

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ВИХРОСТРУМОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ З МАТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Ю.Ю. Лисенко¹, Ю.В. Куц¹, Й. Мірчев², О.Е. Левченко¹, С.М. Глабець³

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: j.lysenko@kpi.ua, y.kuts@ukr.net

²Інститут механіки Болгарської академії наук. 1113, м. Софія, вул. Акад. Г. Бончев, бл. 4. E-mail: mirchev@imbm.bas.bg

³Лабораторія НК ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади». 03061, м. Київ, вул. Патріотів, 103. E-mail: s.glabets@gmail.com

У статті досліджується ефективність застосування методу матричних перетворювачів у вихрострумовому контролі (ВСК). Проаналізовано переваги використання вихрострумових матриць, до числа яких належать підвищення чутливості до малих дефектів, скорочення загального часу контролю та покращення ймовірності виявлення дефектів різних типів. Для оцінювання їх ефективності запропоновано безрозмірний коефіцієнт, який враховує час перевірки, достовірність виявлення дефекту та чутливість до дефектів певного розміру. Експериментальні дослідження на зразках зі штучно створеними дефектами різних розмірів, типів та орієнтацій підтвердили доцільність використання цього коефіцієнта для оптимізації параметрів контролю з метою покращення виявлення дефектів в елементах конструкцій. Додатково проаналізовано вплив на продуктивність апаратно-програмних засобів ВСК з матричними перетворювачами різних факторів, таких як стан поверхні, конфігурація сенсорів у матриці та параметри перевірки. Отримані результати сприятимуть кращому розумінню можливостей та обмежень використання матриць у ВСК компонентів транспортної, авіаційної та військової техніки. Це дасть змогу оптимізувати стратегії перевірки контрольованих виробів, підвищити надійність виявлення дефектів і покращити загальні практики технічного обслуговування в багатьох галузях промисловості. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: автоматизований вихрострумний контроль, матриця перетворювачів, ефективність, математичне моделювання, дефектоскопія, обробка сигналів, чисельні методи

Вступ. Потреби безпеки та надійності в сучасних критичних галузях економіки, таких як авіаційна, військова, автомобільна, нафтогазова та енергетична промисловості, надають першочергового значення ефективній перевірці та оцінюванню поточного стану компонентів. Необхідність виявляти дефекти в критично важливих елементах і вузлах конструкцій різного призначення є вирішальною для запобігання незворотнім збоєм і забезпечення оптимальної роботи систем. Нові технічні рішення в зазначених галузях і використання нових матеріалів підвищують попит на передові методи та методики неруйнівного контролю (НК) і адаптацію вже відомих методів до нових завдань НК [1–3].

Серед передових напрямів розвитку НК метод матричного вихрострумного контролю (МВСК) відомий своїми численними перевагами та відноситься до перспективних рішень для виявлення дефектів та оцінювання їх характеристик в елементах конструкцій у різних галузях економіки [4, 5]. Використання МВСК передбачає застосування кількох близько розташованих електричних котушок, об'єднаних у масив перетворювачів, що сприяє покращенню площі покриття об'єкта контролю (ОК) та підвищеній чутливості до малих дефектів. Такий підхід дає змогу виявляти

аномалії, які можуть бути непоміченими за допомогою одиночних перетворювачів, та підвищує загальну ефективність діагностики ОК. Одночасне сканування за кількома каналами та збір даних значного обсягу за один прохід вихрострумної матриці (ВСМ) значно скорочують час контролю, що є надзвичайно важливим при обстеженні великогабаритних ОК, адже зменшує час простою техніки під час технічного обслуговування [6, 7].

Можливості МВСК поширюються на виявлення дефектів як на поверхні, так і всередині ОК. Це робить його ефективним для виявлення тріщин, корозійних уражень, відшарувань та інших прихованих дефектів, які можуть порушити структурну цілісність елементів конструкцій. Це має особливе значення в контексті транспортної та військової промисловості, де надійність і безпека є критичними чинниками для захисту та збереження життів [5, 8].

Незважаючи на те, що МВСК демонструє значні перспективи застосування в різних галузях, певні проблеми, пов'язані з його впровадженням та оптимізацією, залишаються невирішеними. Використання ВСМ дає змогу отримувати інформацію про розмір, форму та орієнтацію виявлених дефектів, ґрунтуючись на амплітудному значенні сигналів котушок. Проте комплексна взаємодія факторів,

Лисенко Ю.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-9110-6684>, Куц Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>, Мірчев Й. – <https://orcid.org/0009-0002-4882-5282>, Левченко О.Е. – <https://orcid.org/0000-0002-3914-1818>, Глабець С.М. – <https://orcid.org/0009-0004-2740-9209>

© Ю.Ю. Лисенко, Ю.В. Куц, Й. Мірчев, О.Е. Левченко, С.М. Глабець, 2024

включаючи розмір масиву перетворювачів, його геометрію, властивості матеріалу та параметри контролю, вимагає комплексної оцінки їх впливу [9].

