

## МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

---

---

УДК 620.179.14

DOI 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-5-14

### ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ФЕРОМАГНІТНИХ СТАЛЕЙ ЧЕРЕЗ ШАР АНТИКОРОЗІЙНОГО ПОКРИВУ БЕЗ ЙОГО ВИДАЛЕННЯ

*В. М. Учанін\*, К. А. Іващенко*

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України  
79060 м. Львів, вул. Наукова, 5, тел.: 0322296166, e-mail: vuchanin@gmail.com*

Чутливість виявлення тріщин у виробках із ферромагнітних сталей вихрострумовим методом часто зменшується через додаткові завади, що виникають від магнітних та структурних неоднорідностей матеріалу. У цій роботі проаналізовано методи, запропоновані для виявлення дефектів у виробках із ферромагнітних сталей. Один із можливих підходів заснований на додатковому намагнічуванні контрольованої зони для мінімізації впливу магнітної неоднорідності. Інша тенденція основана на використанні селективних вихрострумових перетворювачів. Представлені вище проблеми контролю ферромагнітної сталі можуть бути вирішені за допомогою вихрострумових перетворювачів подвійного диференціювання. Ці перетворювачі були розроблені кілька десятиліть тому і характеризуються специфічним квазіабсолютним сигналом з максимальною амплітудою, коли перетворювач знаходиться безпосередньо над тріщиною. Для таких перетворювачів властиві: висока чутливість до подовжених (типу тріщина) та до локальних (типу пітинг або пора) дефектів; висока чутливість до поверхневих і прихованих дефектів під час контролю через захисний покриття; висока глибина контролю для низькочастотних перетворювачів. У цій роботі досліджували можливість виявлення тріщин через антикорозійний діелектричний покриття. Побудовано діаграми для оцінювання граничних товщин діелектричного покриття для виявлення дефектів залежно від їх глибини. Для контролю об'єктів із великими габаритними розмірами (таких як трубопроводи, поковки тощо) розроблено багатоелементний ВСП типу EDDYLINE. Для досягнення високої продуктивності контролю досягнуто ширину зони чутливості близько 60 мм. При цьому забезпечено високу локальність, оскільки всі окремі ВСП працюють незалежно. Розроблені технології контролю з використанням ВСП типу EDDYLINE успішно використані для виявлення тріщин у поковках ферромагнітних та нержавіючих сталей.

**Ключові слова:** вихрострумовий метод, дефектоскоп, перетворювач подвійного диференціювання, тріщина, чутливість, завади, продуктивність контролю.

Чувствительность обнаружения трещин в изделиях из ферромагнитных сталей вихретоковым методом часто уменьшается из-за дополнительных помех, возникающие из-за магнитных и структурных неоднородностей материала. В этой работе проанализированы несколько методов, предложенных для выявления дефектов в изделиях из ферромагнитных сталей. Один из возможных подходов основан на дополнительном намагничивании зоны контроля для минимизации влияния магнитной неоднородности. Второй подход основан на использовании селективных вихретоковых преобразователей. Представленные выше проблемы контроля ферромагнитной стали можно решать с помощью вихретоковых преобразователей двойного дифференцирования. Эти преобразователи были разработаны несколько десятилетий назад и характеризуются специфическим квазиабсолютным сигналом с максимальной амплитудой, когда преобразователь находится непосредственно над трещиной. Таким преобразователям свойственна: высокая чувствительность к удлиненным (типа трещина) и локальным (типа питтинг или пора) дефектам; высокая чувствительность к поверхностным и скрытым подповерхностным дефектам при контроле через защитное покрытие; большая глубина контроля для низкочастотных преобразователей. В этой работе исследовалась возможность обнаружения трещин через антикоррозионное покрытие. Построены диаграммы для оценки предельных толщин диэлектрического покрытия для выявления дефектов в зависимости от их глубины. Для контроля объектов с большими габаритными размерами (таких как трубопроводы, поковки и т.п.) разработан многоэлементный ВСП типа EDDYLINE. Для достижения высокой производительности контроля достигнуто ширину зоны чувствительности около 60 мм. При этом обеспечено высокую локальность, поскольку все

отдельные ВСП работают независимо. Разработанные технологии контроля с использованием ВСП типа EDDYLINE успешно использованы для выявления трещин в поковках из ферромагнитных и нержавеющей сталей.

**Ключевые слова:** вихретоковый метод, дефектоскоп, преобразователь двойного дифференцирования, трещина, чувствительность, помехи, производительность контроля.

The detection of the cracks in ferromagnetic steel components by the eddy current method is formidable because of the additional noise originated from magnetic and structural heterogeneities of the inspected material. In this paper, several techniques proposed for the detection of the defects in ferromagnetic steel components are analyzed. One of the possible approaches is based on the additional magnetization of the inspected zone to minimize magnetic heterogeneity. Another trend is concerned with new selective EC probe development. This inspection problem is exercisable by the double differential EC probes application. These probes were developed some decades ago and are characterized by a specific quasi-absolute signal with maximum amplitude when the probe is situated directly over a crack. The main features of such probes can be characterized with: high sensitivity to elongated (like crack) and to local (like pitting or pore) defects; high sensitivity to surface and subsurface defects through the protective coating or with large clearance between the probe and inspected surface; high penetration for low-frequency probes; high lift-off noise suppression. In this study the possibility to detect the cracks through the anticorrosive coating was investigated. Special detectability diagrams were created to estimate the ultimate thicknesses of dielectric coating for the detection of the defects with different depths. For inspection of the objects with large overall dimensions (like tubes, forgings, etc.) array type EC probe (named EDDYLINE) was developed. High sensitivity width (near 60 mm) was achieved to obtain high inspection productivity. At the same time, the high locality was provided because all EC probes are operated separately. Developed EC inspection techniques based on the EDDYLINE type EC probe were successfully applied for the detection of cracks in ferromagnetic and stainless steel tube forgings.

