

620.179.14

Ш35

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Швець Світлана Миколаївна

УДК 620.179.14

**ПОЄДНАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО І МАГНІТНОГО МЕТОДІВ
ПРИ ФЕРОЗОНДОВІЙ ДЕФЕКТОСКОПІЇ
ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ**

**05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ - 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Яковенко Валерій Володимирович,

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,
завідувач кафедри електротехніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий
співробітник

Джала Роман Михайлович,

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії
наук України, провідний науковий співробітник відділу відбору
і обробки стохастичних сигналів

кандидат технічних наук

Молодецький Ігор Анатолійович,

Науково-виробнича фірма ТзОВ "Зонд",

заступник директора з науково-технічного розвитку

Провідна установа:

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона

Національної академії наук України



Захист відбудеться "20" квітня 2007 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні

спеці
техні
76019

національному

націо
Фран

ранківського
, м. Івано-

Вчени

М. Драгчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Кількість виявлених дефектів у ряді феромагнітних виробів (наприклад, дефектів зварного шва, великогабаритних зубчастих коліс тощо) ферозондовим методом підвищується при використанні для намагнічування деталі не традиційного постійного, а змінного електромагнітного поля. Це пояснюється тим, що при намагнічуванні змінним полем через зменшення глибини проникнення поля у феромагнетик, амплітуда сигналів від дефектів різко зростає, а сигнали, які обумовлені магнітною неоднорідністю матеріалу деталі, що контролюється, зменшуються. Крім того, зменшується вплив на достовірність контролю інфранизьких і постійних полів, оскільки створюється можливість їх фільтрації. Але при ферозондовому контролі дефектів в прикладеному електромагнітному полі відсутня можливість виявляти підповерхневі дефекти. Використовувати для цієї мети окремий ферозонд, що працює в постійному магнітному полі, недоцільно через низьку продуктивність, значну трудомісткість і невелику інформаційну надійність. В той же час існують магнітні матеріали, засоби вимірювальної техніки і методи обробки сигналів, що дозволяють поєднати методи ферозондового контролю в постійному і змінному магнітних полях в одному приладі неруйнівного контролю. Таке поєднання дасть вираш в надійності контролю дефектів без зменшення продуктивності процесу неруйнівного контролю. Можливість реєстрації полів не котушками, а ферозондами значно збільшує чутливість контролю, що при збереженні переваг електромагнітного методу підвищує достовірність контролю і зменшуються розміри дефектів, що виявляються.

Локалізацію ділянки контролю шляхом зменшення розмірів осердь ферозондів можливо здійснити до певних меж, тому що при цьому зменшується чутливість ферозондів і ускладнюється технологія їх виготовлення. Тому доцільно локалізацію ділянки контролю здійснювати шляхом застосування магнітотуляційних головок з повітряним зазором. Магнітотуляційна головка для магнітної дефектоскопії не застосовувалась, тому потрібні теоретичні дослідження цього вимірювального перетворювача.

Незначне розповсюдження цього перспективного методу контролю було обумовлено недостатньою досконалістю апаратури намагнічування і засобів обробки сигналів ферозондів, що працюють в режимі вимірювання електромагнітних і магнітних полів, а також відсутністю розробок теоретичних засад цього методу, які б стали основою для розрахунку і проектування технічних засобів.

Вирішення цієї проблеми дозволить здійснити ефективний контроль електрозварних труб діаметром до 1420 мм на наявність дефектів, що утворюються після зварювання. Оперативний контроль якості зварного шва дозволяє не тільки констатувати наявність в ньому дефектів, але й керувати технологічним процесом виробництва труб. Зростає потреба промисловості в ефективних приладах контролю дефектів великогабаритних деталей, а також в методах їх використання. Враховуючи вищевказане, задача поєднання електромагнітного і магнітного методів при ферозондовій дефектоскопії є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до Концепції Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11 червня 2003 року №351 та Постановою Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 2004 року №1331 „Про затвердження Державної науково-технічної програми «Ресурс» і в рамках тем держбюджетних НДР Східноукраїнського національного університету імені

НТБ
ІФНТУНГ



Володимира Даля ДН-05-04 (№ ДР 0104U000102) наказ МОН України №746 від 07.11.2003 р. (автором здійснено: теоретичні дослідження матричних накладних вихрових перетворювачів та проведено математичне та фізичне моделювання їх роботи), КДН-12-04 (№ ДР 0104U010217) (автором здійснено: розробка математичної моделі поля розсіяння дефекту та створення на її основі чисельного методу розрахунку цих полів, розробка методики вибору оптимального значення поля підмагнічування та порогу чутливості ферозонду, побудова математичної моделі формування вихідного сигналу); а також у рамках госпдоговірних робіт.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення достовірності ферозондового контролю дефектів великогабаритних деталей у сукупному постійному і змінному прикладених магнітних полях на основі науково обгрунтованого вибору параметрів базових елементів магнітної системи.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Провести аналіз сучасних методів ферозондового контролю великогабаритних деталей в прикладеному полі (провести аналіз сучасних принципів побудови технічних засобів ферозондового контролю великогабаритних деталей в прикладеному змінному магнітному полі). Розробити нові і адаптувати відомі математичні моделі магнітних і електромагнітних полів дефектів і пристроїв намагнічування, а також алгоритми їх реалізації.

2. Провести теоретичні дослідження електромагнітних полів дефектів при контролі в електромагнітному полі, яке створюється П-подібним пристроєм намагнічування.

3. Розробити конструкцію локального вимірювального перетворювача, який враховує особливості контролю дефектів при поєднанні постійного і змінного полів.

4. Дослідити режим роботи ферозонда другої гармоніки в змінних синусоїдальних полях різної настоти.

5. Розробити і дослідити методи обробки сигналів ферозондів при комбінованому режимі контролю.

6. Провести теоретичні дослідження магнітотуляційного перетворювача з повітряним зазором (магнітотуляційної головки) як перспективного елемента магнітної і електромагнітної дефектоскопії.

7. Створити ферозондовий дефектоскоп, що працює в комбінованому режимі, який має збільшену достовірність виявлення дефектів великогабаритних деталей.

Об'єкт дослідження – виявлення дефектів великогабаритних феромагнітних деталей ферозондовим методом в прикладених постійних і змінних магнітних полях.

Предмет дослідження – ферозондова дефектоскопія при одночасній дії постійних і змінних зондуючих магнітних полів.

Методи дослідження: моделювання змінних полів на основі теорії електромагнітного поля; моделювання полів дефектів і пристроїв зондування, використання комп'ютерних експериментів з метою визначення інформаційних параметрів полів дефектів; числові методи розв'язку інтегральних рівнянь; експериментальні дослідження комбінованого ферозондового неруйнівного контролю.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Запропоновано метод поєднання електромагнітних і магнітних полів збудження при фіксації дефектів ферозондами і локальними магніточутливими елементами, який дає можливість збільшити чутливість вимірювальних перетворювачів і знизити їх поріг

чутливості, а також локалізувати зондуєче поле, чим забезпечується висока достовірність контролю.

2. Вперше шляхом математичного моделювання визначені частотні характеристики ферозондів другої гармоніки, що дозволяє теоретично обґрунтовано вибирати їх параметри при розробці приладів ферозондового контролю, які працюють в режимі вимірювання змінного електромагнітного поля.

