварних конструкцій». Завдання до самостійної роботи видаються студентові викладачем під час аудиторних занять. На аудиторних заняттях та на консультаціях викладач контролює виконання поставлених завдань в процесі поточного контролю, під час захисту лабораторних та розрахунково-графічних робіт, а також допомагає студенту правильно організувати самостійну роботу.

Самостійну роботу необхідно розпочинати з початком семестру, щоб виконати весь її обсяг та створити найбільш сприятливі умови наприкінці семестру для успішного складання семестрових заліків та екзаменів.

Для підвищення ефективності самостійної роботи необхідна їй правильна організація, для чого доцільно розробити розпорядок дня після завершення аудиторних занять. Розпорядок дня варто скласти на початку нового семестру. Розподіл часу на самостійну роботу з окремих дисциплін необхідно виконувати з врахуванням завдань та строків їх виконання, що доводяться до студента викладачем на початку семестру. При плануванні самостійної роботи доцільно відводити стільки часу для виконання певного виду роботи, щоб його було достатньо для її завершення.

На результативність самостійної роботи в значній мірі впливає інтерес до матеріалу, що вивчається, зацікавленість у кінцевому результаті. Основними причинами відсутності інтересу є відсутність або обмеженість знань про предмет, нечітке уявлення про його значимість для формування фахівця.

Основна роль у навчальному процесі надається лекціям. Лектор допомагає студенту зрозуміти та засвоїти матеріал на самій лекції, вказує, над чим варто працювати в першу чергу, надає методiku вивчення дисципліни. Велику допомогу при засвоєнні лекційного матеріалу надає конспект, де своїми словами записуються основні моменти, за якими згодом буде легше відтворити матеріал, засвоєний на лекції. Якість конспекту має велике значення для якнайкращого засвоєння матеріалу. Охайний, осмислено написаний конспект зменшує витрати часу на повторювання матеріалу при підготовці до нової лекції та контрольних заходів (заліків, екзаменів, модульних контролів).

Теоретичний матеріал, що надається студентам на лекціях, закріплюється на практичних заняттях та лабораторних роботах. Лабораторні заняття дають наочне уявлення про явища та процеси. Експериментальні навички, що здобуваються в учбових лабораторіях є вкрай важливими для формування фахівця з даної галузі знань або спеціальності.

Готуватися до лабораторної роботи слід завчасно. До приходу в лабораторію студент повинен не тільки знати, що він буде робити, але й підготувати протокол зі схемами виконання експериментів, таблицями для запису результатів спостережень.

Для підвищення ефективності та продуктивності самостійної роботи необхідно враховувати також ергономічні фактори. Необхідно підтримувати порядок на своєму робочому місці. Для кожної речі повинне бути своє визначене місце. Освітлення повинне бути достатнім для зменшення втомлюваності очей.

## **2 Загальні методичні вказівки**

При вивченні курсу «Контроль якості зварювання та технічна діагностика зварних конструкцій» студенти знайомляться із фізичними основами основних методів контролю якості зварювання, методиками їх проведення та обладнанням. Основна увага у вивченні курсу приділяється ознайомленню із методами та технічними засобами неруйнівних методів контролю, які на даний час складають основу забезпечення якості зварювального виробництва та підвищення його продуктивності.

Матеріал курсу розглядається на прикладі як традиційних, широко розповсюджених методів руйнівного контролю, так і на прикладі сучасних фізичних методів діагностування, таких як радіаційний, ультразвуковий, магнітний, радіохвильовий, тепловий. Розглядаються засоби механізації та

автоматизації методів діагностування з метою підвищення їх об'єктивності та продуктивності.

В ході вивчення курсу крім проробки теоретичного матеріалу необхідно також виконати та захистити лабораторні роботи, а також, письмову контрольну (розрахунково-графічну) роботу.

### **3 Робоча програма та методичні вказівки до самостійного вивчення тем курсу**

#### **3.1 Змістовий модуль 1. Дефектоскопічні характеристики зварних з'єднань.**

Література: [1], с. 5-37, 292-302; [3], с. 7-28.

Теми за навчальною програмою дисципліни:

- Показники якості та надійності;
- Фактори та рівні якості продукції;
- Характеристики зварювальних дефектів:
- Контроль технологічної підготовки виробництва;
- Контроль зварних з'єднань на непроникність;
- Випробування металу на здатність до зварювання, руйнівні іспити зварних з'єднань;
- Візуальний контроль зварних швів.

##### **3.1.1 Методичні вказівки**

Якість продукції у сукупності із собівартістю є визначальними для забезпечення її конкурентоздатності. При вивченні тем цього розділу необхідно визначити поняття якості продукції у вигляді, записаному у державному стандарті, розрізняти поняття технологічної та експлуатаційної надійності, визначати фактори якості зварних з'єднань. Вміти охарактеризувати основні етапи виготовлення зварної конструкції, на яких необхідно здійснювати контроль, вказати сутність контролю на цих етапах. Навести основні вимоги до засобів та методик контролю.

Вміти надати поняття дефекту та охарактеризувати основні види дефектів за їх розташуванням, розмірами, впливом на службові властивості та походженням, навести класифікацію зварювальних дефектів. При вивченні зварювальних дефектів звернути увагу на причину їх утворення, вплив на працездатність виробу, способи попередження та усунення. Вміти визначати умови та ступінь припустимості наявності дефектів у конструкції.

Необхідно знати мету та основні етапи візуального контролю зварних швів, основні технічні засоби, що застосовують при зовнішньому огляді зварних швів.

Вміти охарактеризувати призначення та основні способи руйнівних іспитів зварних швів та конструкцій. Знати способи підготовки зразків до

механічних, металографічних та корозійних випробувань, методику їх проведення, вміти аналізувати результати досліджень.

Визначити призначення та класифікацію методів випробувань зварних швів на непроникність. Вміти охарактеризувати методику та умови проведення випробувань часом, стислим повітрям, аміаком. Визначити особливості пневматичних та гідравлічних іспитів зварних конструкцій, засоби з техніки безпеки при їх проведенні.

Знати конструкцію спеціальної вакуум-камери, гелієвих та галоїдних течешукачів, основні методики проведення випробувань за їх допомогою, галузь застосування.

### **3.1.2 Питання до самоперевірки**

- на міжкристалічну корозію зварних швів;
- привести класифікацію та надати поняття якості продукції;
- навести основні фактори якості зварювання;
- привести основні етапи контролю якості зварювального виробництва;
- надати поняття дефекту та привести класифікацію дефектів;
- охарактеризувати дефекти підготовки до зварювання;
- навести зовнішні дефекти зварних швів, вказати причину їх появи та способи усунення;
- навести внутрішні дефекти зварних швів, визначити їх вплив на працездатність зварного з'єднання;
- охарактеризувати дефекти внутрішньої мікроструктури зварних швів;
- навести методику контролю зварних швів зовнішнім оглядом;
- вказати особливості механічних випробувань зварних швів та зварних з'єднань;
- привести методику випробувань призначення випробувань зварних з'єднань на герметичність;
- навести особливості контролю на герметичність судин, що працюють під тиском;
- навести основні способи контролю герметичності зварних конструкцій та зварних швів гелієвим течешукачем.