**Keywords:** eddy current method, flaw detector, double differential probe, crack, sensitivity, noise, inspection productivity

**Вступ.** Феромагнітні сталі широко застосовуються в багатьох конструкціях, серед яких до найбільш відповідальних можна віднести трубопроводи для транспортування нафти чи газу, залізничні осі і колеса та вали турбін. Дефекти різного походження, зокрема втомні та стрес-корозійні тріщини, що виникли внаслідок впливу експлуатаційних чинників можуть суттєво зменшити надійність конструкцій і призвести до передчасних відмов та аварій. Тому своєчасне виявлення дефектів у феромагнітних сталях надзвичайно важливе і актуалізує введення періодичного експлуатаційного моніторингу конструкцій засобами неруйнівного контролю (НК).

Для виявлення поверхневих дефектів у різних виробках із феромагнітних матеріалів широко використовується магнітопорошковий (МП) метод НК. Основними причинами популярності МП методу є порівняно проста процедура контролю та можливість контролю виробів складної форми. В той же час МП метод має багато обмежень, пов'язаних з низькою продуктивністю через трудомісткі операції попереднього очищення поверхні, намагнічування деталі, нанесення та подальше видалення магнітної суспензії (або порошку),

розмагнічування деталей після контролю тощо [1,2]. Крім того, МП метод має низьку надійність у виробничих умовах через людський фактор та суттєвий вплив якості підготовки контрольованої поверхні на результати контролю. Іншими недоліками МП методу є витрати на розхідні матеріали та неможливість оцінювання глибини дефекту. Проблеми застосування МП методу суттєво збільшуються у випадку контролю деталей, покритих антикорозійними покриттями товщиною більше 0,3 мм. Ці недоліки МП методу спонукають пошук надійніших методів виявлення дефектів у феромагнітних сталевих конструкціях.

**1. Вихрострумний контроль виробів із феромагнітних сталей (короткий огляд).** Вихрострумний (ВС) НК широко застосовується для виявлення та оцінювання небезпечних дефектів у відповідальних конструкціях та виробках [1, 3-6]. Історично ВС метод спочатку використовували в авіаційній галузі для перевірки деталей простої форми, виготовлених з неферомагнітних матеріалів [1]. Але з часом метод все ширше використовується для НК конструкцій і виробів із феромагнітної сталі. У той же час ВС контроль конструкцій із феромагнітних сталей часто ускладнюється

через додаткові завади, що виникають під впливом магнітних та структурних неоднорідностей матеріалу. Для деяких феромагнітних сталей ці завади є достатньо великими, щоб суттєво обмежувати можливість ВС контролю.

В науковій літературі дискутується декілька підходів щодо заглушення згаданих вище специфічних завод. Перший спосіб полягає у додатковому намагнічуванні об'єкта контролю (ОК). Виявлено, що феромагнітні матеріали можна контролювати шляхом магнітного насичення матеріалу для усунення завод, пов'язаних зі змінами магнітної проникності [7-11]. Але цей підхід може створювати обмеження через вплив статичного магнітного поля на феритові осердя вихрострумове перетворювача (ВСП), яке негативно впливає на їх чутливість. Інший підхід може бути реалізований на основі створення селективних ВСП.

Згідно з нашим досвідом, проблему ВС контролю виробів із феромагнітних сталей можна вирішити шляхом використання ВСП подвійного диференціювання, які розроблено нами кілька десятиліть тому [12]. Ці ВСП складаються з двох однакових збуджувальних обмоток 1 та двох однакових вимірювальних обмоток 2, які розташовані у кутах квадрату (рис. 1, зліва). Дві обмотки збудження з'єднано послідовно та орієнтовано для створення однакових та протилежних первинних електромагнітних полів. Така конструкція ВСП подвійного диференціювання утворює

особливість у розподілі первинного електромагнітного поля та вторинного поля, створюваного вихровими струмами в бездефектних та ізотропних ОК. Ця особливість полягає в існуванні нейтральної площини, в якій вертикальна складова результуючого електромагнітного поля дорівнює нулю [12]. Вимірювальні обмотки орієнтовано чутливими до вертикальної складової електромагнітного поля і встановлено у нейтральній площині, де ця складова дорівнює нулю. Завдяки зустрічному з'єднанню вимірювальних обмоток реалізовано подвійно-диференційний характер вихідного сигналу ВСП. Розроблені ВСП встановлюють у циліндричний корпус із алюмінієвого сплаву для зменшення рівня електронних завод і забезпечують з'єднувачами різного типу. ВСП подвійного диференціювання характеризуються спрямованою чутливістю під час виявлення видовжених (як тріщина) дефектів. Оптимальна орієнтація ВСП відносно напрямку тріщини показана на рис. 1а. Спеціальна позначка на корпусі ВСП допомагає вибрати орієнтацію максимальної чутливості. Під час сканування зони тріщини ці ВСП створюють специфічний «квазіабсолютний» сигнал з максимальною амплітудою сигналу за його розташування безпосередньо над тріщиною (рис. 1б) подібно до будь-якого ВСП абсолютного типу. Для локальних дефектів ці ВСП створюють специфічний просторовий розподіл сигналу у вигляді чотирьох пелюсток з двома позитивними та двома негативними зонами чутливості [12]

