

## ГРАНИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТРІЩИН У ФЕРОМАГНЕТНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ЧЕРЕЗ ПРОТИКОРОЗІЙНЕ ПОКРИТТЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИХРОСТРУМОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА НА БАЗІ СМАРТФОНА

В. М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

Виявлення тріщин у феромагнетних сталях вихрострумовим методом часто обмежене через додаткові завади, пов'язані з магнетною та структурною неоднорідністю, а особливо, коли необхідно виявити тріщини через шар діелектричного протикорозійного покриття. Перспективний підхід до розв'язання проблеми побудовано на використанні селективних вихрострумових перетворювачів (ВСП), до яких належать ВСП подвійного диференціювання. Однією їх особливістю є можливість знаходження прихованих дефектів, зокрема через шар діелектричного протикорозійного покриття. Досліджено граничні можливості виявлення тріщин за допомогою вдосконаленого низькочастотного ВСП подвійного диференціювання діаметром 15 мм та вихрострумового дефектоскопа (ВД) на базі смартфона. Показано можливість виявляти грубі тріщини через протикорозійне діелектричне покриття завтовшки до 25 мм. Розглянуто принцип побудови ВД на базі смартфона із використанням застосунку EddySmart, який може забезпечити дистанційний контроль конструкцій з феромагнетних сталей з бездротовим передаванням результатів контролю каналами мобільного зв'язку та використанням автономних автоматизованих сканерів.

**Ключові слова:** феромагнетна сталь, протикорозійне діелектричне покриття, вихрострумовий перетворювач подвійного диференціювання, вихрострумовий дефектоскоп, смартфон.

## LIMITING POSSIBILITIES OF DETECTING CRACKS IN FERROMAGNETIC STRUCTURES THROUGH AN ANTI-CORROSION COATING USING A SMARTPHONE BASED EDDY CURRENT FLAW DETECTOR

V. M. Uchanin

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

Detection of cracks in ferromagnetic steel structures by the eddy current method is often limited by additional noise associated with magnetic and structural heterogeneity, especially when it is necessary to detect structural cracks through a layer of dielectric anti-corrosion coating. A promising approach to problem solution is based on the use of selective eddy current probes, which include the eddy current probes of double differential type. One of the features of such eddy current is the possibility of detecting hidden defects even through a layer of dielectric anti-corrosion coating. In this paper, the limiting possibilities of crack detection using an improved low-frequency eddy current probe of double-differential type with a diameter of 15 mm and a smartphone based eddy current flaw detector were investigated. This probe provides a high depth of penetration necessary to detect defects under the dielectric coating. The greater depth of penetration of this probe is achieved by increasing the diameter of the windings, the distance between them and the number of turns. The research was carried out using a rectangular specimen, in which a large crack (or through wall structure fracture) was simulated by a joint of two identical polished rectangular parts. The assembled specimen was covered with dielectric plates of different thicknesses up to 25 mm thick to simulate anti-corrosion coating of different thicknesses. It is

© В. М. Учанін, 2024

shown, in particular, the possibility of detecting large cracks or structural fractures through an anti-corrosion dielectric coating up to 25 mm thick. The principle of design of an eddy current flaw detector based on a smartphone using the EddySmart application, which can provide remote control of ferromagnetic steel structures with wireless transmission of inspection results via mobile communication channels and the use of autonomous automated scanners, is considered.

**Keywords:** *ferromagnetic steel, anti-corrosion dielectric coating, eddy current probe of double differential type, eddy current flaw detector, smartphone.*

**Вступ.** Феромагнетні сталі широко використовують у багатьох відповідальних конструкціях, до яких належать великогабаритні резервуари та трубопроводи для зберігання і транспортування нафти чи газу, корпуси суден, залізничні осі або колеса, вали турбін тощо. Експлуатаційні дефекти, зокрема втомні та стрескорозійні тріщини, можуть суттєво зменшити надійність конструкцій та стати причиною небезпечних та вартісних аварій. Тому необхідно своєчасно їх виявляти та здійснювати експлуатаційний моніторинг конструкцій засобами неруйнівного контролю (НК), зокрема зі застосуванням систем дистанційного моніторингу з використанням бездротових технологій.