### **3.2 Змістовий модуль 2. Неруйнівні методи контролю зварювання**

Література:[1], с. 37-235; [2], с. 131-360; [3], с. 29-98.

Теми за навчальною програмою дисципліни:

- Промислова радіографія;
- Промислова радіоскопія;
- Радіометрична дефектоскопія;

- Техніка безпеки при радіаційному контролі;
- Ультразвукова дефектоскопія. Технологія та устаткування;
- Магнітні методи контролю

### **3.2.1 Методичні вказівки**

Неруйнівні методи контролю якості зварювання є найбільш ефективними та перспективними, оскільки забезпечують визначення рівня продукції без її руйнування. При вивченні матеріалу цього розділу доцільно звернути увагу на техніко-економічні показники неруйнівних методів контролю.

При вивченні радіаційних методів контролю необхідно, в першу чергу, знати властивості радіаційних випромінювань та фізичні основи радіаційного контролю. Знати способи отримання радіаційних рентгенівських та гамма-променів, дефектоскопічне устаткування, його класифікацію

Необхідно знати технологічні особливості методів прямої експозиції та переносу зображення при радіографічному контролі, схеми просвічування зварних конструкцій, детектори радіографічної дефектоскопії, підсилюючі екрани, способи оцінки якості зварних швів по рентгенівських плівках. Мати уяву про основні методи радіоскопічного контролю. Конструкцію та принцип дії радіоскопічних детекторів – люмінесцентних екранів та електронно-оптичних перетворювачів. Вміти охарактеризувати основні схеми радіометричного методу контролю. Знати конструкцію та принцип дії радіометричних детекторів.

При вивченні радіаційних методів контролю якості зварювання необхідно звернути особливу увагу на основні санітарні норми та засоби захисту від існуючих випромінювань, дозиметричні прилади, способи зберігання радіоактивних матеріалів.

При вивченні ультразвукових методів контролю необхідно, в першу чергу, засвоїти фізичні основи методів, умови розповсюдження пружних коливань в матеріальних середовищах. Знати класифікацію ультразвукових методів дефектоскопії, типи шукачів та способи створення акустичного контакту. Звернути увагу на способи визначення координат та умовних розмірів дефектів. Знати принцип роботи ультразвукового дефектоскопу. Необхідно мати уяву про методика та технологію ультразвукового контролю різних типів зварних з'єднань, проблеми, що виникають при контролі. Вміти охарактеризувати область застосування ультразвукової дефектоскопії, вимоги до підготовки операторів.

При вивченні магнітних та електромагнітних методів контролю зварних з'єднань слід знати класифікацію та особливості фізичних основ методів. Мати уявлення про способи намагнічення зварних з'єднань та обладнання для реєстрації та вимірювання електромагнітних полів. Знати особливості



технології магнітопорошкового, магнітографічного та електромагнітного методів контролю, галузі їх застосування.

### **3.2.2 Питання до самоперевірки**

- вказати основні властивості радіаційних променів;
- навести класифікацію рентгенівських апаратів неперервної дії;
- навести конструкції та принцип дії гамма-дефектоскопів;
- охарактеризувати технологію радіаційного контролю методом прямої експозиції;
- привести способи оцінювання якості зварних швів за рентгенівськими та гамма-знімками;
- навести основні схеми радіоскопічного контролю;
- охарактеризувати основні типи дефекторів радіоскопічної інформації;
- пояснити основні способи радіометричного методу контролю;
- описати принцип дії радіометричних детекторів;
- навести основні вимоги техніки безпеки та захисту при проведенні радіаційного контролю;
- пояснити фізичні основи ультразвукових методів контролю;
- навести та охарактеризувати основні схеми ультразвукового контролю;
- показати необхідність та способи створення акустичного контакту при ультразвуковому контролі;
- показати, яким чином визначають координати та умові розміри дефектів при УЗК;
- привести схеми контролю зварних з'єднань ультразвуком;
- вказати галузь застосування ультразвукових методів контролю;
- навести фізичні основи магнітних методів контролю;
- навести та пояснити схеми намагнічення зварних з'єднань при виявленні поздовжніх та поперечних дефектів;
- описати технологію магнітопорошкового та магнітографічного контролю;
- охарактеризувати особливості електромагнітного методу контролю.

### **3.3 Змістовий модуль 3. Фізичні та статистичні методи контролю**

Література: [1], с. 256-292; [3], с. 106-112; [4], с. 116-128.

Теми за навчальною програмою дисципліни:

- капілярні методи контролю;
- сучасні фізичні методи контролю;
- статистичні методи контролю;
- статистичні методи контролю;
- техніко-економічні показники методів контролю;

- організація служби контролю.

### **3.3.1 Методичні вказівки**

Сучасні фізичні методи неруйнівного контролю зварних з'єднань засновані, в основному, на застосуванні електромагнітних коливань, довжина хвилі яких не перевищує одиниць сантиметрів. Це дозволяє виявляти дефекти у зварних швах розміром до мікрометрів, що неможливо зробити іншими способами контролю. Водночас ці методи мають більш складне і вартісне дефектоскопічне обладнання, і тому при вивченні цього розділу слід звернути увагу на раціональні області застосування цих методів.

При вивченні методу акустичної голографії слід звернути увагу на її недоліки у порівнянні з оптичною голографією. Вміти пояснити схему утворення акустичної голограми точкового джерела та схему відновлення голографічного зображення цього джерела.

Останніми роками розроблений і вже отримав практичне застосування новий метод радіаційного неруйнівного контролю – метод обчислювальної томографії. Необхідно визначити переваги цього метода перед традиційним радіаційним методом, вміти привести схему та пояснити принцип роботи обчислювального томографа, способи представлення результатів контролю.

Тепловий метод контролю заснований на застосуванні інфрачервоного випромінювання із довжиною хвилі у долі міліметра. Методику теплового методу доцільно розглянути на прикладі схеми контролю зварної сотової панелі із нагрівом пасивним та активним способами. Аналогічним чином необхідно розглянути сутність та методику проведення радіочастотного та радіохвильового контролю.

При вивченні статистичних методів контролю необхідно звернути увагу на їх призначення та різновиди. Необхідно знати основні поняття статистичних методів. Знати, що представляє собою план контролю, як проводиться вибірковий контроль за якісною та кількісною ознаками.

Необхідно орієнтуватися в основних техніко-економічних показниках методів контролю – собівартості та продуктивності, знати структуру системи контролю якості на підприємстві.

### **3.3.2 Питання до самоперевірки**

- показати різницю між оптичною та акустичною голографією;
- навести та пояснити схему утворення голографічного зображення;
- пояснити сутність методу обчислювальної томографії;
- пояснити фізичну основу теплового методу контролю;
- навести та охарактеризувати схему та методику теплового методу;
- пояснити принцип виявлення дефектів радіохвильовим методом;
- навести та пояснити класифікацію статистичних методів контролю;
- показати, що входить до плану контролю;

- охарактеризувати статистичний контроль за якісною та кількісною ознаками;
- привести структуру системи контролю якості у виробничих умовах.