3. Визначена функція перетворення магнітотуляційної головки при контролі поверхневих дефектів, що дає можливість проектувати і використовувати в магнітній і електромагнітній дефектоскопії цей перспективний вимірювальний перетворювач.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблені програмні комплекси, які дозволяють проектувати ферозондові дефектоскопи, перетворювачі яких працюють у постійному і змінному магнітних полях. Такі дефектоскопи призначені для контролю великогабаритних феромагнітних деталей транспортного і енергетичного машинобудування і відрізняються високою достовірністю виявлення дефектів при негладкій поверхні контрольованої деталі.

2. Створені і апробовані програмні комплекси, які дозволяють моделювати процеси неруйнівного електромагнітного і магнітного контролю великогабаритних феромагнітних деталей в електромагнітному і магнітному полях, при ферозондовому контролі дефектів, які дають можливість проектувати прилади і пристрої комбінованого ферозондового методу.

3. Теоретичні результати дисертаційної роботи можна використовувати у навчальному процесі, наприклад, на кафедрі приладів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля при викладанні дисциплін «Електричні та електромагнітні види контролю», «Прилади магнітного контролю», «Засоби та прилади електромагнітного контролю».

4. Результати роботи впроваджені і використовуються у ВАТ «Дніпропетровський трубний завод» (м. Дніпропетровськ), ТОВ «Крестіл-Україна» (м. Київ) у вигляді електромагнітного дефектоскопа для безперервного контролю електрозварних труб, у науково-дослідній лабораторії «Технічної електродинаміки» СХУ ім. В.Далія (м. Луганськ).

Особистий внесок здобувача. Автором запропонована концепція проведення магнітного контролю одночасно в постійному і змінному магнітних полях, розроблено метод контролю зварних швів при локальному намагнічуванні, розвинена теорія роботи ферозондових перетворювачів в змінних магнітних полях, обґрунтовано використання локальних магніточутливих елементів при дефектоскопії зварних швів, розроблений універсальний магнітовимірювальний канал, що підтверджено патентом України.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертації доповідалися та обговорювалися на Третій Міжнародній конференції «Водородная обработка материалов» (ВОМ-2001) (Донецьк, 2001 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (Львів, 2002 р.); Другій і П'ятій Промислових науково-технічних конференціях «Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціалу в сучасних умовах» (Київ, 2002 р., 2005 р.); XVI російській науково-технічній конференції «Неразрушающий контроль и диагностика» (Санкт-Петербург, 2002 р.); Другій і Четвертій науково-технічних конференціях «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2003 р., 2005 р.); 4-й Національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль та технічна

діагностика” (НКТД–2003) (Київ, 2003 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції „Університет і регіон” (Луганськ, 2002 р.); XVII Російській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Неразрушающий контроль и диагностика» (Єкатеринбург, Росія, 2005 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 27 наукових працях, з них 1 патент, 15 статей (з них 3 – одноособові) у фахових журналах і збірках і 11 в матеріалах науково-технічних конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків і містить 214 сторінок, 63 рисунка, 2 таблиці, 5 додатків, список використаних джерел із 101 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність виконаних досліджень, сформульована їх мета і задачі, викладена наукова новизна і практичні значення одержаних результатів.

Перший розділ присвячений класифікації і характеристикам дефектів великогабаритних деталей, обумовлених зварними з'єднаннями. Встановлено, що дефекти швів виникають при недотриманні вимог технології при автоматичному зварюванні, зокрема, при порушенні швидкості подання дроту. Дефекти зварних швів також виникають при неправильному режимі зварювання і відхиленні швидкості зварювання від рекомендованої. Оперативний контроль за дефектами у зварних швах дозволяє не тільки констатувати наявність дефектів у виробі, але й керувати технологічним процесом.

Проведено аналіз можливих методів контролю зварного шва великогабаритних деталей, на основі якого вибрано електромагнітний і магнітний методи контролю, які мають високу продуктивність і можливість автоматизації процесу контролю. Проте електромагнітний контроль у «чистому вигляді» при контролі зварних швів є малоефективним, оскільки на результати контролю впливає змінна за довжиною шва магнітна проникність матеріалу і також зміна питомої провідності матеріалу об'єкту.

З іншого боку, контроль в прикладеному або залишковому полі ускладнюється тим, що контролювана поверхня має нерівності, які генерують заваду. Прикладене змінне поле створює ефект поверхневого обтікання дефекта, завдяки чому сигнал дефекта перевищує заваду.

Використання ферозондів як вимірювальних перетворювачів для виявлення дефектів в прикладеному змінному полі у порівнянні з трансформаторними перетворювачами знижує поріг чутливості дефектоскопу і збільшує коефіцієнт перетворення його електромагнітної системи.

Аналіз літературних джерел показує, що ефективним методом контролю є ферозондовий в прикладеному змінному магнітному полі. Важливим питанням досліджень є робота ферозондів при вимірюванні синусоїдального магнітного поля, визначення смуги пропускання сигналу і функції перетворення. Проведено аналіз існуючих ферозондових дефектоскопів і їхніх потенційних можливостей для контролю зварних швів труб при їхньому виробництві.

Комбінований метод намагнічування об'єкта постійним і змінним магнітним полем відчутно підвищує достовірність контролю зварних швів великогабаритних деталей, проте

широкому використанню цього методу перешкоджають недостатні теоретичні дослідження основних його принципів. В теперішній час існують достатньо ефективні методи чисельного розрахунку магнітних і електромагнітних полів, які доцільно використати для аналізу полів дефектів в прикладеному постійному і змінному полях.

Розглянуто методи розрахунку полів дефектів з позиції їх використання для аналізу квазізмінних полів дефектів. В цій області значні результати одержані Зацепіним І.М., Мужичьким В.Ф., Ферстером Ф., Федосенко Ю.К., Щербініним В.Є., Гальченко В.Я. і ін. Проведений аналіз існуючих методів розрахунку електромагнітних полів довів, що найбільш перспективними з точки зору точності і трудомісткості є метод, заснований на чисельному розв'язанні інтегральних рівнянь. Цей метод можна застосувати як для розрахунку змінних магнітних полів, так і для розрахунку постійних в нелінійних феромагнітних середовищах. Для застосування цього методу необхідна його адаптація до особливостей задач, що треба розв'язати, а також розробка програмних комплексів для його реалізації. Програмні комплекси для розрахунку магнітних і електромагнітних полів розсіювання дефектів існують, але відсутні спеціалізовані програмні засоби моделювання процесів неруйнівного магнітного і електромагнітного контролю феромагнітних виробів з дефектами кінцевих розмірів, що цілковитою мірою враховують особливості процесів контролю.

Сформульовані завдання теоретичних досліджень, які передбачають розробку математичних моделей магнітних і електромагнітних полів в магнітопроводах магніточувливих пристроїв і у феромагнітному середовищі та розробку алгоритмів чисельного розв'язку інтегральних рівнянь.