**Стан проблеми.** Для НК виробів із феромагнетних сталей широко використовують магнетопорошковий (МП) метод, який має високу чутливість до поверхневих дефектів та порівняно просту процедуру контролю [1, 2]. Але МП метод дефектоскопії має низьку продуктивність через трудомісткі операції попереднього очищення поверхні, намагнечування деталі, нанесення та видалення магнетної суспензії чи порошку та обов'язкового розмагнечування. Проблеми застосування МП методу суттєво зростають для контролю конструкцій, покритих протикорозійними діелектричними покриттями (ДП) завтовшки  $> 0,3$  мм, що актуалізує пошук надійних методів виявлення дефектів феромагнетних сталей.

Чутливість під час дефектоскопії феромагнетних сталей вихрострумовим методом часто обмежена через специфічні завади, пов'язані з магнетною та структурною неоднорідністю [3–7]. Також вона суттєво зменшується у ситуаціях, коли НК необхідно здійснювати через шар протикорозійного ДП без його видалення. Один із можливих способів зменшення впливу характерних завод базується на додатковому намагнечуванні контрольованої зони для мінімізації дії магнетної неоднорідності [8–10]. Інший підхід полягає у використанні селективних вихрострумових перетворювачів (ВСП), зокрема ВСП подвійного диференціювання [11–13]. Вони характеризуються специфічним квазіабсолютним сигналом з максимальною амплітудою, коли ВСП знаходиться безпосередньо над тріщиною. Їх особливістю є висока чутливість до видовжених (типу тріщина) та локальних (типу пітинг або пора) поверхневих і прихованих дефектів, зокрема, під час контролю через захисний ДП. Приклад їх застосування у складі вихрострумового дефектоскопа (ВД) типу EDDYMAX (фірма Test Maschinen Technik GmbH, Швармштедт, Німеччина) подано на рис. 1, де зображено сигнали ВСП типу МДФ1202  $\varnothing 12$  мм від тріщини завглибшки 0,5 мм в сталі 45 під час контролю через ДП завтовшки 7 мм на робочій частоті 100 кГц [12]. Видно, що ВСП діаметром усього 12 мм може надійно виявляти такі дефекти. Співвідношення сигнал/завада тут суттєво перевищують 12 дБ, тобто цей випадок не дає уявлення про граничні можливості цього ВСП. Звідси можна зробити припущення, що гранична товщина ДП для виявлення такого дефекту може бути ще більшою.

Раніше [13] можливість виявлення тріщин через протикорозійний ДП досліджували з використанням зразка із феромагнетної сталі СТ45 з гладкою А ( $R_a - 1,25$  мкм) і шорсткою В ( $R_z - 160$  мкм) поверхнями зі штучними електроерозійними дефектами у вигляді пазів 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). Але в цій праці, крім ВСП типу МДФ 1201, досліджували

також ВСП типу МДФ 0601 з діаметром робочої поверхні 6,0 мм. Отримані результати показують, що ВСП типу МДФ 1201 може виявляти дефекти завглибшки 0,5 мм через ДП завтовшки 5,0 мм, а ВСП типу МДФ 0601 меншого діаметра може виявляти тріщини завглибшки 0,2 мм через ДП завтовшки 2,5 мм. Звідси можна зробити припущення, що ВСП більшого діаметра дає змогу виявляти дефекти через ДП більшої товщини. Вибір діаметра ВСП важливий для забезпечення високої роздільної здатності, яка краща у ВСП меншого діаметра. Також запропоновано і реалізовано принцип побудови спеціальних діаграм для оцінювання граничних товщин діелектричного покриття для виявлення дефектів залежно від їх глибини для різних робочих частот. Крім того, подано багатоелементний ВСП типу EDDYLINE для контролю об'єктів із великими габаритними розмірами, який має зону чутливості завширшки 60 мм. При цьому забезпечена висока локальність контролю, оскільки всі ВСП працюють незалежно.