## **4 Виконання контрольної (розрахунково-графічної) роботи**

### **4.1 Методичні вказівки**

Виконання розрахунково-графічної роботи призначено для поглиблення вивчення теоретичного матеріалу з дисципліни та для надбання практичних навичок з визначення основних параметрів неруйнівних методів контролю, що широко застосовуються для технічної діагностики зварних конструкцій.

Робота складається з двох частин: теоретичної, в якій передбачається короткий опис методу та технології контролю, і розрахункової, де наведено приклади розрахункового визначення основних характеристик окремих методів контролю, вивчення яких не передбачено навчальною програмою в лекційному курсі.

Виконання роботи базується на матеріалі дисциплін «Фізика», «Теоретичні основи електротехніки», вивченні лекційного матеріалу з даної дисципліни, проробці відповідної науково-технічної літератури.

### **4.2 Структура розрахунково-графічної роботи**

Розрахунково-графічної роботи складається з титульного аркуша, завдання, пояснювальної записки.

Завдання на роботу оформляється на окремому бланку і включає:

- прізвище, ім'я та по-батькові студента;
- номер варіанту і тему завдання;
- вихідні дані до роботи;
- дату видачі завдання;
- строк здачі закінченої роботи.

Пояснювальна записка до роботи повинна включати опис та принцип роботи методу контролю згідно варіанту завдання, мати розрахунки параметрів контролю, вказані у завданні. Наприкінці записки наводиться перелік навчальної та науково-технічної літератури, що була використана під час виконання роботи.

### **4.3 Приклади розрахунків основних характеристик неруйнівних методів контролю**

#### **4.3.1 Радіаційний контроль**

В автоматизованих системах контролю якості зварних з'єднань використовуються, в основному, методи радіометрії та радіоскопії, засновані на просвічуванні з'єднання іонізуючим випромінюванням, перетворенні скритого радіаційного зображення об'єкта в світлотіньове та передачі цього

зображення безпосередньо оператору або на відстань за допомогою оптичних та телевізійних систем для подальшого візуального аналізу на вихідних екранах. Використання телевізійних систем забезпечує радіаційну безпеку обслуговуючого персоналу, дозволяє підсилювати яскравість та контрастність зображення, змінювати його масштаб.

Основним показником якості зображення при радіоскопії є відносна чутливість, що визначається співвідношенням:

$$W_{\text{відн}} = C_n \frac{B}{\mu\delta} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

котре враховує вплив радіаційно-фізичних параметрів  $B$  та  $\mu$  (таблиця 4.1.), товщину виробу  $\delta$ , пороговій контраст ока  $C_n$ .

Контраст світлотіньового зображення на екрані детектора або телевізійної установки

$$C_3 = \frac{\Delta L_v}{L_v} = \frac{L_v - L_D}{L_v} \quad (4.2)$$

визначається яскравістю зображення дефекту  $L_D$  та фону  $L_v$ . При яскравості більше  $30 \text{ кД/м}^2$  око найбільш чутливе, і в цьому випадку найменше значення контрасту  $C$  складає  $1,4...2\%$ . Контраст зображення залежить від розміру об'єкту та нерізкості, що виникає при його просвічуванні, внаслідок неспівпадання розмірів самого дефекту та пучка іонізуючих частинок випромінювання.

В цьому випадку контраст світлотіньового зображення визначається як:

$$C_3 = \frac{L_v - L_D}{L_v} \left(1 + \frac{U}{\Delta b}\right), \quad (4.3)$$

Де  $U$  — нерізкість зображення, становить  $0,1...0,5$  мм;  $\Delta b$  — поперечний розмір дефекту.

Контраст скритого радіаційного зображення характеризується відношенням товщини дефекту  $\mu\Delta\delta$  до дозового фактора накопичення випромінювання, розсіяного об'єктом, що контролюється:

$$C_p = \frac{\mu\Delta\delta}{B} \quad (4.4)$$

Контрастність радіоскопічного перетворювача характеризує втрати контрасту світлотіньового зображення порівняно з контрастом радіаційного зображення:

$$\gamma_L = \frac{C_p}{C_3} \quad (4.5)$$

При використанні телевізійних систем пороговий контраст ока погіршується порівняно з безпосереднім візуальним спостереженням і визначається як:

$$C_n = 1 - \left(1 - \frac{\mu \Delta \delta}{B}\right)^{r_L}, \quad (4.6)$$

що дозволяє визначити відносну чутливість рентген-телевізійного радіоскопічного методу до виявлення внутрішніх дефектів зварних з'єднань.

Таблиця 4.1. Лінійний коефіцієнт ослаблення  $\mu$ ,  $\text{см}^{-1}$

Енергія квантів, <i>MeV</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>
0,5	0,24	0,580
1,0	0,165	0,467
1,25	0,15	0,424

Таблиця 4.2. Дозові фактори накопичення

Енергія квантів, <i>MeV</i>	Дозові фактори накопичення, <i>B</i>					
	для <i>Al</i> при $\mu\delta$			для <i>Fe</i> при $\mu\delta$		
	1	4	15	1	4	15
0,5	2,37	3,47	80,8	1,98	5,98	35,4
1,0	2,02	6,57	37,9	1,87	5,39	28,3
1,25	1,92	5,90	29,8	1,84	5,05	24,8

### 4.3.2 Розрахунок основних параметрів радіометричного контролю

Радіометричний спосіб контролю полягає у вимірюванні послаблення інтенсивності пучка випромінювання, що пройшов через об'єкт, що контролюється. Для вимірювання інтенсивності пучка випромінювання за об'єктом використовують сцинтиляційні лічильники, іонізаційні камери або лічильники Гейгера- Мюллера.

Проходження випромінювання в речовині може здійснюватись широким або вузьким пучком. Поняття "вузький" та "широкий" пучок визначається в залежності від співвідношення між прямим і розсіяним потоками випромінювання (рисунок 4.1).

Широкий пучок, не обмежений з боків, використовується в радіографічному контролі. Розсіяні фотони при цьому дещо погіршують різкість зображення. Вузький пучок використовується в радіометрії. Для отримання такого пучка за джерелом випромінювання або безпосередньо перед детектором встановлюється коліматор з одним або декількома отворами обмеженого перерізу.

Сигнал з виходу детектора при відсутності дефекту буде пропорційний інтенсивності пучка випромінювання, що надходить до нього:

$$J_1 = J_0 \cdot e^{-\mu l}. \quad (4.7)$$

Де  $J_0$  – вихідна інтенсивність джерела випромінювання;  
 $J_1$  – інтенсивність випромінювання за об'єктом;  
 $\mu$  – коефіцієнт лінійного ослаблення випромінювання;  
 $l$  – товщина об'єкта, що контролюється.