У другому розділі викладено результати розробки математичних моделей електромагнітних полів розсіювання дефектів. Основою побудови математичних моделей є метод граничних інтегральних рівнянь. Шляхом введення одного векторного і одного скалярного фіктивного джерела: $\vec{i} = \vec{n} \times \vec{H}$ - вектор щільності простого шару електричного поля; $\hat{\sigma} = \vec{n} \cdot \vec{H}$ - щільність простого шару магнітних зарядів, - отримана система рівнянь Фредгольма 2-го роду:

$$\begin{cases} \frac{\vec{i}(Q)}{2} + \vec{n} \times \text{rot} \int_S \vec{i}(P) \dot{g}_H dS_P + \vec{n} \times \text{grad} \int_S \frac{\hat{\sigma}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P = \vec{n} \times \vec{H}_{CT}(Q) \\ \frac{\hat{\sigma}(Q)}{2} + \mu_r \vec{n} \cdot \text{rot} \int_S \vec{i}(P) \dot{g}_H dS_P + \vec{n} \cdot \text{grad} \int_S \frac{\hat{\sigma}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P = \vec{n} \cdot \vec{H}_{CT}(Q) \end{cases} \quad (1)$$

де Q - точка спостереження; P - точка джерела, що належить межі розділу середовищ;

$\dot{g}_H = \frac{e^{-jkr_{QP}}}{4\pi r_{QP}}$ - фундаментальна функція Гріна, що визначає поле точкового джерела; r_{QP} -

відстань між точкою спостереження Q і точкою джерела P ; \vec{H}_{CT} - вектор напруженості магнітного поля, утвореного стороннім (зондуючим) джерелом.

Розглянуті математичні моделі для розрахунку вектора напруженості магнітного поля \vec{H}_{CT} . Як джерела зондуючого змінного поля пропонується використати системи, що

складаються з вісесиметричних контурів і контурів прямокутної форми. Наведені формули для розрахунку \vec{H}_{CT} .

Після розв'язку системи (1) визначається вектор напруженості магнітного поля поза провідним об'єктом за формулою:

$$\vec{H}(Q) = -\frac{1}{4\pi} \text{grad}_s \left\{ \frac{\dot{\sigma}(P)}{r_{QP}} \right\} dS_p + \vec{H}_{CT},$$

а всередині об'єкта згідно залежності

$$\vec{H}(Q) = \int_s \vec{i}(P) \cdot \vec{g}_H dS_p.$$

Використані для розрахунку адаптовані відомі моделі джерел поля для котушок круглого і прямокутного перерізів, а також для прямокутного електромагніту з осердям.

Математичні моделі полів розсіювання дефектів приведені до розрахункового виду шляхом розбиття поверхні об'єму деталі, що контролюється, на елементарні площини і заміни інтегралів кінцевими сумами. Вводяться дві локальні системи координат і встановлюються співвідношення між цими системами.

Система рівнянь (1) зводиться до матричного рівняння

$$\dot{A}_{3N \times 3N} \cdot \dot{X}_{3N \times 1} = \dot{F}_{3N \times 1},$$

де $\dot{A}_y = \begin{bmatrix} \dot{a}_{11} & \dot{a}_{12} & \dot{a}_{13} \\ \dot{a}_{21} & \dot{a}_{22} & \dot{a}_{23} \\ \dot{a}_{31} & \dot{a}_{32} & \dot{a}_{33} \end{bmatrix}$ - квадратні матриці-блоки; $\dot{X}_j = \|\dot{i}_x, \dot{i}_y, \dot{\sigma}\|^T$; $\dot{F}_i = \|\dot{j}_1, \dot{j}_2, \dot{j}_3\|^T$

Одержана залежність для коефіцієнтів матриці $\|\dot{A}_y\|$.

Рішенням системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) є вектори щільності струму \vec{i}_i і щільності простого шару зарядів $\dot{\sigma}_i$ на кожній елементарній площині. Знайдені значення зарядів використовуються для визначення вектора напруженості поля розсіювання дефектів. Для цієї мети використовується співвідношення

$$\dot{H}_{3 \times 1} = \dot{B}_{3 \times N} \cdot \dot{X}_{N \times 1} + \dot{H}_{3 \times 1}^{cm},$$

де $\dot{H}_{3 \times 1}$ - вектор-стовпець, що містить координатні складові вектора \vec{H} ; $\dot{X}_{N \times 1}$ - вектор-стовпець, що складається з обчислених значень скалярного джерела на площинах ΔS_j .

Розроблено програмний комплекс моделювання процесів магнітного контролю для випадку намагнічування синусоїдальним полем. Програмний комплекс складається з препроцесора підготовки початкових даних, який здійснює опис геометрії об'єкту контролю і електрофізичних характеристик матеріалу об'єкту, що контролюється, дискретизацію поверхні об'єкта і дефектів. Поверхня об'єкта апроксимується прямокутними поверхневими елементами. Прийнято лівий порядок кодування вершин

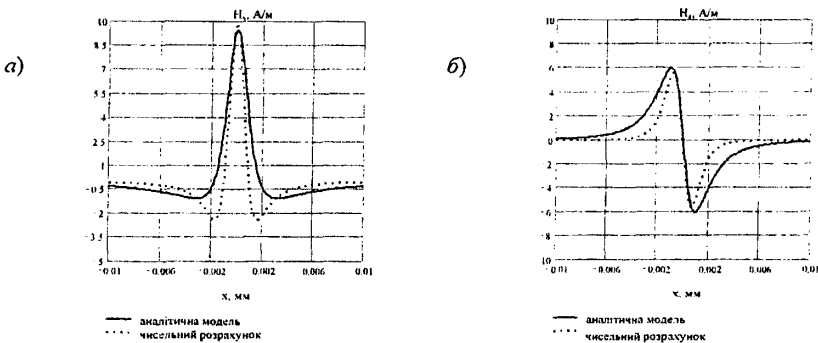
прямокутників. Збільшення кількості елементарних площин підвищує точність розрахунків параметрів поля, але при цьому зростає об'єм і час обчислень, оскільки СЛАР має щільно заповнену матрицю. Тому в роботі застосовано автоматичний адаптивний дискретизатор поверхні об'єкта контролю, який самостійно визначає ступінь дискретизації поверхні відповідно до заданого критерію.

В програмний комплекс входить процесор, який формує СЛАР, розв'язує СЛАР, визначає параметри електромагнітного поля в контрольних точках простору. На етапі формування і розв'язку СЛАР виконуються наступні дії: побудова підматриць і підвекторів для кожної елементарної площини, об'єднання цих підматриць і підвекторів для формування правої частини СЛАР.

В результаті перетворень інтегрування по поверхні зводиться до обчислення однократних інтегралів, окремі з яких вдалося обчислити аналітично. При числовому інтегруванні використовувалася формула Ньютона-Котеса.

Оскільки матриця коефіцієнтів СЛАР має велике число обумовленості, система розв'язується за допомогою сингулярного розкладання (SVD). До складу розробленого комплексу програм включено постпроцесор, основні функції якого полягають у добуванні інформації, а також синтезі числової інформації таким чином, щоб її можна було інтерпритувати. Функціонально постпроцесор виконано у вигляді окремого програмного модуля, що дозволяє одночасно проводити один числовий експеримент і готувати початкові дані для іншого. Початковими даними для постпроцесора є координати вершин елементарних площин поверхні об'єкта контролю, координати контрольних точок і значення компонент вектору електромагнітного поля в контрольованих точках.