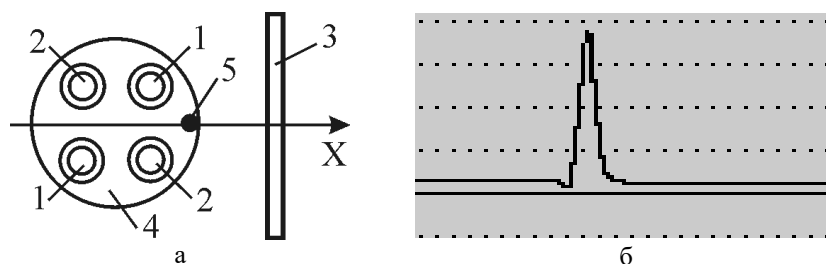


Рисунок 1 – Оптимальна орієнтація ВСП (а) під час виявлення тріщин (вид зверху): 1 і 2 – збуджувальна і вимірювальна обмотки відповідно; 3 – тріщина; 4 – корпус ВСП; 5 – позначка і «квазіабсолютний» сигнал від тріщини (б).

Проведені раніше дослідження показали, що ВСП подвійного диференціювання мають низку позитивних властивостей, зокрема: високу чутливість до видовжених (типу тріщина) та до локальних (типу корозійний

пітинг або пора) дефектів; можливість проводити контроль через діелектричний покрив або з великим зазором між ВСП та поверхнею ОК; високу глибину контролю (для низькочастотних ВСП); відстроювання від

впливу зміни зазору під час сканування і низький рівень завад [1, 12-14]. Розроблено низку ВСП подвійного диференціювання різних розмірів (від 4 до 33 мм), що відрізняються розмірами обмоток, діапазоном робочих частот та просторовою роздільною здатністю. Усі вказані параметри ВСП оптимізовані для конкретних ОК, типів дефектів і заданого порогу чутливості. Ці ВСП показали свою ефективність під час розробки нових технологій ВС контролю на залізничному транспорті, в енергетиці, авіації, хімічній промисловості тощо [6,12,15,16].

У роботі [6] ВС метод з використанням ВСП подвійного диференціювання порівнювали з МП методом. Ці дослідження показали можливість заміни МП методу ефективнішим ВС методом, додатковими перевагами якого є можливість автоматизації процедур контролю та оцінки розмірів виявлених тріщин. У цій роботі представлено дві автоматизовані багатоканальні системи для комбінованого (ультразвукового та ВС) контролю виробів із феромагнітної сталі. Перша система призначена для контролю залізничних осей під час їх виробництва. Друга - для НК залізничних колісних пар після тривалої експлуатації на ремонтних заводах. Показано, що завдяки використанню ВС методу продуктивність розроблених систем у 8-10 разів вища, ніж продуктивність систем, заснованих на МП методі.

**2. Виявлення прихованих дефектів через діелектричний покрив.** Виявлення прихованих дефектів через діелектричний покрив важливе для практики, зокрема для виявлення дефектів трубопроводів. Очевидно, що діелектричний покрив послаблює сигнал ВСП, обумовлений дефектом, і це призводить до ще більшого зростання проблеми виявлення дефектів у феромагнітних сталях. Дослідження чутливості ВСП подвійного диференціювання проводили з використанням зразка із феромагнітної сталі СТ45 з гладкою А ( $R_a - 1,25$  мкм) і шорсткою В ( $R_z - 160$  мкм) поверхнями (рис. 2). Шорсткість поверхні В імітували сіткою (крок 1,0 мм) прорізів завширшки 0,5 мм і завглибшки 0,16 мм. Штучні дефекти виконали електроерозійним методом у вигляді паців завширшки 0,1 мм і завглибшки 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 і 2,0 мм на поверхні А і завглибшки 0,6; 1,5 і 3,0 мм на поверхні В на всю ширину зразка (30 мм).

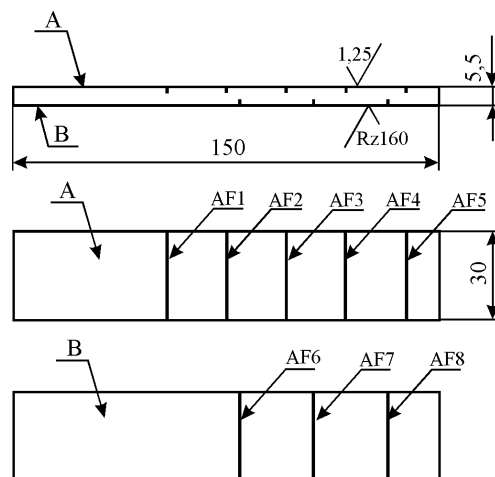


Рисунок 2 – Зразок з штучними дефектами типу тріщина різної глибини.