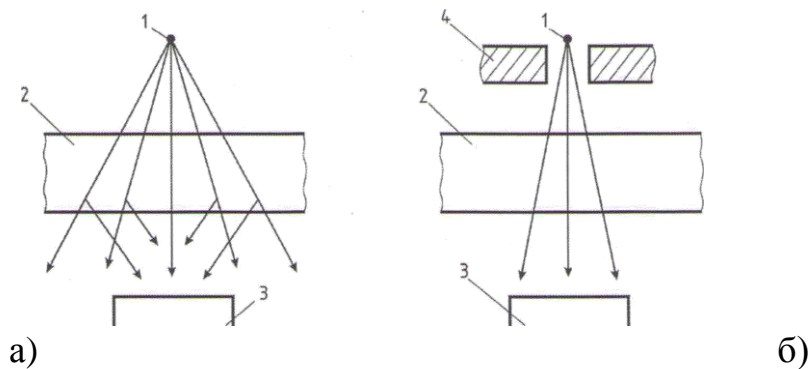
Якщо випромінювання виконують вузьким пучком, то при наявності дефекту (коефіцієнт лінійного ослаблення якого  $\mu_F$ ) розміром в напрямку випромінювання  $\Delta x$  значення потоку на виході з об'єкта визначається як

$$J_2 = J_0 \cdot e^{[\mu(l-\Delta x) + \mu_F \Delta x]} \quad (4.8)$$

Дефект буде зареєстрований, якщо існує різниця між  $\mu$  та  $\mu_F$ . Наявність дефекту підтверджує співвідношення:

$$K_0 = \frac{J_2}{J_1} = \exp \Delta x(\mu - \mu_F) \triangleright 1. \quad (4.9)$$

На інтенсивність пучка випромінювання і, відповідно, на вихідний сигнал детектора в радіометричному контролі впливають розміри отвору коліматора.



а – просвічування широким пучком;  
 б – просвічування вузьким пучком;  
 1 – джерело випромінювання;  
 2 – об'єкт, що контролюється;  
 3 – детектор;  
 4 – коліматор

Рисунок 4.1 – Схеми просвічування пучком променя

Сигнал від детектора в присутності коліматора при наявності дефекту буде перевищувати сигнал  $J_2$  без коліматора на величину

$$J_1 = J_2 \frac{S_1}{S_2} \mu \Delta x \quad (4.10)$$

Де  $S_1$ — площа проекції дефекту на площу детектора;  
 $S_2$ — площа перерізу отвору коліматора (площа детектора);  
 $\Delta x$ — середній розмір дефекту в напрямку просвічування.

Оскільки об'єм дефекту  $S \Delta x \approx \Delta V$ , то результуючий сигнал  $J_2'$  при наявності коліматора можна записати у вигляді:  $J_2'' = J_2 + J_2'$  або:

$$J_2' = J_2 \Delta V + J_2 = (1 + \frac{\mu}{S_2} \Delta V). \quad (4.11)$$

Порівнюючий пристрій в системі відокремлює сигнал, що дорівнює різниці сигналів без дефекту і в присутності дефекту:

$$\Delta J = J_2 - J_1 \quad (4.12)$$

### 4.3.3 Ультразвуковий контроль зварних з'єднань

Методи ультразвукової дефектоскопії засновані на використанні процесу поширення пружних коливань середовища з частотою 0,5...25 МГц в з'єднаннях, що контролюються.

Швидкість поширення хвиль визначається фізичними якостями середовища та частотою коливань (таблиця 4.3). В нескінченному об'ємі можуть виникати хвилі двох типів: поздовжні та поперечні.

При падінні ультразвукової хвилі на границю розділу середовищ під якимось кутом хвиля з першого середовища проходить без перетворень в друге тільки в тому випадку, якщо друге середовище аналогічне першому по акустичним якостям. В якому завгодно середовищі кут падіння  $\beta$  та кут відбивання  $\alpha$  хвилі пов'язані співвідношенням Снелліуса (рисунок 4.2):

$$\frac{\sin \alpha}{C_2} = \frac{\sin \beta}{C_1}, \quad (4.13)$$

де  $C_t$  - швидкість поширення поперечної хвилі в виробі, що контролюється;  
 $C_l$  – швидкість поширення поздовжньої хвилі в матеріалі шукача (таблиця 4.3).

Акустичний контакт шукача з виробом здійснюється, в основному, двома способами: контактним та імерсійним. Останній більш придатний для автоматизації процесу контролю. При імерсійному способі контролю

товщина шару контактуючого середовища зазвичай більша половини довжини хвилі пакету ультразвукових імпульсів, що випромінюються за відрізок часу  $\tau$ :

$$d_{жс} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{жс} \cdot \tau}{\cos \alpha_{жс}}, \quad (4.14)$$

де  $C_{жс}$ ,  $\alpha_{жс}$  – відповідно швидкість поширення та кут заломлення поздовжньої хвилі в контактуючому середовищі.

Мертва зона, тобто відстань від шукача, на якій виявлення дефектів не гарантовано, визначається мінімальною глибиною розташування дефекту, ехо-сигнали від якого не співпадають по часу з зондуючим імпульсом. Для прийому ехо-імпульсів від дефекту окремо від зондуючого імпульсу необхідно, щоб час  $\tau$ , що пройшов між моментом випромінювання зондуючого імпульсу та моментом повертання сигналу, був більше тривалості зондуючого імпульсу.

Значення величини мертвої зони:

– при роботі прямим шукачем:

$$M = \tau \frac{C_{l_2}}{2} \quad (4.15)$$

– при роботі нахиленим шукачем:

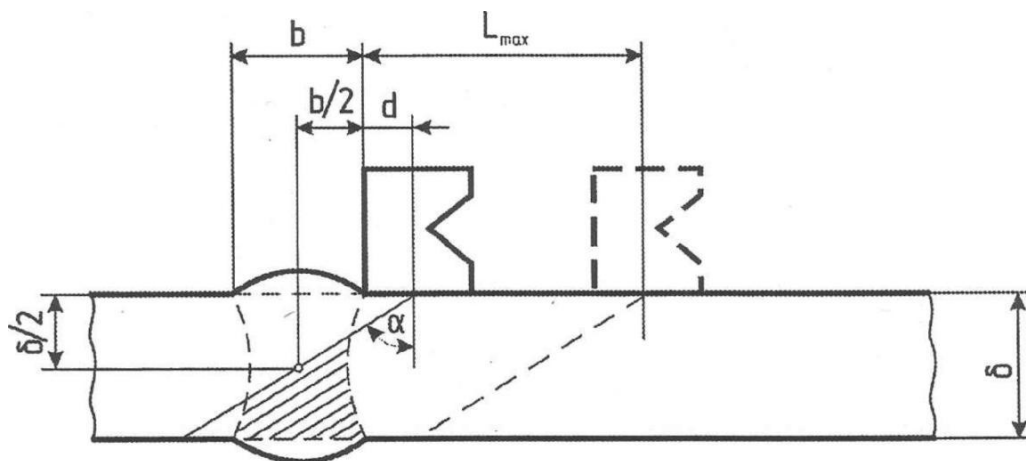
$$M = (\tau - 2t_n) \sin \alpha \cdot \frac{C_{l_2}}{2}, \quad (4.16)$$

де  $t_n$  – час проходження сигналу в призмі шукача, с;