В розділі також наводяться результати перевірки адекватності математичних моделей шляхом порівняння даних розрахунку, отриманих з використанням відомої аналітичної залежності, з даними, які одержані шляхом чисельних розрахунків. На рис. 1 наводяться графіки складових вектора напруженості магнітного поля, що розраховані різними методами для поля розсіювання дефекту з розкриттям 1 мм і глибиною 2 мм на відстані 1 мм від поверхні. Як видно з графіків, збіг результатів розрахунків задовільний.



а) дотична складова; б) нормальна складова
Рис. 1. Розподіл поля розсіювання дефекту

В третьому розділі викладено результати розробки математичної моделі магнітного поля в нелінійному феромагнітному середовищі.

Оскільки контроль дефектів проводиться в комбінованому полі, то зондування постійним полем ділянки деталі, що контролюється, вимагає інтенсивного намагнічування. При цьому ділянка феромагнітного матеріалу, яка розташована між полюсами локального пристрою намагнічування близька до насичення. Тому для аналізу магнітного поля і намагніченості потрібна модель, що дозволяє розраховувати поле в нелінійному феромагнітному середовищі. За основу математичної моделі використовується наступне інтегральне векторне рівняння:

$$\vec{H}(Q) = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{(\vec{M}(P) \cdot \vec{n}) \vec{r}_{QP}}{r_{QP}^3} dS_P - \frac{1}{4\pi} \int \frac{\text{div} \vec{M}(P) \cdot \vec{r}_{QP}}{r_{QP}^3} dV_P + \vec{H}_0(Q), \quad (2)$$

де P, Q – точки джерела і спостереження; $\vec{H}_0(Q)$ – вектор напруженості поля, що створюється струмом у котушці; \vec{r}_{QP} – вектор з точки спостереження в точку джерела; $\vec{M}(P)$ – вектор намагніченості в контрольованому металі.

При кусково-постійній апроксимації намагніченості в обсязі намагніченого тіла напруженість поля в точці спостереження простору (2) апроксимується наступною системою рівнянь:

$$\vec{H}_i = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\vec{M}_j \cdot \vec{n}_{jk}) \int_{S_{kj}} \frac{\vec{r}}{r^3} dS' + \vec{H}_{0j}, \quad (3)$$

де N – число елементарних об'ємів з постійною намагніченістю; S_{kj} – поверхня k -ої грані j -го елементарного об'єму; i, j – точки спостереження і джерела.

Система рівнянь (3) доповнюється нелінійною залежністю намагніченості від напруженості феромагнітного матеріалу

$$M = M(H).$$

Система рівнянь (3) розв'язується ітераційним методом. Для прискорення збіжності ітераційного процесу пропонується розрахунок поля проводити в два етапи. На першому етапі проводиться спрощений розрахунок поля, що враховує нелінійність магнітних характеристик матеріалу. Попередній розрахунок поля дозволяє визначити наближені значення вектора намагніченості у намагніченому феромагнітному матеріалі, які потім уточнюються шляхом розв'язку інтегрального рівняння (3). Основою методу попереднього розрахунку магнітного поля в нелінійному феромагнітному середовищі є метод дзеркальних зображень, а саме – метод Сірла.

Для ітераційного розв'язку (3) розроблено спеціальний алгоритм. Ітераційний процес здійснюється для кожного елементарного об'єму за наступною залежністю:

$$M_i^{k+1} = M_i^k + \alpha (H_i^k - H^k(M)),$$

де α - коефіцієнт; k - номер ітерації.

На кожному k -му ітераційному циклі розрахунку визначається модуль вектора напруженості магнітного поля H і модуль вектора намагніченості M .

За величиною модуля намагніченості на основі магнітної залежності $M = M(H)$ визначається напруженість поля, що відповідає цій намагніченості. Вектор \vec{H}_M - колінарний вектору \vec{M} .

Ітераційний процес триває до виконання наступної умови для кожного i -го елементарного об'єму:

$$|M_i^{k+1} - M_i^k| / M_i^k < \varepsilon,$$

де ε - задана мала величина ($\varepsilon = 10^{-3} - 10^{-4}$).

Розроблені алгоритми чисельного розв'язання нелінійного рівняння (3) за принципом зовнішніх і внутрішніх циклів забезпечують стійкість розв'язання при широкому діапазоні значень намагніченості.

Алгоритм розрахунок поля дефектів наступний:

- розв'язують інтегральне рівняння (3) для об'єкта без дефекту і визначають величини \vec{M}, \vec{H} . При цьому матрицю коефіцієнтів системи алгебраїчних рівнянь заносять в пам'ять комп'ютера;

- розраховують намагніченість середовища, яке оточує об'єм дефекту;

- знаходять дійсне значення намагніченості і поле розсіювання дефекта.

Для визначення вектора напруженості \vec{H}_0 пропонується математична залежність для розрахунку поля котушок з прямокутним перерізом, що розташовані як на бокових осердях електромагніту, так і на його перемичці. Розрахунок двох варіантів розташування котушок на магнітопроводі локального намагнічуючого пристрою (ЛНП) дає можливість визначити ефективність кожного з варіантів розміщення котушок.

В четвертому розділі описано методи побудови пристроїв електромагнітного і магнітного контролю дефектів з магнітотуляційними вимірювальними перетворювачами. Як магнітотуляційні перетворювачі використовуються ферозонди із стрижневими осерддями і магнітотуляційні головки. Магнітні системи дефектоскопів комбінованого намагнічування з ферозондами, а також з магнітотуляційною головкою показані на рис. 2. Ферозонди включено за градієнтметричною схемою та розташовано між полюсами П-подібного магнітопроводу. Ферозонди розташовані в середовищі, де градієнт магнітного поля магнітної системи дорівнює нулю. До обмоток магнітної системи подається постійний і змінний струм. Перетворювач може переміщуватися вздовж поверхні деталі, що контролюється, в усіх напрямках.

Шляхом розрахунку знайдено частотний діапазон ферозондів, що вимірюють синусоїдальне поле розсіювання дефектів. Рівняння електричного стану для первинної і вторинної обмоток ферозонду мають вигляд:

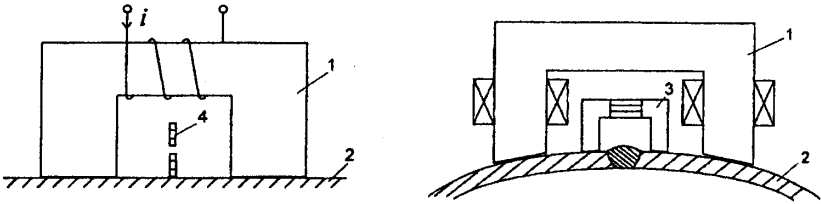


Рис. 2. Способи побудови магнітної системи дефектоскопа для локального намагнічування: 1 – електромагніт, що намагнічує; 2 – деталь, що контролюється; 3 – локальний магніточутливий елемент (ЛМЕ); 4 – ферозонд

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{11}}{dt} + \frac{d\psi_{12}}{dt} + i_1 R_1 &= e(t), \\ \frac{d\psi_{12}}{dt} - \frac{d\psi_{22}}{dt} + i_2 R_2 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\psi_{11} = W_1 SB(H_1 + H_2 + H_0)$; $\psi_{21} = W_2 SB(H_1 + H_2 + H_0)$;

$\psi_{22} = W_2 SB(H_1 - H_2 - H_0)$; $\psi_{12} = W_1 SB(H_1 - H_2 - H_0)$;

S – площа перерізу осердь ферозонда;

W_1, W_2 – число витків обмоток збудження і вихідної;

H_1, H_2 – напруженості поля, що створюються струмом i_1 в обмотці збудження і струмом i_2 – у вихідній обмотці;

$H_0 = H_0(t)$ – напруженість поля, що вимірюється ферозондом.