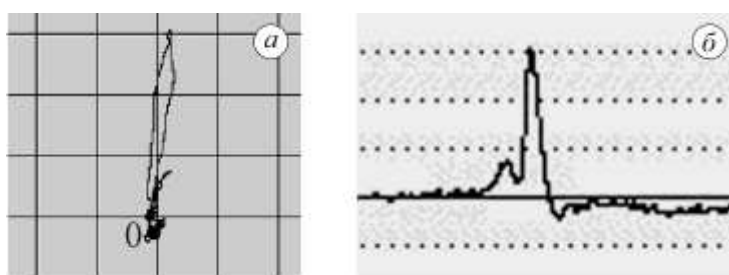


Рис. 1. Сигнали ВСП типу МДФ 1201 у комплексній площині (а) і з часовою розгорткою (б) від тріщини завглибшки 0,5 мм за контролю через діелектричну пластину завтовшки 7 мм.

Для створення систем дистанційного моніторингу з бездротовим передаванням результатів перспективним є використання систем НК на основі кишенькових смартфонів, які відрізняються від звичайних мобільних телефонів відкритою для розробки програмного забезпечення операційною системою, а також мають риси персонального комп'ютера з достатньо потужними процесорами та постійною і оперативною пам'яттю [14–20]. Зокрема, у Київському політехнічному інституті ім. Ігоря Сікорського створено ультразвуковий дефектоскоп, який складається із електронного блока з ультразвуковим сенсором та смартфона [14, 15]. Обмін інформацією між складниками відбувається за допомогою бездротових мереж, які використовують технологію “bluetooth”. Алгоритм роботи дефектоскопа реалізовано за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке працює в середовищі операційної системи Android. Подібний підхід реалізовано у розробці фірми LECOEUR ELECTRONIQUE (Франція) [16].

Успішною реалізацією приладу НК на основі смартфона є ВД зі застосунком EddySmart [21, 22], який розглядають як перспективну інноваційну технологію в межах концепції НК 4.0 та який дає можливість забезпечити дистанційний автономний контроль великогабаритних конструкцій (зокрема у небезпечних радіаційно забруднених середовищах) з бездротовим передаванням результатів моніторингу для подальшого аналізу та зберігання [23]. Основні функції ВД на базі смартфона з використанням узагальненої функціональної схеми з ВСП трансформаторного типу розглянуто в праці [22]. Він повинен створювати первинне синусоїдальне електромагнетне поле керованої робочої частоти, тобто забезпечувати достатній рівень струму в генераторній обмотці ВСП для виникнення вихрових струмів в електропровідному об'єкті контролю (ОК). У результаті утворюється результуюче електромагнетне поле ОК, яке формує сигнал у вимірювальній обмотці ВСП зі складовими, які обумовлені сигналом небалансу ВСП та дією дефекту в ОК під час сканування його поверхні. Дефекти перерозподіляють вихрові стру-

ми, змінюючи вхідний і модулюючи вихідний сигнал ВСП під час сканування поверхні ОК. Для демодуляції сигналу вихідний сигнал ВСП після підсилення надходить на фазочутливі детектори, формуючи на їх виході сигнали, які відповідають реальній і уявній компонентам вихідного сигналу ВСП. ВД повинен мати в складі також схему компенсації сигналу небалансу ВСП і фільтри нижніх (НЧ) або верхніх (ВЧ) частот з можливістю регулювання частоти зрізу. Під час компенсації небалансу ВСП реальна та уявна компоненти сигналу позбуваються складових, які відповідають положенню ВСП на бездефектній частині ОК. Для забезпечення контролю у комплексній площині необхідно її обернути на кут від 0 до 360°. Далі компоненти сигналу надходять на дисплей ВД, який відображає зміни сигналу ВСП під час сканування у комплексній площині (режим  $Y/X$ ) або зміни реальної або уявної складових сигналу ВСП у режимі часової розгортки (режим  $Y/t$  або  $X/t$ ). Звукова система смартфона дозволяє реалізувати ВД з описаними вище функціями без додаткових блоків на відміну від ультразвукових систем на основі смартфона, коли в окремому блоці є додаткові генератори та елементи схеми обробки сигналів [14, 15]. Аудіоінтерфейс смартфона дає змогу одночасно передавати і приймати сигнали частотою до 20 кГц. ВСП підключається до аудіороз'єму смартфона за допомогою кабелю з електронною схемою імітації роботи гарнітури.