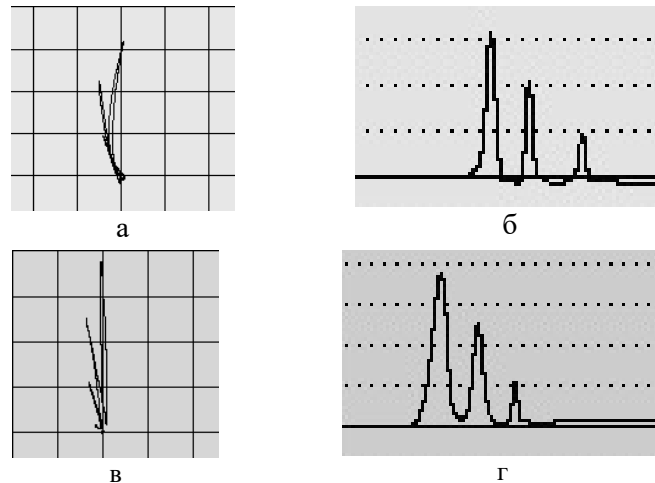
Сигнали ВСП типу МДФ 1201 і МДФ 0601 (з діаметром робочої поверхні 12,5 та 6,0 мм відповідно) реєстрували у режимі ручного сканування у комплексній площині (рис. 3а,в та рис. 4а,в) та у режимі часової розгортки (рис. 3б,г та рис. 4б,г) за допомогою вихрострумової плати EDDYMAX. В результаті всі згадані вище штучні дефекти на гладкій і шорсткій поверхнях зразка були виявлені з достатньо високим співвідношенням сигнал/завада, що підтверджує високу чутливість і селективні властивості ВСП щодо шорсткості контрольованої поверхні.

Сигнали ВСП типу МДФ 1201, отримані від дефектів завглибшки 0,5; 1,0 і 2,0 мм на робочій частоті 30 кГц за безпосереднього контакту із контрольованою поверхнею і через діелектричну пластину завтовшки 5,0 мм, подано на рис. 3. Тут використано різне підсилення сигналу і контроль через пластину проводили з чутливістю на 36 дБ більшою.

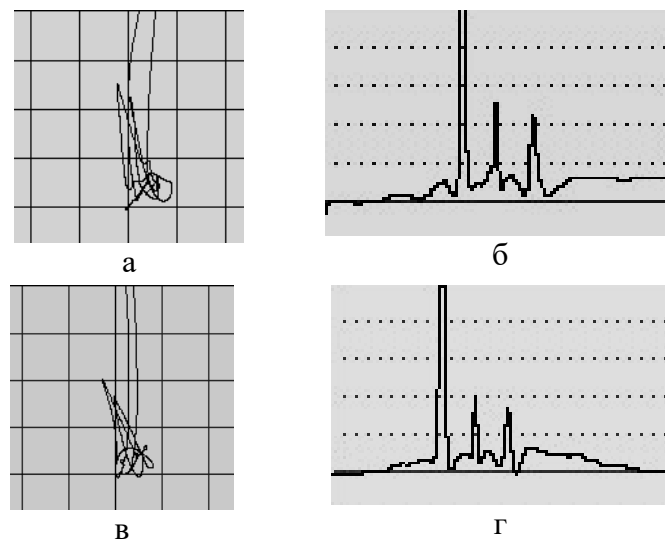
Наведені результати (рис. 3) показують, що ВСП типу МДФ 1201 може виявити дефекти завглибшки 0,5 мм через діелектричну пластину завтовшки 5,0 мм з досить високим співвідношенням сигнал/завада. Таке високе співвідношення сигнал/завада показує, що така товщина діелектричного покриву не є граничною. Можна спостерігати також деякі відмінності за амплітудою і фазовим кутом сигналу від дефектів різної глибини (рис. 3а,в)

Сигнали ВСП типу МДФ 0601, отримані від дефектів завглибшки 0,2; 0,5 і 1,0 мм на робочій частоті 100 кГц за безпосереднього контакту з

контрольованою поверхнею і через підсилення сигналу і контроль через пластину діелектричну пластину завтовшки 2,5 мм подано проводився з чутливістю на 36 дБ більшою. на рис. 4. Тут також використано різне



**Рисунок 3 – Сигнали ВСП типу МДФ 1201 від дефектів завглибшки 0,5; 1,0 і 2,0 мм у комплексній площині (а,в) і в режимі часової розгортки (б,г) за безпосереднього контакту з поверхнею ОК (а,б) та через діелектричну пластину завтовшки 5,0 мм (в,г).**



**Рисунок 4 – Сигнали ВСП типу МДФ 0601 від дефектів завглибшки 0,2; 0,5 і 1,0 мм в комплексній площині (а,в) і режимі часової розгортки (б,г) за безпосереднього контакту з поверхнею ОК (а,б) і через діелектричну пластину завтовшки 2,5 мм (в,г).**

Ці результати (рис. 4) показують, що ВСП типу МДФ 0601 виявляє дефекти завглибшки 0,2 мм через діелектричний покрив завтовшки 2,5 мм. Тут також можна спостерігати різницю у фазовому куті та амплітуді (рис. 4а,в) для дефектів різної глибини. Зазначимо, що ВСП типу МДФ 0601 має невеликі розміри (лише 6

мм), що забезпечує високу роздільну здатність, і є ефективним для контролю зон з малою кривизною поверхні.