Система рівнянь (4) при арктангенсній апроксимації петлі гістерезису осердь розв'язується числовим методом, внаслідок чого одержуються спектри вихідного сигналу ферозонду при різній частоті електромагнітного поля ω_0 , що вимірюється, при наступних

числових даних: $R_1 = 100 \text{ Ом}$; $R_2 = 100 \text{ Ом}$; $H_S = 10^3 \text{ А/м}$; $\omega = 2\pi \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$;
 $W_1 = W_2 = 200$; $S = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$; $l = 10^{-2} \text{ м}$.

Результати розрахунку представлені у вигляді спектрограми на рис. 3.

Проведено розрахунок і одержана функція перетворення для магнітмодуляційної головки при вимірюванні постійних та синусоїдальних магнітних полів.

Одержано аналітичні залежності для функції перетворення ферозонду і ЛМЕ, які вимірюють синусоїдальне магнітне поле, і є такими:

$$K(\omega) = \frac{U_{2m}}{H_{0m}} = W_2 S \mu_0 \mu_m \times \frac{1,25(2\omega + \omega_0) \sin(2\omega + \omega_0)t_m + 1,25(2\omega - \omega_0) \sin(2\omega - \omega_0)t_m - 3,5\omega_0 \sin \omega_0 t_m}{(1 + 5 \sin^2 \omega t_m)^2}$$

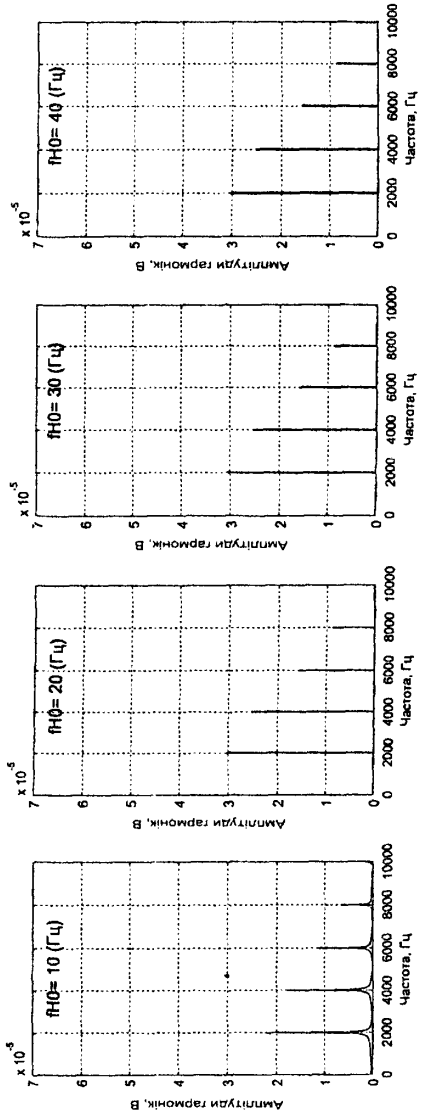
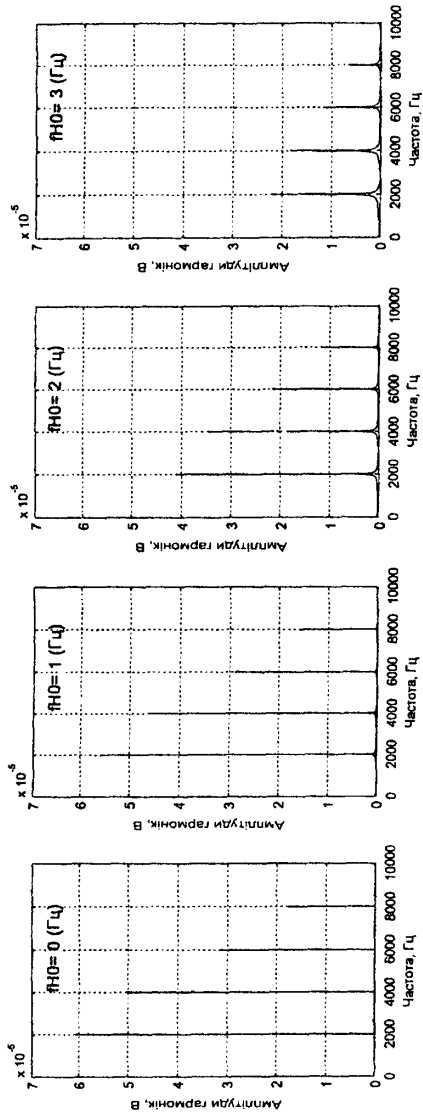


Рис. 3. Залежність сигналу на виході ферозонду від частоти поля, що вимірюється

$$K(\omega) = \frac{U_{2m}}{\Phi_{0m}} = W_2 \eta \times \frac{- (1 + 2,5\beta)\omega_0 \sin \omega_0 t_m + 1,25\beta(2\omega + \omega_0) \sin(2\omega + \omega_0)t_m + 1,25\beta(2\omega - \omega_0) \sin(2\omega - \omega_0)t_m}{(1 + 5 \sin^2 \omega t_m)^2}$$

Одержані в результаті розрахунків спектрів дані вказують на те, що ферозонд може вимірювати змінне магнітне поле частотою до $0,1f$ (f – частота збудження). З підвищенням частоти вимірюваного магнітного поля до величини $f_0 = 0,1f$ у вихідному сигналі ферозонду виникають додаткові гармоніки, які зсунуті щодо вихідної частоти $2f$ на $\pm kf_0$, $k = 1, 2, 3, \dots$, а амплітуда другої гармоніки вихідного сигналу падає.

Числові експерименти були проведені і для магнітмодуляційної головки. Результати числових експериментів показали, що магнітна система з модулятором, яка вбудована безпосередньо в магнітопровід інформаційного потоку, має порівняно з ферозондом такі переваги:

- вищий коефіцієнт перетворення за потужністю вихідного сигналу;
- потужність струму збудження менша, ніж у стрижневого ферозонду.

До недоліків слід віднести наступне:

- поріг чутливості вищий, ніж у ферозонда, за рахунок підвищеного рівня адитивної завади;

- складніша технологія виготовлення.

Запропонована математична модель магнітного потоку дефекта в магнітопроводі магнітмодуляційної головки, яка заснована на теоремі взаємності К.М. Поліванова. Проведені чисельні експерименти з визначення функції перетворення магнітмодуляційної головки.