Розроблений ВД передбачає використання смартфона з операційною системою Android та спеціального програмного застосунку EddySmart, який реалізує фоновий процес без участі оператора-дефектоскопіста, а також формує інтерфейс користувача. Фоновий процес одночасно обробляє буфери сигналів збудження і вимірювання. Вихідний сигнал відокремлюється та демодулюється стосовно сигналу збудження ВСП. Інтерфейс користувача реалізує керування вибором параметрів роботи ВД, зокрема підсилення та обертання сигналів у комплексній площині та частоти зрізів ВЧ та НЧ фільтрів за допомогою сенсорного екрану, а також індикацію отриманих сигналів на дисплеї. Таким чином, більшість функцій ВД реалізовано програмним способом. На рис. 2 подано зовнішній вигляд дисплея смартфона зі застосунком EddySmart зі сигналом від дефекту у комплексній площині – режим  $Y/X$  (рис. 2а) та у режимі часової розгортки – режим  $Y/t$  (рис. 2б).

Верхній рядок дисплея показує рівень аудіосигналу, який регулюють відповідною кнопкою смартфона, а також рівень підсилення, кут повороту комплексної площини, робочої частоти та частоти зрізів НЧ і ВЧ фільтрів. Більша частина дисплея смартфона призначена для індикації отриманих сигналів, яка може відображати годографи сигналів від дефектів у комплексній площині або відповідні сигнали в режимі часової розгортки. Вона також призначена для регулювання підсилення і повороту комплексної площини, яку оператор реалізує, маніпулюючи сенсорним екраном. Нижня третина сенсорного дисплея призначена для вибору режимів і параметрів контролю відповідними кнопками, а саме: вибір робочої частоти ( $F_{\text{req}}$  – ліва верхня), перемикання на режим часової розгортки ( $Yt$ -mode) – ліва нижня), увімкнення підсилення (Gain dB – верхня у середньому ряду), вибір частоти зрізу фільтра високих частот (High Hz – середня), операції відміни (Default – нижня в середньому ряду), вибору фази (Phase – верхня у правому ряду), вибір частоти зрізу фільтра низьких частот (Low Hz – середня у правому ряду) і вибір режиму запису або очищення екрану (Record або Clear – нижня у правому ряду).

Тут оцінено граничні можливості вдосконаленого низькочастотного ВСП подвійного диференціювання діаметра 15 мм за його підключення до ВД на базі смартфона щодо виявлення тріщин конструкцій із феромагнетних сталей через ДП.