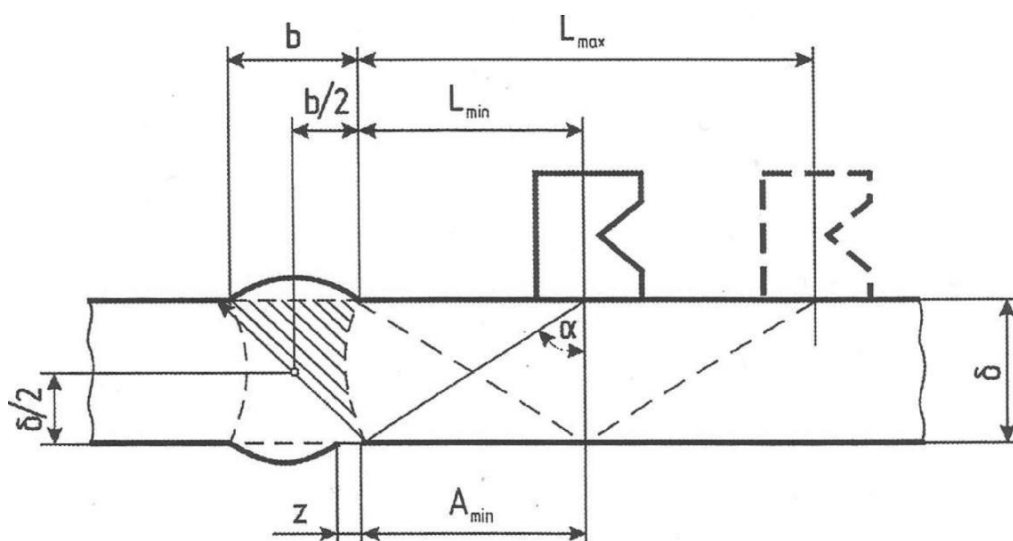
$C_{l_2}$  – швидкість поздовжньої хвилі, м/с.

Наявність ехо-імпульсів, що з'являються внаслідок багаторазових відбивань зондуючого імпульсу в призмі шукача робить неможливим реєстрацію ехо- імпульсів від дефектів, що знаходяться близько від поверхні виробу. При цьому утворюється мертва зона глибиною 3...10 мм.





a)



б)

а – прозвучування прямим променем;  
 б – прозвучування одноразово відбитим променем

Рисунок 4.2 – Схеми прозвучування стикових з'єднань з однієї сторони

При контролі стикових швів якої завгодно товщини кут вводу променя і спосіб прозвучування визначають собою зону переміщення шукача. При прозвучуванні шва прямим променем шукач переміщують від підсилення на відстань  $L_{\max} = \delta \operatorname{tg} \alpha$  (рисунок 4.2).

У випадку контролю шва однократно чи багаторазово відбитим променем шукач переміщують в зоні, яка обмежена мінімальною  $L_{\min}$  та максимальною  $L_{\max}$  відстанню від підсилення

$$L_{\min} = n\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha + Z = A_{\min} + Z, \quad (4.17)$$

$$L_{\max} = (n+1)\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.18)$$

де  $z \approx 5\text{мм}$  – необхідно для забезпечення направленою відбиття основної частини ультразвукової хвилі в зону шва, що контролюється;  $n$  – кількість відбиттів ультразвукового променя в металі.

Значення кута  $\alpha$  знаходять із співвідношень:

– при прозвучуванні прямим променем (рисунок 4.2):

$$\operatorname{tg}\alpha \geq \frac{(b+2d)}{\delta}; \quad (4.19)$$

– при прозвучуванні відбитим променем:

$$\operatorname{tg}\alpha \geq \frac{(b+2z)}{\delta} \quad (4.20)$$

Для контролю швів товщиною 30...60 мм, прямим променем використовують типовий шукач з кутом вводу променя  $\alpha = 40^\circ$  а однократно відбитим променем - шукач з кутом вводу  $\alpha = 50^\circ$ . При контролі швів меншої товщини прозвучування проводять прямим та відбитим променем за допомогою шукача з кутом вводу  $\alpha = 65^\circ$ .

Таблиця 4.3 - Швидкість поширення ультразвукових хвиль в різних середовищах

Середовище	Густина, г/см <sup>3</sup>	Швидкість хвилі, м/с	
		поздовжньої $C_l$	поперечної $C_t$
Дюралюміній	2,70	6260	3080
Мідь	8,90	4700	2260
Сталь	7,80	5900	3260
Плексиглас	1,18	2670	1121
Масло трансформаторне	0,89	1425	-
Гліцерин	1,26	1920	

#### 4.3.4 Магнітні методи контролю

Магнітні методи контролю засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що з'являються над дефектами. Основні методи магнітного контролю: магнітопорошковий, магнітографічний та електромагнітний.

Для намагнічення деталей використовуються магнітні поля, що з'являються в просторі навколо провідника зі струмом, при протіканні струму безпосередньо скрізь деталі, що контролюються; між полюсами постійного магніту чи електромагніту або соленоїда, в обмотках якого тече електричний струм. Кожний з варіантів намагнічення дозволяє виявляти

дефекти, що розміщуються під кутом до направлення силових магнітних ліній.

Поширення електромагнітних коливань в суцільних середовищах супроводжується затуханням, тобто зниженням амплітуди електричної та магнітної напруженості по мірі віддалення від джерела коливань. Це затухання підкорюється експоненціальному закону:

$$H_x = H_o \cdot e^{-kx}, \quad (4.21)$$

$$E_x = E_o \cdot e^{-kx}, \quad (4.22)$$

де  $H_x$  та  $E_x$  – відповідно амплітудні значення напруженості магнітного та

електричного полів на деякій відстані  $x$  від початку відліку, що характеризується значеннями  $H_o, E_o$ ;

$k$  – коефіцієнт затухання.

Затухання електромагнітних хвиль в провідниках залежить від частоти:

$$k = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}, \quad (4.23)$$

Де  $\mu$  – магнітна проникність зразка;

$\sigma$  – питома електропровідність металу,  $(0.5 \dots 6) \cdot 10^7$  См/м  $(5 \dots 60$  м/(Ом мм)).

Повна проникність феромагнетика визначається відношенням величини індукції  $B$  до відповідного значення напруженості магнітного поля  $H$  в даній точці кривої індукції (рисунок 3.7):

$$\mu = \frac{B}{H}. \quad (4.24)$$

Затухання електромагнітних хвиль зашкоджує виявленню дефектів, що розміщуються глибоко від поверхні деталі.