В п'ятому розділі дисертації розроблено конструкцію системи безперервного контролю зварного шва. Запропонована система базується на універсальному магнітовимірювальному каналі (УМВК), який дозволяє з одного ферозонда одночасно отримувати інформацію про постійну і змінну складові магнітного поля (рис. 4).

Для забезпечення надійної роботи ферозонда при контролі зварного шва він охоплений зворотним зв'язком по постійному і змінному магнітному полю. На основі двох УМВК будується вимірювальний осередок магнітного дефектоскопу, за допомогою якого забезпечується градієнтометричний режим роботи ферозондів. Завдяки одночасному вимірюванню ферозондом постійної і змінної складових магнітного поля, вдається компенсувати вплив шорсткості поверхні на результат контролю по постійному магнітному полю. Для настройки УМВК розроблені установка і методика настройки. Ідея настройки є в тому, щоб з допомогою калібрувального соленоїда вибрати робочу точку ферозонда, що розташована посередині лінійної ділянки функції перетворення, і за допомогою коефіцієнтів передачі схеми обробки прийняти вибрану точку в якості штучного нуля вихідного сигналу ферозонда. Таким чином уникають впливу заводів і перехідних сигналів ферозонда на результат вимірювання поля дефекту. Кількість вимірювальних осередків дефектоскопа визначається шириною зони контролю, яку повинен охопити блок ферозондових перетворювачів.

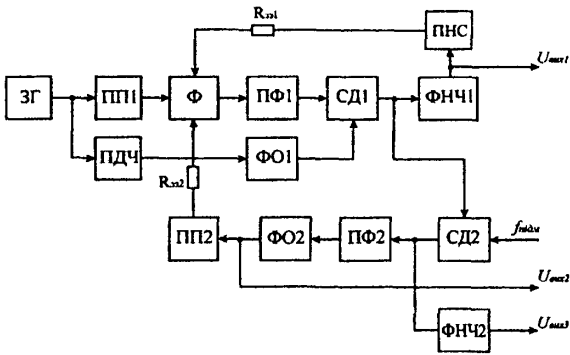


Рис. 4. Структурна схема універсального магнітовимірювального каналу:
 ЗГ – задаючий генератор; ПП1, ПП2 – підсилювач потужності; Φ – ферозонд;
 ПДЧ – подвоювач частоти; ΦО1, ΦО2 – фазообертач;
 ПФ1, ПФ2 – полосовий фільтр; СД1, СД2 – синхронний детектор;
 ФНЧ1, ФНЧ2 – фільтр низької частоти; ПНС – перетворювач напруга-струм

Ферозонди в перетворювачі розташовуються так, щоб забезпечити виявлення всіх типів дефектів. Згідно з методикою, що запропонована Зацепіним Н.Н., відстань між ферозондами, розташованими на одній прямій і які обертаються відносно поверхні контролю,

$$l = 2 \sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 + 12c}}{6}},$$

де $B = \delta^2 - 2b^2 + (\delta + h)^2$; $c = (b^2 + \delta^2) \cdot [b^2 + (\delta + h)^2]$; δ – відстань від півелементів до поверхні, що контролюється; h і b – відповідно глибина і півширина мінімального з дефектів, які потрібно знайти.

Враховуючи, що блок ферозондових перетворювачів нерухомий, півелементи ферозонда зміщені один відносно іншого на кут 45° , а раціональна відстань між ними дорівнює $2,83l$ (рис. 5). При такому розміщенні півелементів забезпечено виявлення навіть найскладнішого випадка знаходження дефекту, тобто коли дефект розміщений точно в напрямку руху об'єкта контролю і між півелементами ферозонду. Ферозонд складається з двох півелементів довжиною 3 мм і діаметром 2,6 мм, на яких розміщені обмотки: збудження, вихідна, зворотного зв'язку з постійним і змінним полем. При такому діаметрі відстань, на якій розміщені ферозонди, з урахуванням зовнішніх з'єднань складає 4 мм.

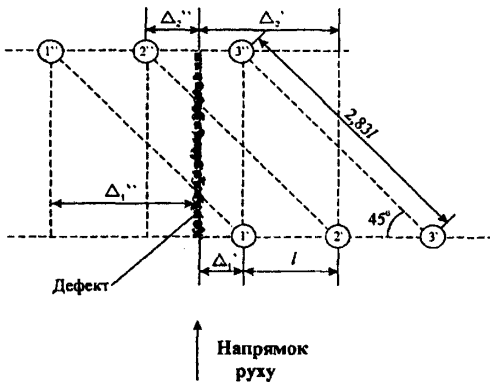


Рис. 5. Розташування півелементів ферозонда над контрольованою поверхнею

Таке розміщення ферозондів дозволяє виявляти дефекти глибиною 1 мм з розкриттям 0,5 мм при зазорі 3 мм між ферозондом і поверхнею контролю.

Для зменшення впливу зазору на результати контролю в блок ферозондових перетворювачів введений давач переміщення. За величиною його вихідного сигналу змінюється коефіцієнт підсилення в каналі обробки вихідного сигналу ферозонда, і тим самим підтримується постійна чутливість в процесі контролю. Зміна поля підмагнічування, викликана коливаннями зазору та різною магнітною проникністю ділянок контрольованого зварного шва, відстежується давачем Хола, що дозволяє коригувати поле підмагнічування.

Вжиті заходи щодо підвищення стабільності процесу контролю дозволили за допомогою розробленого дефектоскопа виявляти дефекти при швидкості руху об'єкта контролю до 2 м/с. Мінімальна величина поля розсіювання, що реєструється, складає 0,3 А/м, що забезпечує виявлення підповерхневих дефектів.

Розроблена мікропроцесорна система управління і обробки вихідних сигналів спрощує процес настройки дефектоскопу і дозволяє проводити документування результатів контролю.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна задача підвищення достовірності результатів неруйнівного контролю дефектів великогабаритних феромагнітних деталей шляхом використання комбінованого способу намагнічування: магнітного і електромагнітного, та ферозондового методу реєстрації полів розсіювання дефектів.

Основні висновки і результати, що одержані в процесі дослідження, полягають в наступному:

1. Проаналізовані сучасні методи ферозондового контролю великогабаритних деталей в магнітному і електромагнітному полях. Зроблені висновки про необхідність поєднання в часі і просторі двох методів (магнітного і електромагнітного) зондування великогабаритних деталей локальними пристроями, що намагнічують контрольований об'єкт.

2. Зроблено аналіз відомих математичних моделей магнітних і електромагнітних полів у феромагнітних середовищах. За теоретичну розрахункову модель вибрані поверхневі і просторові інтегральні рівняння для скалярного і векторного джерел – для моделі з постійним намагнічуванням, і одного векторного і одного скалярного джерел – для моделі зі змінним зондуєчим полем, що дає можливість моделювати поле в магнітних системах з комбінованим намагнічуванням.

3. Розроблено алгоритми розрахунку магнітного поля в нелінійному середовищі шляхом чисельного розв'язку рівняння Фредгольма I-го роду, що дало можливість аналізувати поля дефектів при локальному намагнічуванні об'єкту контролю П-подібними електромагнітами.