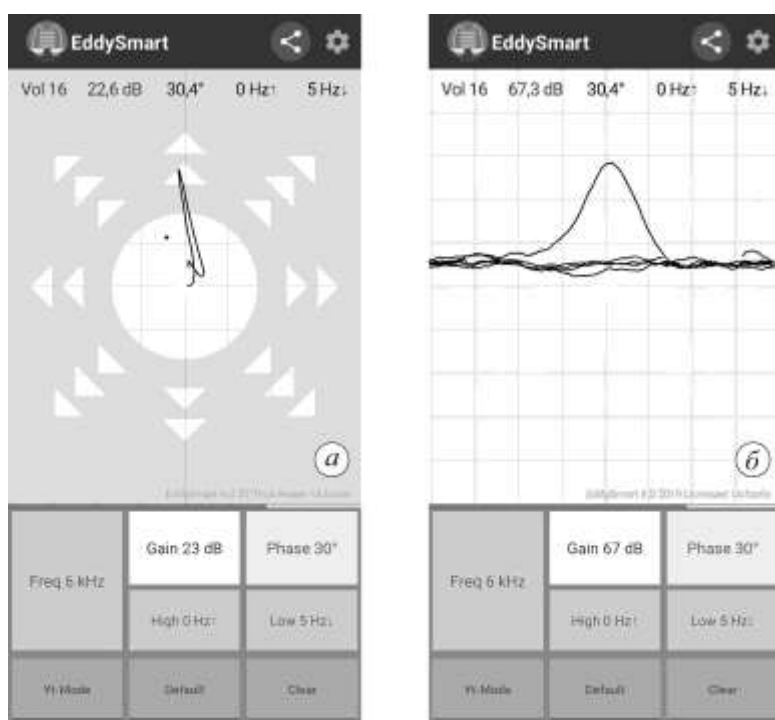


Рис. 2. Сигнал від дефекту зразка складеного типу у комплексній площині за безпосереднього контакту з контрольованою поверхнею (а) та в режимі часової розгортки через ДП завтовшки 22 мм (б).

**Досліджуваний ВСП, зразок та методика досліджень.** Досліджували експериментальний зразок вдосконаленого низькочастотного ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1501М з діаметром робочої поверхні 15 мм (рис. 3). Його перевагою порівняно з попередніми розробками [11–13] є можливість роботи на низьких робочих частотах (до 100 Гц), що забезпечує більшу глибину контролю, необхідну для виявлення глибоко залягаючих дефектів, зокрема під шаром ДП. Більшу глибину контролю цього ВСП досягають збільшенням діаметра обмоток, відстані між ними та кількості витків. Параметри ВСП типу МДФ 1501М такі: діаметр ВСП  $D_{ВСП} = 15$  мм; діаметр феритового осердя  $D_{\phi} = 4,0$  мм, кількість витків обмотки збудження і вимірювальної обмотки  $w_{O3} = 295$  і  $w_{BO} = 820$ , відповідно.



Рис. 3. Досліджуваний ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1501 з кабелем для підключення до смартфона з блоком імітації гарнітури.

Досліджували, використовуючи прямокутний складений зразок з осьової сталі [24] розмірами 100×160 мм завтовшки 22 мм, в якому грубу тріщину (або наскрізне руйнування) імітували щільним стиком двох однакових відшліфованих прямокутних частин. Складений зразок накривали діелектричними пластинами

різних товщин (загалом до 25 мм) для імітації протикорозійного ДП. Як зазначали вище, ВД на основі смартфона дає змогу реєструвати сигнали ВСП як у комплексній площині у вигляді годографів (рис. 2а), так і в режимі часової розгортки (рис. 2б). У цьому дослідженні сигнали реєстрували у комплексній площині дисплея смартфона, скануючи зразок зі сторони ДП зі збереженням оптимальної орієнтації ВСП [11]. При цьому поворотом комплексної площини годограф сигналу від дефекту орієнтовано приблизно у вертикальному напрямку. Сигнали досліджували на робочій частоті 6 кГц, яка для цього дефекту виявилась оптимальною. Зі збільшенням товщини ДП змінювали чутливість для реєстрації годографів у межах дисплея. Отримані сигнали порівнювали зі сигналом за безпосереднього контакту ВСП з контрольованою поверхнею зразка (рис. 2а), який отримано за чутливості 23 дБ. Амплітуду сигналу оцінювали за поділками дисплея з врахуванням чутливості каналу для цього сигналу (коефіцієнт підсилення).

**Аналіз сигналів ВСП від дефекту у феромагнетному зразку під час контролю через шар діелектричного покриття.** На рис. 4 подано годографи сигналів ВСП типу МДФ 1501М від дефекту феромагнетного зразка, які отримано за безпосереднього контакту з поверхнею металу (рис. 4а) та під час контролю через діелектричну накладку завтовшки 5 (рис. 4б); 11 (рис. 4в); 22 (рис. 4г); 24 (рис. 4д) та 25 мм (рис. 4е). Коефіцієнти підсилення для дефектів, виявлених через ДП різної товщини, подано у прямокутних рамках. Годограф сигналу на рис. 4а відповідає зображенню дисплея на рис. 2а.