Робоча частота ВС контролю суттєво впливає на можливості виявлення дефектів через шар діелектричного покриву. На рис. 5 подано сигнали ВСП типу МДФ 0601 у комплексній

площині і в режимі часової розгортки від дефекту найменшої глибини 0,1 мм через діелектричну пластину завтовшки 2,5 і 1,5 мм на робочих частотах 40 кГц (а) і завтовшки 1,5 мм на частоті 400 кГц (б). Ці товщини діелектричних покриттів шляхом експертної оцінки визначені як граничні товщини  $t_{zp}$  для цих робочих частот

Таким чином, найменший дефект завглибшки 0,1 мм можна виявити через діелектричне покриття завтовшки 2,5 мм за допомогою ВСП типу МДФ 0601 тільки на робочій частоті 40 кГц. Очевидно, що глибші дефекти можна виявляти через покриття більшої товщини.

Для оцінювання можливості виявляти дефекти певної глибини через шар діелектричного покриття доцільно побудувати діаграми залежності граничних товщин  $t_{zp}$

діелектричного покриття, через які ще можна виявити дефект відповідної глибини з достатнім співвідношенням сигнал/завада. Для побудови такої діаграми для ВСП типу МДІ 0601 реєстрували його сигнали під час сканування зони дефекту через діелектричні пластини різної товщини (від 0,1 до 2,0 мм). Для кожної глибини дефекту  $a$  в діапазоні від 0,1 до 2,0 мм були виявлені граничні товщини  $t_{zp}$  (тобто дефекти були виявлені з достатнім співвідношенням сигнал/завада, як показано на рис. 5). Очевидно, що гранична товщина  $t_{zp}$  діелектричного покриття обмежує можливість виявлення дефекту залежно від його глибини  $a$  та робочої частоти. Залежності граничної товщини  $t_{zp}$  від глибини дефекту для ВСП типу МДФ 0601 на робочих частотах 40 та 400 кГц подано на рис. 6.

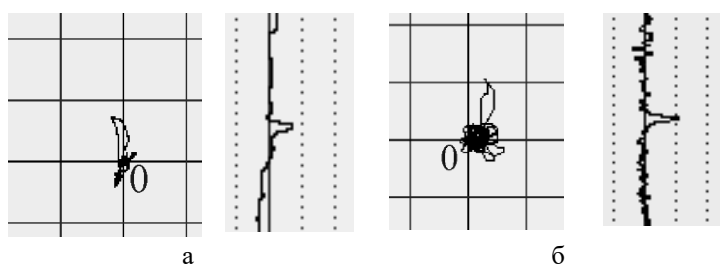


Рисунок 5 – Сигнали від дефекту завглибшки 0,1 мм через діелектричні пластини завтовшки 2,5 мм на частоті 40 кГц (а) і завтовшки 1,5 мм на частоті 400 кГц (б).

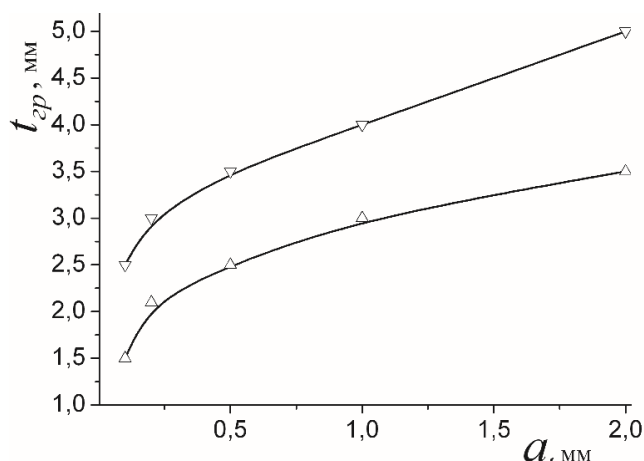


Рисунок 6 – Залежності граничних товщин діелектричного покриття  $t_{zp}$  від глибини  $a$  дефекту типу тріщина для робочих частот 40 ( $\nabla$ ) та 400 кГц ( $\Delta$ ).

Як видно з діаграм на рис. 6, можливість виявлення дефектів через діелектричний покриття

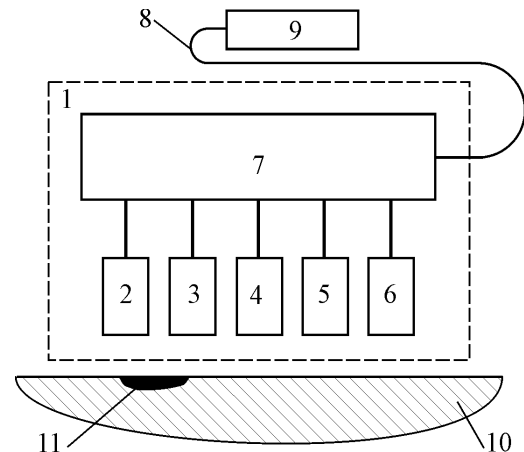
істотно вища, коли застосовується нижча робоча частота (40 кГц), що пов'язано з меншим

загасанням електромагнітного поля збудження на цій частоті. Для цієї частоти найменший дефект завглибшки 0,1 мм можна виявити через діелектричний покрив завтовшки 2,5 мм. Дефект завглибшки 2,0 мм можна виявити через покрив завтовшки 5,0 мм. Отримані діаграми (рис. 6) дозволяють оцінити поріг чутливості вибраних ВСП і робочих частот у випадках, коли дефекти необхідно виявляти через діелектричний покрив відомої товщини. В інших випадках товщину захисного покриття необхідно виміряти (наприклад, вихрострумовим товщиноміром [1]).