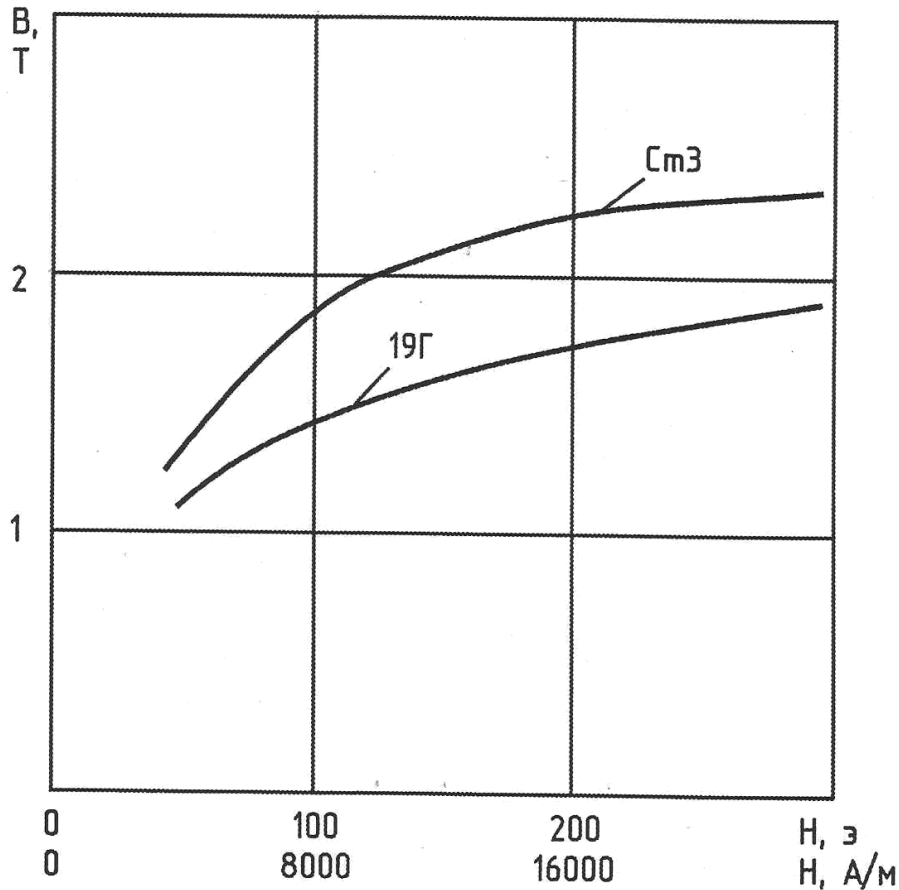


Рисунок 4.3 – Криві намагнічення різних марок сталі

Розглянемо характер зміни однорідного магнітного поля всередині безмежного феромагнетика з дефектом у вигляді тонкого плоского паралелепіпеду, розміщеного перпендикулярно до вектора  $H$  (рисунок 4.4).

Покладемо, що проникність матеріалу дорівнює  $\mu_1$  а полості дефекту -  $\mu_2$ . Тоді, у відповідності з умовами на границі розділу двох середовищ нормальна компонента вектору магнітної індукції зберігає свою величину:

$$B_{n_1} = B_{n_2} \quad (4.25)$$

$$\mu_1 H_1 = \mu_2 H_2 \quad (4.26)$$

звідки

$$H_2 = \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot H_1 \quad (4.27)$$

Якщо  $\mu_1 > \mu_2$ , то поле всередині полості  $H_2$  більше, ніж поле всередині суцільного металу  $H_1$ . Воно є вторинним полем, викликаним первинним від зовнішнього джерела і має локальний характер.

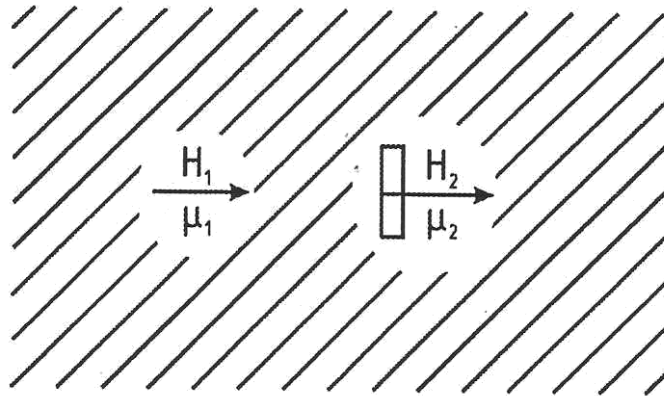


Рисунок 4.4 – Схема визначення магнітного поля дефекту

Для виявлення більшості поверхневих та підповерхневих дефектів на деталях із конструкційних сталей оптимальна напруженість магнітного поля на поверхні виробу може складати 100...200 э (8000...16000 А/м). Ця умова дозволяє визначити режими намагнічення деталей, що забезпечують виявлення дефектів з врахуванням їх власного магнітного поля.

Струм, необхідний для циркулярного намагнічення деталей циліндричної форми, розраховується за формулою:

$$J = H \cdot 2\pi r, \quad (4.28)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля, А/м;  
 $r$  – радіус деталі, м.

Струм, необхідний для циркулярного намагнічення пластин, визначається згідно формули:

$$J = 2H \cdot b, \quad (4.29)$$

де  $b$  – товщина пластини, м.

Поздовжнє намагнічення здійснюється за допомогою соленоїдів, що розміщуються поверх зварних з'єднань, які контролюються. Соленоїд може представляти собою кілька витків зварювального кабеля.

Напруженість магнітного поля по осі соленоїда визначається за формулою:

$$H = \frac{1,25n \cdot J}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (4.30)$$

де  $L, D$  – відповідно довжина та середній діаметр соленоїда, см (рисунок 4.5);

$n$  – кількість витків;

$J$  – сила струму, А.

Звідси, знаючи необхідну напруженість магнітного поля на поверхні деталей та характеристики соленоїда, можна визначити потрібну величину струму.

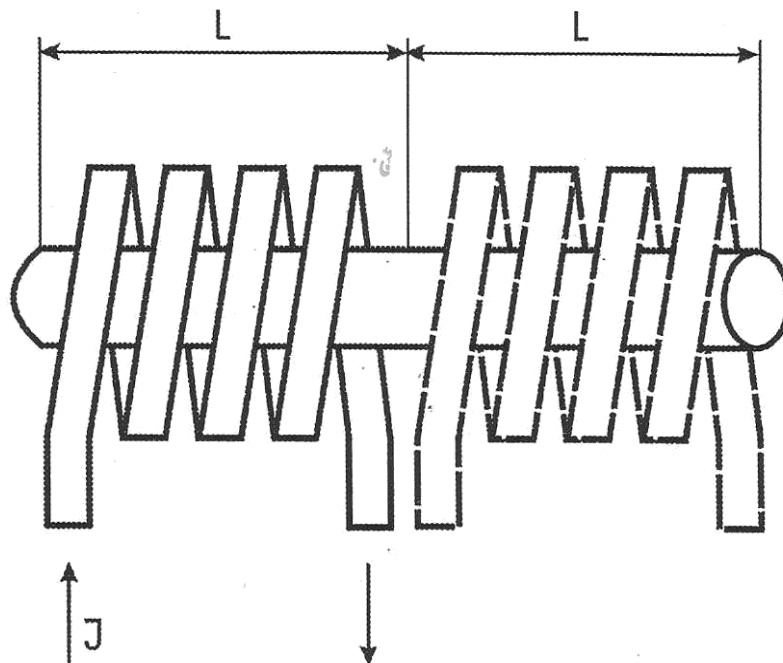
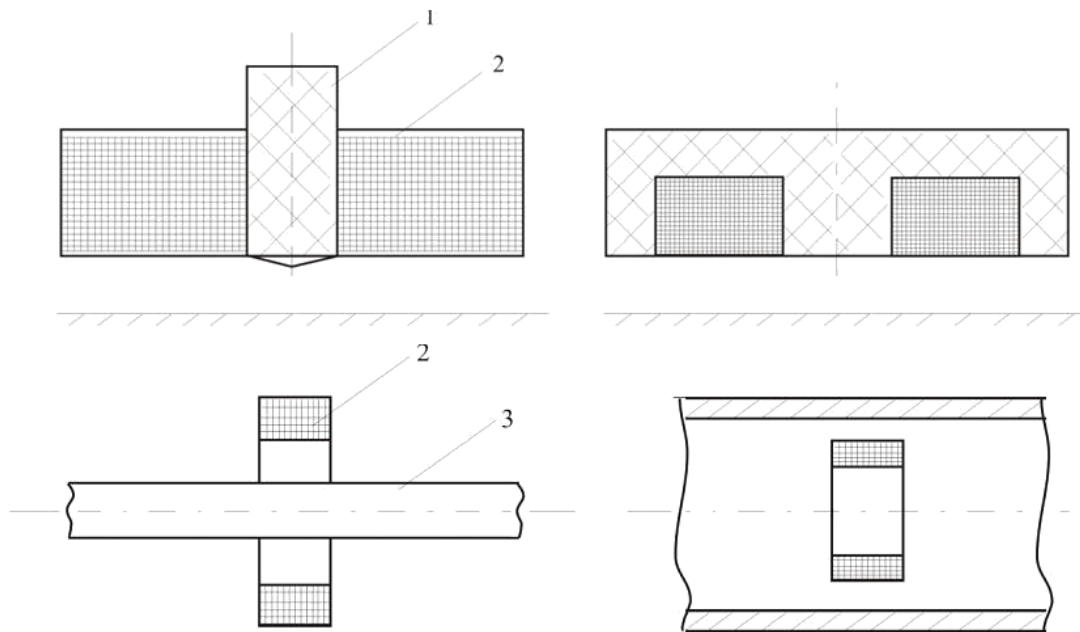