4. Розроблено принцип побудови і конструкція магнітної системи локальних магніточутливих перетворювачів, визначена його функція перетворення, що дає можливість проектувати такий клас вимірювальних перетворювачів.

5. На базі розроблених чисельних методів створено програмні комплекси, які дозволяють моделювати систему з різномірними магнітними властивостями: об'єкт – ферозонд – система, що намагнічує контрольований об'єкт.

6. Одержала подальший розвиток теорія ферозонда, що вимірює синусоїдальне поле з амплітудною модуляцією, отримані частотні характеристики ферозонда другої гармоніки при вимірюванні змінних полів. Обґрунтовано вибір частоти збудження ферозондів, яка залежить від частоти вимірюваного синусоїдального поля. Показано, що частота зондування може складати 0,1 частоти збудження ферозондів без зменшення чутливості ферозонду.

7. Розроблено комплекс магнітних дефектоскопів на базі універсального магнітовимірювального каналу, що працює одночасно в постійному і змінному магнітних полях, який захищено патентом України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мирошников В.В., Шевченко А.И., Швец С.Н. Селективный вихретоковый дефектоскоп для контроля труб// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Збірник наукових праць.-Хмельницький: ТУП,2001.-С.384-385.

Здобувачем запропоновано алгоритм чисельного розв'язку системи диференціальних рівнянь Максвелла.

2. Мирошников В.В., Шевченко А.И., Швец С.Н. Феррозондовый магниторегистрационный канал приборов магнитного контроля // Вісник Східноукраїнського національного університету.-2002.-№3(49).-С.142-144.

Здобувачем запропоновано спосіб компенсації початкового вихідного сигналу ферозонду.

3. Жученко Н.А., Швец С.Н., Басим Т. Определение информационных параметров магнитных полей рассеяния намагниченных участков ферромагнитных материалов// Технічна електродинаміка. Тематичний випуск „Проблеми сучасної електротехніки”.– Київ.-2002.–С. 111-114.

Здобувачем встановлено коефіцієнт кореляції коерцитивної сили з напруженим станом об'єкта контролю.

4. Романенко А.В., Поляченко Е.Ю., Швець С.Н. К выбору параметров электромагнитной системы импульсного источника питания // Вісник Східноукраїнського національного університету.–2002.–№8.–С. 154-159.

Здобувачем запропоновано форму апроксимації сигналу у вимірвальній котушці.

5. Мирошников В.В., Швець С.Н., Абу Шакра Марван. Применение магнитной томографии для контроля узлов машин // Вісник Східноукраїнського національного університету.–2003.–№ 12(70).–С. 174-180.

Здобувачем визначено необхідний поріг чутливості ферозондів при роботі над феромагнітною поверхнею.

6. Швець С.М. Розрахунок намагнічуючих систем дефектоскопів // Вісник Східноукраїнського національного університету.–2004.–№4(74).–С. 55-59.

7. Швець С.Н. Анализ конструкций и разработка принципа построения модульных металлодетекторов // Вісник Східноукраїнського національного університету.–2004.–№6(76).–С. 15-20.

8. Тарасенко О.В., Швець С.Н., Филимоненко Н.Н. К расчету локального намагничивающего устройства переменного тока // Вісник СХУ ім. В.Даля.–2005.–№7(89).–С. 199-207.

Здобувачем проведено розрахунок поля для прямокутної котушки магнітної системи.

9. Швець С.Н. Непрерывный контроль сварных швов труб в процессе производства // Методи та прилади контролю якості, – 2005. –№15.–С. 77-79.

10. Пат. 68782А Україна, МПК⁷ G 01 N 27/90. Ферозондний магнітовимірвальний канал / Мирошников В.В., Швець С.М. (Україна); Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля.– №2003109583; Заявл. 24.10.2003; Опубл. 16.08.2044.– 3 с.

Здобувачем запропоновано для живлення компенсаційної обмотки ферозонду використовувати імпульси збудження.

11. Vadim Miroshnikov, Alexandr Shevchenko, Svetlana Shvets “Computation of defectoscopes magnetizing systems” // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії”-Львів:Видавництво національного університету “Львівська політехніка”.–2002.–С.116-117.

Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку поля дефекта.

12. Мирошников В.В., Стеблевский В.А., Швець С.Н. Цифровые вихретоковые дефектоскопы для контроля цилиндрических изделий //Збірник матеріалів конференції “Ефективність реалізації наукового, ресурсного та промислового потенціалу в сучасних умовах”.-Київ.-2002.

Здобувачем запропоновано спосіб обробки вихідного сигналу перетворювача.

13. Мирошников В.В., Романенко А.В., Швець С.Н. Матричный феррозондовый преобразователь // Материалы XVI российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика».–Санкт-Петербург.–2002.

Здобувачем запропоновано спосіб врахування опору навантаження ферозонда.

14. Мирошников В.В., Швець С.Н. Магнитоферрозондовий контроль концев труб // Збірник тез доповідей науково-технічної конференції „Приладобудування 2003: стан і перспективи”.–Київ: НТУУ „КПІ”.–2003.–С. 158-159.

Здобувачем запропонована проста схема компенсації розбалансу ферозонда.

15. Мирошников В.В., Швець С.М. Конструкція магнетного приладу безперервного контролю великогабаритних об'єктів// Матеріали 4-ої Національної науково-технічної конференції „Неруйнівний контроль та технічна діагностика” (НКТД–2003).–Київ: УТ НКТД.–2003.–С. 227-232.

Здобувачем запропоновано конструкцію системи підмагнічування для створення однорідного поля в заданому об'ємі.

16. Швець С.Н., Мирошников В.В., Абу Шахра Марван. Феррозондовий контроль сварного шва в трубному виробництві // Матеріали Пятої юбилейної Промышленной конференции с международным участием «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях».–Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технологія».–2005.–С. 169-170.

Здобувачем запропоновано чисельний алгоритм розрахунку поля дефекту, який базується на рівнянні Фредгольма II-го роду.

17. Швець С.Н., Победа Т.В. Феррозондовий контроль сварних швів електросварних труб // Тезиси докладов XVII Российской научно-технической конференции с международным участием «Неразрушающий контроль и диагностика».–Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН.–2005.–С.20.

Здобувачем запропоновано використовувати ферозонди при роботі у змінному магнітному полі.

18. Швець С.Н., Победа Т.В., Сентяй Р.Н. Универсальная схема обработки выходного сигнала феррозонда // Электромагнитный, ультразвуковой та оптичний неруйнівний контроль матеріалів. Серія „Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів”: 36. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України.– 2006.–Вип. 11.–С. 127-133.

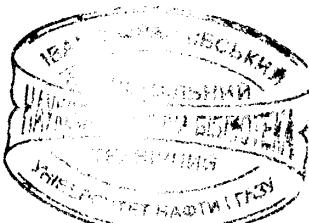
Здобувачем запропонована структурна схема обробки вихідного сигналу ферозонду для одночасної реєстрації постійного і змінного магнітного поля.

19. Полтавцев А.Ю., Швець С.Н., Муханад Сабер Аль-Кала. Функция преобразования магнитомодуляционных преобразователей при измерении синусоидального магнитного поля // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.– Луганськ: СХУ ім. В.Далі.–2006.–№3(97).–С. 116-119.