**3. Підвищення продуктивності контролю на основі розробки багатоелементних ВСП.** Збільшення продуктивності контролю важливе для зменшення виробничих витрат, так як НК великогабаритних конструкцій вимагає багато часу через відносно малий розмір ВСП, необхідний для чутливого та надійного контролю. У деяких випадках для підвищення продуктивності контролю використовують ВСП з видовженими зонами чутливості. Але такі ВСП не забезпечують вимог щодо чутливості через дуже низьку роздільну здатність. Найкращої продуктивності можна досягнути за допомогою застосування ВС систем контролю з багатоелементним ВСП, елементи якого мультиплексуванню по чергово підключаються до дефектоскопу [17, 18]. Але такі системи є дуже дорогими та складними для перестроювання для НК виробів різної форми. Нашою метою було створити багатоелементний ВСП, що відрізняється високою чутливістю та просторовою роздільною здатністю у поєднанні з розширеною зоною контролю та можливістю роботи з недорогими одноканальними ВС дефектоскопами.

В результаті розроблено новий багатоелементний ВСП трансформаторного типу (названий нами EDDYLINE), який складається із 5 окремих ВСП, з'єднаних за допомогою спеціальної комутаційної схеми. Схему контролю за допомогою такого ВСП подано на рис. 7, де: 1 – багатоелементний ВСП; 2...6 – окремі ВСП; 7 – комутаційна схема; 8 – кабель; 9 – вихрострумовий дефектоскоп; 10 – ОК; 11 – тріщина. Усі окремі ВСП реалізовано за схемою ВСП подвійного диференціювання, що дозволяє отримати високу чутливість (у тому числі під час контролю через

діелектричний покрив) у поєднанні з низьким рівнем завад. Таке технічне рішення забезпечує зону чутливості довжиною приблизно 60 мм. В той же час досягнуто високу роздільну здатність, так як кожний окремий ВСП працює незалежно, як і до з'єднання в загальний блок.



**Рисунок 7 – Схема побудови п'ятиелементного ВСП трансформаторного типу EDDYLINE**

Дослідження багатоелементного ВСП проведено на зразку зі сталі Ст 45 з штучними дефектами типу тріщина завглибшки 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 і 2,0 мм (рис. 2). На рис. 8а подано сигнали трансформаторного багатоелементного ВСП для випадку, коли тільки один окремий ВСП проходить через зону штучних тріщин завглибшки 0,1 і 0,2 мм, а інші чотири окремі ВСП знаходяться за межами зразка (у «повітрі»). Наступні дефектограми (рис. 8б і 8в) показують сигнали, коли, відповідно, два або три окремих ВСП проходять зону цих дефектів одночасно. Подані результати показують, що можливий ефект «самокомпенсації» для довгих дефектів відсутній. Навпаки, кожний додатковий ВСП, який пересікає зону видовженого дефекту, збільшує амплітуду сигналу від дефекту пропорційно до кількості таких ВСП.

Розроблений багатоелементний ВСП трансформаторного типу успішно використано для виявлення поверхневих тріщин великогабаритних поковок і зварних трубних конструкцій із феромагнітних і аустенітних сталей [19]. Такі дефекти у поковках, зазвичай, виявляють ультразвуковим, МП або ВС методами. Наш практичний досвід показав, що найнадійніші результати можна отримати ВС

методом з застосуванням ВСП подвійного диференціювання. Багатоелементний ВСП типу EDDYLINE використовували з дефектоскопом типу ELOTEST B300 німецької фірми Rohmann GmbH. Для настроювання із матеріалу поковок виготовлено стандартний зразок з штучними електроерозійними дефектами довжиною 10 мм

завглибшки 0,2; 0,3 і 0,5 мм (рис. 9а). На рис. 9б представлено сигнали в комплексній площині екрану дефектоскопа ELOTEST B300 від найменшого дефекту глибиною 0,2 мм у феромагнітній сталі та сигнал від зміни зазору (підйому ВСП на висоту більше 50 мм) на робочій частоті 200 кГц.

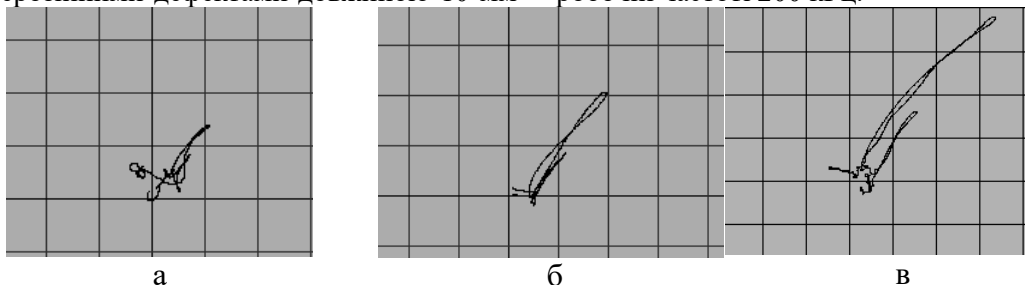


Рисунок 8 - Сигнали п'ятиелементного ВСП під час взаємодії з тріщиною завглибшки 0,1 і 0,2 мм 1-го (а), 2-х (б) та 3-х (в) окремих ВСП