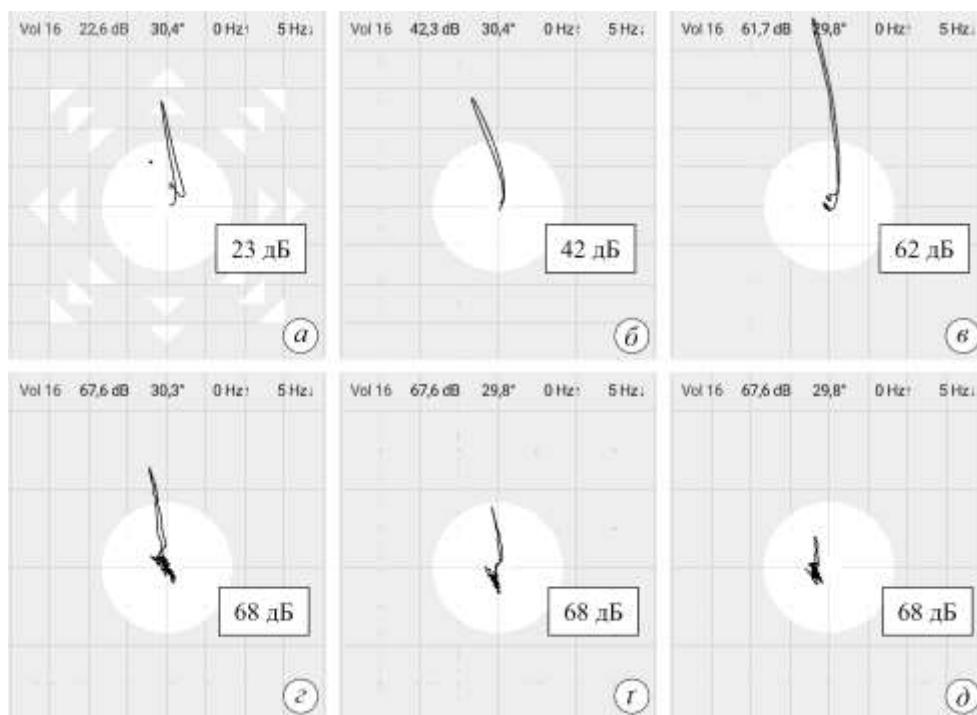


Рис. 4. Годографи сигналів ВСП типу МДФ 1501М на робочій частоті 6 кГц від дефектів за безпосереднього контакту з поверхнею зразка (а) та під час контролю через ДП завтовшки 5 (б); 11 (в); 22 (г); 24 (д) та 25 мм (е).

Аналіз сигналів ВСП на рис. 4 показує, що ВСП типу МДФ 1501М може виявляти грубі тріщини або руйнування стінок конструкцій із феромагнетних сталей навіть через ДП завтовшки 25 мм, оскільки амплітуда сигналу від такого дефекту достатньо чітко виділяється на фоні завад (рис. 4е) із співвідношенням сигнал/завада  $\approx 6$  дБ. Усі годографи сигналу від дефекту мають характерний для

ВСП подвійного диференціювання “квазіабсолютний” характер з максимальною амплітудою під час положення ВСП безпосередньо над дефектом. Зазначимо, що амплітуда сигналу під час контролю через ДП завтовшки 25 мм (рис. 4д) становить усього 0,25% від амплітуди сигналу від дефекту за безпосереднього контакту з поверхнею металевого зразка (рис. 4а).

Амплітуда сигналу від дефекту різко зменшується зі збільшенням товщини ДП (рис. 5, де амплітуду сигналу від дефекту з різною товщиною ДП приведено до амплітуди сигналу від дефекту за безпосереднього контакту з контрольованою поверхнею). Видно також, що зі збільшенням товщини ДП і, відповідно, чутливості каналу ВД починають проявлятися електронні завади навіть за використання фільтра низьких частот з частотою зрізу 5 Гц. Зазначимо, що сучасні універсальні ВД мають кращу завадозахищеність та характеристики фільтрів, ніж представлений ВД на базі смартфона, що в перспективі дозволить отримати вищі результати щодо виявлення дефектів через ДП за дії аналогічних завад.