Здобувачем запропоновано використовувати частину магнітопроводу локального магніточутливого перетворювача, як осереддя ферозонду.

20. Мирошников В.В., Гречишкіна Н.В., Швець С.Н. Универсальный электромагнитный преобразователь для контроля ферромагнитных изделий // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск „Проблеми сучасної електротехніки”.–Київ: Інститут електродинаміки НАН України.–2006.–ч. 6.–С. 90-93.

Здобувачем запропоновано використовувати для підмагнічування осереддя перетворювача постійний магніт з наперед заданими характеристиками.



АНОТАЦІЯ

Швец С.М. Поседнання електромагнітного і магнітного методів при ферозондовій дефектоскопії великогабаритних деталей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2007.

Запропоновано і науково обгрунтовано комбінований метод контролю дефектів великогабаритних феромагнітних виробів в прикладених магнітному і електромагнітному полях з фіксацією дефектів ферозондами і магнітоточувальними вимірювальними перетворювачами. Генератором полів локального намагнічування є П-подібні електромагніти, між полюсами яких розміщені магніточутливі елементи: ферозонди, магнітоточувальні головки.

Виконано аналіз магнітних і електромагнітних полів в області контролю за допомогою адаптованих математичних моделей поля, які основані на поверхневих і просторових інтегральних рівняннях Фредгольма першого і другого роду. Запропоновано алгоритм чисельного розв'язку рівнянь, розроблено комплекс програм аналізу полів.

Досліджені функції перетворення ферозондів із стрижньовими осерддями, що вимірюють електромагнітне синусоїдальне поле, визначені частотні характеристики ферозондів. На основі проведених досліджень розроблена система безперервного неруйнівного контролю зварного шва. Створена мікропроцесорна система керування і обробки вихідних сигналів вимірювальних перетворювачів.

Ключові слова: дефектоскоп, феромагнітні деталі, електромагнітне поле, математичне моделювання, ферозонд, частотна характеристика, феромодуляційна головка, обробка сигналів.

АННОТАЦИЯ

Швец С.Н. Совмещение электромагнитного и магнитного методов при ферозондовой дефектоскопии крупногабаритных деталей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Ивано-Франковск, 2007.

Предложен метод контроля дефектов крупногабаритных ферромагнитных изделий, в частности сварных швов, основанный на одновременном применении электромагнитного синусоидального и постоянного поля с фиксацией дефектов ферромодуляционными измерительными преобразователями: феррозондами и магнитоточувальными головками.

Применение метода позволяет повысить достоверность контроля и одновременно обнаруживать подповерхностные дефекты. Регистрация электромагнитных полей не катушками, а феррозондами значительно увеличивает чувствительность контроля и уменьшает размеры выявляемых дефектов.

Для возможности анализа магнитных полей в области контроля, как над поверхностью контролируемой детали, так и под нею, разработаны математические модели поля. Основой построения моделей электромагнитного поля является метод граничных интегральных уравнений для простого слоя магнитных зарядов и для слоя поверхностных токов.

Разработаны алгоритмы численного решения интегральных уравнений при их редуцировании к системе линейных алгебраических уравнений. Результатом теоретических исследований является программный комплекс расчета электромагнитного поля дефектов конечных геометрических размеров. Произведена проверка адекватности математической модели электромагнитного поля путем сравнения результатов расчета поля дефектов с результатами, полученными другими известными методами.

Локальное намагничивание детали производится приставными П-образными электромагнитами, которые при питании обмоток постоянным током доводят намагничиваемый участок до состояния близкого к насыщению. Для возможности анализа магнитного поля в нелинейной среде разработана математическая модель поля на основе уравнения Фредгольма первого и второго рода, которая при кусочно-постоянной аппроксимации функции намагниченности по объему намагничиваемого тела аппроксимируется системой алгебраических уравнений. Разработано несколько алгоритмов итерационного способа решения этой системы, обсуждены их достоинства и недостатки.

Для регистрации электромагнитных полей дефектов используются феррозонды со стержневым сердечником и ферромодуляционные головки. Расчетным путем найден частотный диапазон феррозондов, измеряющих синусоидальное электромагнитное поле дефектов. Расчет частотного диапазона основан на численном решении системы нелинейных дифференциальных уравнений электрического состояния входной и выходной цепи феррозонда. При моделировании процесса образования выходного сигнала феррозонда применена арктангенсная аппроксимация петли гистерезиса его сердечника. На основе расчета получены частотные дискретные спектры выходных сигналов феррозонда.

Теоретические исследования проведены для определения функции преобразования магниточувствительной головки. Результаты численных расчетов функции преобразования магнитомодуляционных головок позволили определить достоинства и недостатки этого вида магнитомодуляционного преобразователя.

На основе проведенных исследований разработана система непрерывного контроля сварного шва труб большого диаметра. Система базируется на универсальном магнитоизмерительном канале, который позволяет с одного феррозонда одновременно получать информацию о постоянной и переменной составляющей измеряемого электромагнитного поля. Феррозонды работают в градиентометрическом режиме. Благодаря одновременному измерению феррозондом постоянной и переменной составляющей электромагнитного поля, удается скомпенсировать влияние шероховатости поверхности шва на результат контроля, который ведется по постоянному магнитному полю.

Результаты работы внедрены и используются ООО «Крестил-Украина» (г. Киев) в виде электромагнитного дефектоскопа для непрерывного контроля сварных труб.

Ключевые слова: дефектоскоп, ферромагнитные детали, электромагнитное поле, математическое моделирование, феррозонд, частотная характеристика, ферромодуляционная головка, обработка сигналов

ABSTRACT

Shvets S.N. Combination of electromagnetic and magnetic methods for ferroprobe testing of bulky details. – Manuscript.

The thesis for a candidate's degree achievement in speciality 05.11.13 – Devices and methods of control and determination of substances composition. – Ivano-Frankivsk National Technical university of oil and gas. Ivano-Frankivsk, 2007.

The combined method for controlling the defects of bulky ferromagnetic articles in the attached magnetic and electromagnetic fields with fixing the defects by ferroprobes and magnetic-modulation measuring transducer has been offered and scientifically grounded. II-figurative electromagnets have been represented in the form of the generator of the fields of local magnetizing. Magnetic-sensitive elements such as ferroprobes, magnetic-modulation heads are placed between the poles of generator.

The analysis of magnetic and electromagnetic fields in the area of control by means of the adapted mathematical models of the field based on superficial and spatial integral equations by Fredholm of the first and second type has been carried out. The algorithm of numerical decision of equations has been offered, the complex of the programs for the analysis of fields has been developed.

The transfer functions of ferroprobes with pivotal cores measuring the electromagnetic sinusoidal field has been investigated. As a result frequency characteristics of ferroprobes has been determined. On the basis of the conducted researches a continuous non-destructive control system of a shop welded has been developed. The microprocessor system for controlling and outputs signal processing of measuring transducers has been created.

Keywords: defectoscope, ferromagnetic details, electromagnetic field, mathematical modelling, ferroprobe, frequency characteristic, ferromodulation head, signal processing.