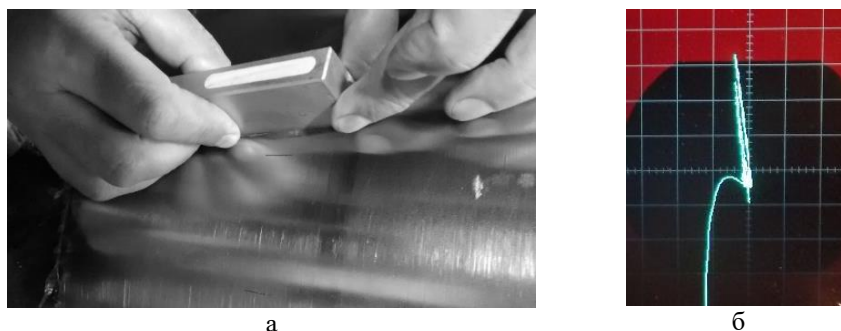


Рисунок 9 – Багатоелементний ВСП типу EDDYLINE на зразку у вигляді фрагменту поковки (а) та сигнали (б) від дефекту завглибшки 0,2 мм (вниз) і зміни зазору (вгору)

Представлені на рис. 9 результати демонструють високу чутливість з можливістю чіткого розрізнення сигналів від дефектів та сигналів від зміни зазору ВСП під час сканування за їх різним напрямком у комплексній площині, що дає суттєве підвищення достовірності контролю. ВСП типу EDDYLINE були успішно використані для контролю великогабаритних поковок з використанням дефектоскопа типу ELOTEST B300, що дозволило збільшити продуктивність ручного контролю в 4... 5 разів.

#### Висновки.

Проаналізовано особливості ВС методів дефектоскопії виробів із феромагнітних сталей. Представлено селективні ВСП подвійного диференціювання, які характеризуються, зокрема: високою чутливістю до видовжених (типу тріщина) та до локальних (типу пітинг або пори) дефектів; високою чутливістю до

дефектів під час контролю через шар діелектричного покриття.

Представлено результати досліджень, пов'язаних із використанням ВСП подвійного диференціювання для виявлення дефектів через шар діелектричного покриття без його видалення. Для оцінювання можливості виявляти дефекти через шар антикорозійного діелектричного покриття запропоновано спеціальні діаграми, які визначають залежність граничної товщини діелектричного покриття від глибини дефекту, що необхідно виявити.

Для ВС контролю великогабаритних об'єктів розроблено багатоелементний ВСП типу EDDYLINE, який забезпечує можливість роботи з одноканальними ВС дефектоскопами. Це дозволило збільшити до 60 мм ширину зони чутливості, що забезпечує високу продуктивність контролю. ВСП типу EDDYLINE були успішно використані, зокрема,



для контролю поковок з використанням дефектоскопа типу ELOTEST В300, що дозволило збільшити продуктивність ручного контролю у 4...5 разів.

#### Список використаних джерел

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. Посібник. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Осташ, В.М. Федірко, В.М. Учанін та ін. Львів: Сполум, 2007. 1068 с.

2. Zolfaghari A., Zolfaghari A. and Kolahan F. Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the surface cracks of welded components. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2018. Vol. 33. №3. P. 290-300.

3. Goldberg L. The use of Eddy Current for Ferritic Weld Testing in Nuclear Power plants/ *Materials Evaluation*. 2003. № 12. P. 274-1278.

4. Udpa, S.S., More P.O., eds. (2004). *Nondestructive testing handbook* (third edition), Vol. 5, Electromagnetic testing. American Society for NDT.

5. Uchanin, V.M. Eddy-current flaw detection in structural elements. *Materials Science*. 2006. 42. 494-501. doi.org/10.1007/s11003-006-0106-5.

6. Lutcenko G., Uchanin V., Mischenko V., Opanasenko A. Eddy Currents Versus Magnetic Particles. Proc. 18th World Conf. on Nondestructive Testing, 2012. Durban Код доступу: <http://www.ndt.net>.

7. Blitz, J., Oaten S.R. and Hajian, N.T. The testing of ferromagnetic metals with eddy-currents. *Nondestructive Testing Communications*. 1986. №2. P. 189-200.

8. Patent U.S. № 3952315. Eddy current discontinuity probe utilizing a permanent magnet bobbin with at least one A.C. energized coil mounted in a groove thereon Cecco V.S., 1976.

9. Cecco V. S. Design and specifications of a High Saturation Absolute Eddy Current Probe with internal reference. *Materials Evaluation*. 1979. Vol. 37. № 13. P. 51-58.

10. ASTM E309-16. Standard Practice for Eddy Current Examination of Steel Tubular Products Using Magnetic Saturation. 2016. ASTM International.

11. Патент України № 60751. Вихрострумний перетворювач для контролю

конструкцій із ферромагнітних матеріалів // В. Учанін, 2011.

12. Учанін В.М. Накладні вихрострумні перетворювачі подвійного диференціювання. Львів: Сполум, 2013. 268 с.