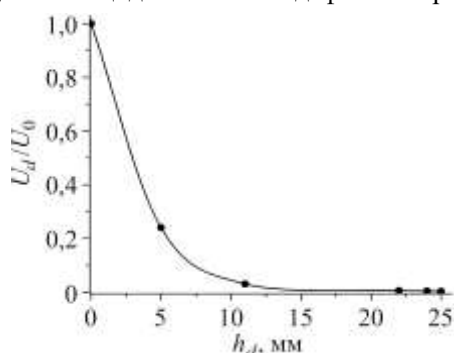


Рис. 5. Зміна приведеної амплітуди сигналу від дефекту  $U_d/U_0$  залежно від товщини  $h_d$  ДП.

Порівняння отриманих результатів для ВСП типу МДФ 1501М ( $D_{ВСП} = 15$  мм) з даними попередніх публікацій [12, 13], де подано аналогічні дослідження для ВСП типу 1201 з діаметром 12 мм (рис. 1а) і ВСП типу 0601 ( $D_{ВСП} = 6$  мм), показує, що збільшення діаметра ВСП і, відповідно, діаметра обмоток і відстані між ними, дає змогу підвищити граничні товщини ДП, через які можуть виявлятися дефекти. Зазначимо, що ці результати отримано для тріщин, довжина яких щонайменше удвічі перевищує діаметр ВСП, що дає змогу знехтувати впливом довжини на чутливість. Тут існує прив'язка до розмірів зони чутливості ВСП, яка за приблизною оцінкою становить  $0,8D_{ВСП}$  і корелюється з роздільною здатністю ВСП. Це означає, що ВСП меншого діаметра виявлятиме коротші тріщини, на що необхідно зважати під час розробки методики вихрострумовеї НК з врахуванням бракувальних критеріїв для конкретної конструкції.

### ВИСНОВКИ

Подано результати досліджень, пов'язаних із використанням ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1501М для виявлення дефектів через шар діелектричного покриття без його видалення. Визначено граничні можливості виявлення грубих дефектів або руйнувань стінок конструкцій із феромагнетних сталей за допомогою ВСП подвійного диференціювання за підключення до ВД на базі смартфона. Використання смартфона для створення засобів вихрострумовеї дефектоскопії може стати основою для бездротових технологій для дистанційного виявлення дефектів з використанням автономних автоматизованих сканерів, що особливо важливо у небезпечних середовищах та за радіаційного забруднення. Показано, що технологія вихрострумовеї контролю на базі вдосконаленого ВСП дає змогу знаходити дефекти сталевих конструкцій через шар ДП завтовшки до 25 мм на робочій частоті 6 кГц.

1. *Aerospace NDT: ASNT Industry Handbook*. Bossi, R.H., Ed.; The American Society for Nondestructive testing, 2014.