Рисунок 4.5 – Схема розміщення соленоїда на деталі (довжина деталі, яка контролюється, дорівнює довжині соленоїда)

#### 4.3.5 Електромагнітний метод контролю

Електромагнітний метод складається в реєстрації зміни вихрових струмів, що наводяться джерелом в об'єкті контролю. Вплив поля вихрових струмів на вимірювальну котушку еквівалентний зміні індуктивного та повного опорів датчика-котушки, що приводить до зміни струму в електричному колі котушки. Можливості і область застосування електромагнітних методів контролю обумовлені факторами, що впливають на взаємодію поля вихрових струмів із полем датчика. Так порушення суцільності контрольованих виробів є перешкодою для вихрових струмів і їх дія аналогічна збільшенню опору поверхневого шару металу, що призводить до послаблення вихрових струмів і виникнення відповідно сигналу в датчику. Метод вихрових струмів застосовують для виявлення поверхневих або під поверхневих тріщин та не проварів глибиною більше 0,1 мм. В залежності від поставленої задачі (необхідності виявлення дефектів певних розмірів) застосовують накладні або прохідні датчики (рисунок 6), котушки яких живляться змінним струмом широкого спектру частот – від 5 Гц до 250 МГц.



1 – феритовий стержень (осердя); 2 – котушка; 3 – об’єкт контролю.

Рисунок 4.6 – Схеми електромагнітних датчиків

Вихрові струми протікають в поверхневих шарах металів. Глибина проникнення вихрових струмів залежить від частоти електромагнітних коливань  $f$ , електричної провідності контрольованого матеріалу  $\sigma$  і визначається як

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{f\sigma\mu_0 \cdot \mu}}, \quad (4.31)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м – магнітна проникність вакууму;  $\sigma$  - електропровідність металу при 239 К, яка дорівнює для алюмінію 36,0 МСм/м, для заліза 25,0; для сталі 5,4; для сплавів титану 0,65;  $\mu$  – відносна магнітна проникність матеріалу.

Конструкція та розміри котушок датчиків визначаються умовами іспитів, розмірами і формою контрольованого об’єкта, розмірами припустимих дефектів, продуктивністю контрольних операцій.

Накладні датчики з котушками, намотаними на феромагнітних осердях (рисунок 4.6 а, б), використовують в дефектоскопах, призначених для ручного контролю. Прохідні датчики (рисунок 4.6 в, г) використовують для виявлення поздовжньо розташованих тріщин в тілах циліндричної форми.

Індуктивність багат шарових котушок визначають за емпіричною формулою:

$$L_a = \frac{80D^2 \cdot n}{3D + 9l + 10\left(\frac{D+d}{2}\right)}, \text{ мкГн} \quad (4.32)$$

де  $D, d, l$  – основні розміри котушки у сантиметрах (див. рисунок 4.7);  $n$  – кількість витків обмотки котушки.

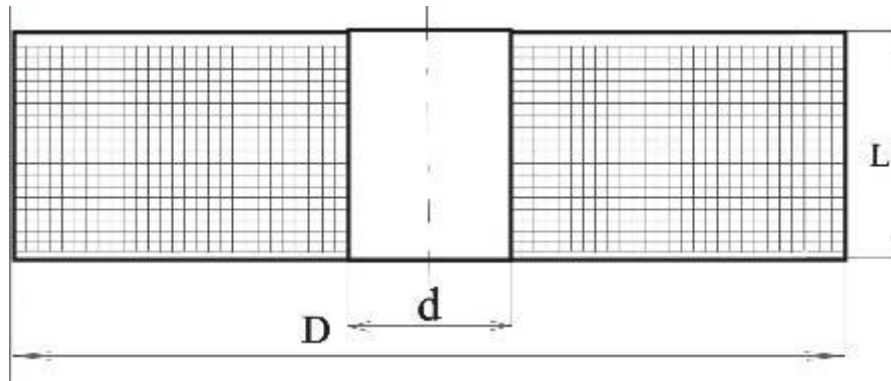


Рисунок 4.7 – Основні габаритні розміри котушок датчиків.

Таблиця 4.4 – Основні параметри котушок накладних електромагнітних датчиків

Номер котушок	Зовнішній діаметр $D$ , мм	Внутрішній діаметр $d$ , мм	Висота $l$ , мм	Кількість витків, $n$	Діаметр дроту, мм	Активний опір $R$ , Ом
1	25	3	5	1600	0,2	47
2	20	3	5	1600	0,15	65
3	20	3	5	1600	0,11	90
4	15	3	5	1600	0,09	105
5	12	3	5	1600	0,07	120

При наявності магнітодіелектричного (феритового) осердя індуктивність котушки зростає і складає:

$$L_{\phi} = L_o \cdot \mu_c, \quad (4.33)$$

де  $\mu_c$  – магнітна проникність фериту ( $\mu_c = 1,3 \dots 1,6$ ).