13. Uchanin, V., Mook, G., Stepinski, T. (2002). "The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing." Proc. 8<sup>th</sup> European Conf. for Nondestructive Testing. Barcelona. Код доступу: <http://www.ndt.net>.

14. Mook G., Hesse J., Uchanin V. Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. *Materials Testing*. 2007. Vol. 49, № 5. P. 258-264. doi.org/10.3139/120.100810.

15. Uchanin V., Lutsenko G., Dzhaganian A., Opanasenko A. The application of eddy current section in automated system for combined railway rolling stock axles inspection. 10 European Conf. on Nondestructive Testing. June 7-10 2010, Moscow. Код доступу: <http://www.ndt.net>.

16. Uchanin V., Lutsenko G., Dzhaganian A., Nikonenko A. Eddy Current Inspection of Steel Castings with Roughly Finished Surfaces. 10 European Conf. on Nondestructive Testing. June 7-10 2010, Moscow. Код доступу <http://www.ndt.net>.

17. Bureau J.-F., Ward R.C., Julien A. Application of eddy current array technology to surface inspection. 18<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. 2012. Durban, South Africa. Код доступу: <http://www.ndt.net>.

18. International Standard ISO 20339:2017 (E). Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification. Geneva: ISO/TC 135/SC 4, 2017.

19. Uchanin V., Nardoni G. Detection of cracks in ferrous steel structures: new innovative eddy current techniques. *Procedia Structural Integrity*. 2019. 16. P. 198-204. doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.041.

#### References

1. Fracture mechanics and strength of materials. Vol. 9: Strength and durability of airplane materials and structural elements / O.P. Ostash, V.M. Fedirko, V.M. Uchanin et al. Lviv: Spolom, 2007. 1068 p. (in Ukrainian).

2. Zolfaghari A., Zolfaghari A. and Kolahan F. Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the surface

cracks of welded components. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2018. Vol. 33. №3. P. 290-300.

3. Goldberg L. The use of Eddy Current for Ferritic Weld Testing in Nuclear Power plants. *Materials Evaluation*. 2003. № 12. P. 274-1278.

4. Udpa, S.S., More P.O., eds. (2004). *Nondestructive testing handbook* (third edition), Vol. 5, Electromagnetic testing. American Society for NDT.

5. Uchanin, V.M. Eddy-current flaw detection in structural elements. *Materials Science*. 2006. 42. – 494-501. doi.org/10.1007/s11003-006-0106-5.

6. Lutcenko G., Uchanin V., Mischenko V., Opanasenko A. Eddy Currents Versus Magnetic Particles. Proc. 18th World Conf. on Nondestructive Testing, 2012. Durban. Kod dostupu: <http://www.ndt.net>.

7. Blitz, J., Oaten S.R. and Hajian, N.T. The testing of ferromagnetic metals with eddy-currents. *Nondestructive Testing Communications*. 1986. № 2. P. 189-200.

8. Patent U.S. № 3952315. Eddy current discontinuity probe utilizing a permanent magnet bobbin with at least one A.C. energized coil mounted in a groove thereon // Cecco V.S., 1976.

9. Cecco V. S. Design and specifications of a High Saturation Absolute Eddy Current Probe with internal reference. *Materials Evaluation*. 1979. Vol. 37. № 13. P. 51-58.

10. ASTM E309-16. Standard Practice for Eddy Current Examination of Steel Tubular Products Using Magnetic Saturation. 2016. ASTM International.

11. Patent № 60751, Ukraine. Eddy current probe for inspection of ferromagnetic steel structures // V. Uchanin, 2011 (in Ukrainian).

12. Uchanin V.M. Surface eddy current probes of double-differential type. Lviv:Spolom, 2013. – 268 p. (in Ukrainian).

13. Uchanin, V., Mook, G., Stepinski, T. (2002). “The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing.” Proc. 8<sup>th</sup> European Conf. for Nondestructive Testing. Barcelona. Kod dostupu: <http://www.ndt.net>.

14. Mook G., Hesse J., Uchanin V. Deep Penetrating Eddy Currents and Probes // *Materials Testing*. – 2007. – Vol. 49, № 5. – P. 258-264. Kod dostupu: [doi.org/10.3139/120.100810](https://doi.org/10.3139/120.100810).

15. Uchanin V., Lutsenko G., Dzhaganian A., Opanasenko A. The application of eddy current section in automated system for combined railway rolling stock axles inspection. 10 European Conf. on Nondestructive Testing. June 7-10 2010, Moscow. Kod dostupu: <http://www.ndt.net>.

16. Uchanin V., Lutsenko G., Dzhaganian A., Nikonenko A. Eddy Current Inspection of Steel Castings with Roughly Finished Surfaces. 10 European Conf. on Nondestructive Testing. June 7-10 2010, Moscow. Kod dostupu <http://www.ndt.net>.

17. Bureau J.-F., Ward R.C., Julien A. Application of eddy current array technology to surface inspection. 18<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. 2012. Durban, South Africa. Kod dostupu: <http://www.ndt.net>.

18. International Standard ISO 20339:2017 (E). Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification. Geneva: ISO/TC 135/SC 4, 2017.

19. Uchanin V., Nardoni G. Detection of cracks in ferrous steel structures: new innovative eddy current techniques. *Procedia Structural Integrity*. 2019. 16. P. 198-204. [doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.041](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.041)