2. Zolfaghari, A.; Zolfaghari, A.; Kolahan, F. Reliability and sensitivity of magnetic particle non-destructive testing in detecting the surface cracks of welded components. *Nondestructive Testing and Evaluation*. **2018**, 33(3), 290–300. <https://doi.org/10.1080/10589759.2018.1428322>
3. Goldberg, L. The use of Eddy Current for Ferritic Weld Testing in Nuclear Power plants. *Materials Evaluation*. **2003**, 12, 1274–1278.
4. *Nondestructive testing handbook*, 3rd ed.; Vol. 5, Electromagnetic testing, Udpa, S.S., More, P.O., Eds.; American Society for NDT, 2004.
5. Uchanin, V.; Nardoni, G. Detection of cracks in ferrous steel structures: new innovative eddy current techniques. *Procedia Structural Integrity*. **2019**, 16, 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.041>
6. Blitz, J.; Oaten, S.R.; Hajian, N.T. The testing of ferromagnetic metals with eddy-currents. *Nondestructive Testing Communications*. **1986**, 2, 189–200. <https://doi.org/10.1080/10589758608952927>
7. Cecco, V. S.; Carter, J. R.; Sullivan, S. P. An Eddy Current Technique for Detection and Sizing Surface Cracks in Carbon Steel. *Materials Evaluation*. **1993**, 51(5), 572–577.
8. ASTM International. *Standard Practice for Eddy Current Examination of Steel Tubular Products Using Magnetic Saturation*; ASTM E309-16; 2016.
9. Cecco, V. S. Design and specifications of a High Saturation Absolute Eddy Current Probe with internal reference. *Materials Evaluation*. **1979**, 37(13), 51–58.
10. Cecco, V. S. *Eddy current discontinuity probe utilizing a permanent magnet bobbin with at least one A.C. energized coil mounted in a groove thereon*. US 3952315, 1976.
11. Uchanin, V. Surface eddy current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems. *The Paton Welding Journal*. **2023**, 2, 46–55. <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.02.07>
12. *Fracture mechanics and strength of materials: Handbook*. Strength and durability of airplane materials and structural elements, Vol. 9; Ostash, O., Fedirko, V., Eds.; Spolom, 2007. (in Ukrainian).
13. Uchanin, V.; Ivashenko, K. Detection of defects in ferromagnetic steel structures through an anticorrosion coating layer without removing. *Methods and devices for quality control*. **2021**, 1(46), 5–14. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1\(46\)-5-14](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1(46)-5-14) (in Ukrainian).
14. Petryk, V.; Protasov, A.; Galagan, R.; Muraviov, A.; Lysenko, I. Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices. *Devices and Methods of Measurements*. **2020**, 11(4), 272–278. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-4-272-278>
15. Petryk, V.F.; Protasov, A.G.; Syeryy, K.M.; Povshenko, O.A. Use of serial mobile devices when designing portable defectoscopes. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. **2019**, 69(6–2), 12–16. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/03>
16. *Lecoeur electronique US-WEB*. <https://www.lecoeur-electronique.net/us-web.html> (accessed 2024-03-17).
17. Zhang, D.; Tian, J.; Li, H. Design and Validation of Android Smartphone Based Wireless Structural Vibration Monitoring System. *Sensors*. **2020**, 20(17), 4799. <https://doi.org/10.3390/s20174799>
18. Xie, B.; Li, J.; Zhao, X. Research on Damage Detection of a 3D Steel Frame Model Using Smartphones. *Sensors*. **2019**, 19(3), 745–762. <https://doi.org/10.3390/s19030745>
19. Yu, Y.; Han, R.; Zhao, X.; Mao, X.; Hu, W.; Jiao, D.; Li, M.; Ou, J. Initial validation of mobile-structural health monitoring method using smartphones. *Intern. Journ. of Distributed Sensor Networks*. **2015**, 11(2), 1–14. <https://doi.org/10.1155/2015/274391>
20. Felice, M.; Heng, I.; Udell, C.; Tsalicoglou, I. Improving ultrasonic inspector productivity with modern mobile technology. Singapore International NDT Conference & Exhibition, 4–5 Dec 2019. *e-Journal of Nondestructive Testing*. **2019**, Vol. 25(4). <https://www.ndt.net/?id=25142> (accessed 2024-03-17).
21. Mook, G.; Simonin, Y. Smartphone turns into eddy current instrument. 12<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018), Gothenburg 2018, June 11–15. *e-Journal of Nondestructive Testing*. **2018**, 23(8). <https://www.ndt.net/?id=22704> (accessed 2024-03-17).
22. Mook, G.; Uchanin, V.; Lysenko, Ju. Research of eddy current probes for inspection of aluminum alloy welding using smartphone-based flaw detector. *Technical diagnostic and Nondestructive Testing*. **2024**, 3, 32–38. <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.03.05> (in Ukrainian).
23. Udell, C.; Maggioni, M.; Mook, G.; Meyendorf, N. Improving NDE 4.0 by Networking, Advanced Sensors, Smartphones, and Tablets. *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*, Meyendorf, N., Ida, N., Singh, R., Vrana, J., Eds.; Springer, Cham. 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73206-6\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73206-6_53)
24. <https://auremo.org/materials/stal-os.html> (accessed 2024-03-17).

Одержано 10.04.2024