Накладну котушку, що взаємодіє з металом, можна представити як таку, що складається з двох частин: нижньої частини, що повністю зчеплена з металом, і верхньої частини – баласта, що погіршує якість котушки. Феритовий стержень «наближає» цю верхню частину котушки, спонукаючи її вносити свою долю в процес взаємодії котушки з металом. Коефіцієнт розсіювання (втрат) магнітного потоку для котушок із феромагнітним осердям визначають за формулою:

$$\gamma = \frac{l / \mu_c + l + \frac{KD}{2}}{l / \mu_c + l + D}. \quad (4.34)$$



В формулі (4.35) коефіцієнт  $K'$  враховує зменшення розсіювання внаслідок наявності фериту в об'ємі контролюваного металу і для реальних котушок чисельно дорівнює величині

$$k' = 1/\mu_c \quad (4.35)$$

З урахуванням коефіцієнту розсіювання індуктивність діючої (активної) частини обмотки котушки буде складати

$$L_o = L_\phi(1-\gamma) \quad (4.36)$$

Наявність дефектів у вигляді несучільностей в поверхневих шарах контрольованих металів призводить до збільшення товщини повітряного прошарку між датчиком та нижньою границею дефекту (рисунок 4.8), що впливає на індуктивність діючої частини обмотки

$$L_o' = \frac{L_o}{1+x/\delta}, \quad (4.37)$$

де  $\delta$  – відстань між датчиком і поверхнею контролюваного об'єкту;  
 $x$  – глибина поверхневого дефекту.

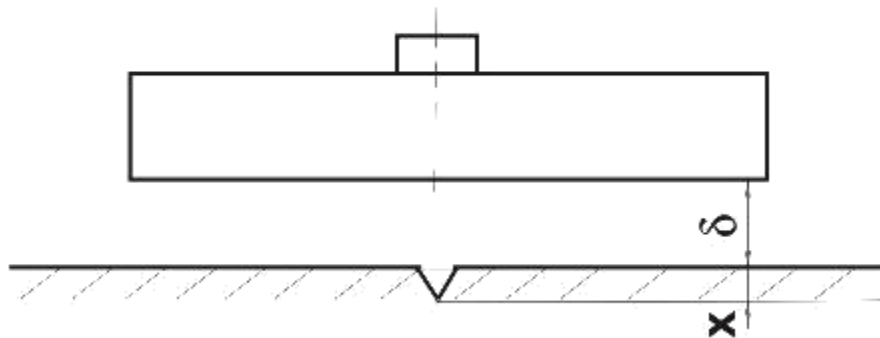


Рисунок 4.8 – Схема контролю накладним датчиком

Відповідно при наявності дефекту буде змінюватись індуктивний опір діючої частини обмотки

$$\Delta Z = Z_o - Z_o' \quad (4.38)$$

Повний опір обмотки складається з активного та індуктивного опорів

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = \sqrt{(2\pi fL)^2 + R^2} \quad (4.39)$$

При частоті електромагнітного поля  $f$  вище  $10^4$  Гц активний опір стає суттєво меншим за індуктивний і може не прийматись до уваги.

Поверхневий дефект надійно виявляється електромагнітним методом, якщо виконується співвідношення

$$\frac{\Delta Z}{Z} \cdot 100 \geq 1,8 \dots 2,5\% \quad (4.40)$$

що характеризує чутливість методу, яка визначається зміною загального опору обмотки із феритовим осердям, і відповідно, зміною струму в її колі при наяву дефекту.

## 5 Завдання на розрахунково-графічну роботу

Таблиця 5.1 – Розрахунок чутливості радіоскопічного методу контролю

Вихідні параметри	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Матеріал виробу	Сталь (Fe)	Сталь (Fe)	Сталь (Fe)	Al	Al	Al
Товщина зварного з'єднання, $\delta$ , см	1	2	3	4	5	6
Розмір дефекту, $\Delta\delta$ , см	0,2	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2
Енергія випромінювання, $E$ , МеВ	0,5	1,0	1,25	0,5	1,0	1,25

Таблиця 5.2 - Розрахунок чутливості радіометричного методу контролю

Вихідні параметри	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Матеріал виробу	Сталь (Fe)	Сталь (Fe)	Сталь (Fe)	Al	Al	Al
Товщина зварного з'єднання, $l$ , см	1,0	2,5	2	3	1	2
Розмір дефекту, $\Delta x$ , см	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3
Діаметр отвору коліматору, $D_K$ , см	0,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5
Енергія випромінювання, $E$ , МеВ	0,5	1,25	1,0	1,0	0,5	1,25

Таблиця 5.3. – Визначити схему прозвучування, кут нахилу шукача та зону його переміщення

Вихідні параметри	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Матеріал виробу	Сталь (Fe)	Al	Al	Сталь (Fe)	Сталь (Fe)	Al
Товщина зварного з'єднання, $\delta$ , см	30	20	60	40	12	25
Тип зварного з'єднання	C23	C21	C23	C23	C21	C21
Параметр нахиленого шукача, $d$ , мм	14	16	22	18	14	16
Матеріал призми шукача	Органічне скло					

Таблиця 5.4 – Розрахунок чутливості магнітних методів контролю

Вихідні параметри	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Матеріал виробу	Ст.3	Ст.3	Ст.19Г	Ст.3	Ст.19Г	Ст.19Г
Вихідна напруженість магнітного поля у виробі, $H$ , А/м	$10^4$	$8 \cdot 10^3$	$16 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$16 \cdot 10^3$
Частота намагнічення, $f$ , Гц	50	100	50	50	100	50
Товщина металу, $X$ , м	0,009	0,005	0,013	0,011	0,007	0,009
Магнітна проникність дефекту, $\mu_2$ , Гн/м	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$					

Таблиця 5.5 – Розрахунок чутливості електромагнітного методу контролю

Вихідні параметри	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Матеріал виробу	Fe	Сталь	Ti	Cu	Сталь	Fe
Магнітна проникність дефекту, $\mu$ , Гн/м	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Розмір дефекту, X, см	0,1	0,2	0,05	0,3	0,15	0,1
Відстань між датчиком та виробом, $\delta$ , см	0,5	0,3	0,8	1,0	0,5	0,3
Номер котушки датчика( табл. 3.4)	1	3	5	2	4	3

## 6 Вибір варіанту завдання

Таблиця 6.1 – Вибір варіантів завдання

Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Варіант	4.1.1	4.2.1	4.3.1	4.4.1	4.5.1	4.1.2	4.2.2	4.3.2	4.4.2	4.5.2

Продовження таблиці 6.1

Номер	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Варіант	4.1.3	4.2.3	4.3.3	4.4.3	4.5.3	4.1.4	4.2.4	4.3.4	4.4.4	4.5.4

Продовження таблиці 6.1

Номер	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Варіант	4.1.5	4.2.5	4.3.5	4.4.5	4.5.5	4.1.6	4.2.6	4.3.6	4.4.6	4.5.6

Примітка: варіант завдання обирається згідно порядкового номеру у списку групи.

## **Рекомендована навчально-методична література**

### **Навчальна література**

1. Контроль качества сварки./ Под ред. В.Н.Волченко -М.: Высшая школа, 1975.- 442 с.
2. Неразрушающий контроль материалов. Справочник./Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976.- 571 с.
3. Троицкий В.А., Радько В.П. Дефекты сварных соединений и средства их обнаружения. – К.: Вища школа, 1983.- 242 с.

### **Допоміжна література**

4. Троицкий В.А., Радько В.П., Демидко В.Г. Неразрушающий контроль качества сварных соединений. – К.: Техніка, 1986. – 158с.
5. Радиационный неразрушающий контроль сварных соединений./ Под ред. Адаменко В.К. – К.: Техника, 1961.- 164 с.
6. Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г. Электромагнитная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1980.- 203 с.
7. Алешин Н.П. Методы акустического контроля металлов. – М.: Машиностроение, 1989. – 442 с.