Сукупний аналіз інформативних параметрів сигналів ВСМ – амплітуди та фази гармонічних сигналів – дасть змогу точніше характеризувати природу дефектів і підвищити достовірність прийняття рішень в автоматизованих системах вихроstromової дефектоскопії. Крім того, значні обсяги отриманої за допомогою ВСМ вимірювальної інформації у формі цифрових даних доцільно обробляти та аналізувати за допомогою передових інформаційних технологій, включаючи штучний інтелект, що може покращити аналіз та інтерпретацію даних, підвищуючи ефективність і надійність контролю [10, 11]. Також це дасть змогу кількісно оцінювати характеристики дефектів і полегшить прийняття обґрунтованих рішень щодо стратегій прийнятності подальшої експлуатації чи відновлювального ремонту критично важливих елементів конструкцій [12].

Метою роботи є дослідження ефективності технології ВСМ у дефектоскопії за допомогою запропонованого безрозмірного коефіцієнта ефективності, який враховує час перевірки, надійність і чутливість, а також експериментальне тестування технології МВСК на матеріалах зі штучними дефектами з відомими характеристиками.

Теоретичне обґрунтування коефіцієнта ефективності ВСМ. Аналіз переваг застосування ВСМ показав, що, порівняно з традиційними перетворювачами, ця методологія забезпечує підвищену чутливість до виявлення малих дефектів, скорочення загального часу контролю та підвищену ймовірність виявлення дефектів різних типів [13, 14]. Враховуючи це, ефективність застосування ВСМ у дефектоскопії запропоновано оцінювати безрозмірним коефіцієнтом, що визначається за формулою:

$$k_{\text{ef}} = k_t k_p k_s, \quad (1)$$

де k_t , k_p , k_s – відносні коефіцієнти, що характеризують скорочення часу контролю, підвищення достовірності контролю та покращення чутливості засобу контролю відповідно. Якщо крім виявлення дефекту виконується оцінювання конкретного параметра дефекту (наприклад довжина, глибина або глибина тріщини), то коефіцієнт (1) може бути доповнений множителем, що характеризує підвищення точності оцінки цього параметра.

Коефіцієнт k_t визначається відносним скороченням часу дослідження ОК за формулою:

$$k_t = \frac{T_{\text{ВСП}}}{T_{\text{ВСМ}}}, \quad (2)$$

де $T_{\text{ВСП}}$, $T_{\text{ВСМ}}$ – сумарний час контролю з використанням традиційного одиночного вихроstromового перетворювача (ВСП) і ВСМ відповідно.

Для оцінювання часу контролю необхідно врахувати тривалість руху одиночним ВСП і ВСМ вздовж траєкторії сканування поверхні ОК [8]. Припустимо, що: 1) поперечний розмір (вздовж координати y) ділянки контролю збігається з поперечним розміром ВСМ, вздовж якого розміщено сенсори (рис. 1); 2) ВСМ переміщується лише вздовж координати x , тоді як для покриття такої площі поверхні ОК потрібно переміщати ВСП як вздовж координати x , так і вздовж координати y . У цьому випадку значення часових інтервалів $T_{\text{ВСП}}$, $T_{\text{ВСМ}}$ визначаються виразами:

$$T_{\text{ВСП}} = mn(t_n + t_b), \quad (3)$$

$$T_{\text{ВСМ}} = m t_n + nm t_b, \quad (4)$$

де t_n , t_b – час, необхідний для переміщення ВСП або ВСМ відповідно в наступну точку позионування та для виконання вимірювань в одній точці; m , n – кількість точок вимірювання на поверхні ОК по осях x та y відповідно.

Оскільки за прийнятих припущень кількість ліній сканування ВСП дорівнює кількості елементів у масиві (n), а $T_n \gg T_b$, то коефіцієнт (2) можна наближено представити виразом:

$$k_t \approx n. \quad (5)$$

Коефіцієнт k_p може бути визначений як відношення ймовірностей виявлення дефекту певного типу та розміру в процесі використання ВСП ($P_{\text{ВСП}}$) і ВСМ ($P_{\text{ВСМ}}$) за формулою:

$$k_p = \frac{P_{\text{ВСМ}}}{P_{\text{ВСП}}}. \quad (6)$$

Цей коефіцієнт доцільно визначати експериментально з використанням тестових зразків зі штучними або природними дефектами за умови, що параметри збудження електромагнітного поля вихрових струмів і коефіцієнти підсилення вимірювальних каналів однакові для ВСП і ВСМ.

Коефіцієнт k_s можна визначити як відношення абсолютних чутливостей $S_{\text{ВСП}}(l)$ і $S_{\text{ВСМ}}(l)$ при виявленні дефекту певного типу в діапазоні зміни розміру його параметра Δl за формулою:

$$k_s = \frac{S_{\text{ВСМ}}(\Delta l)}{S_{\text{ВСП}}(\Delta l)}, \quad (7)$$

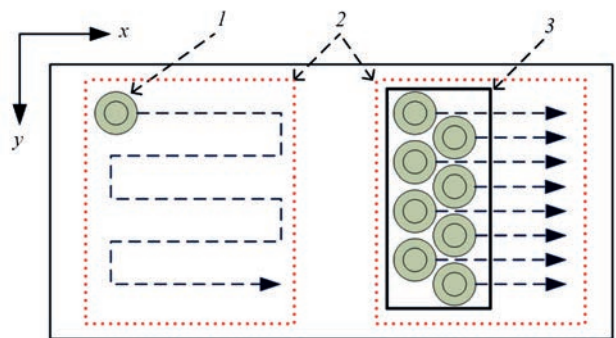


Рис. 1. Траєкторії сканування ВСП і ВСМ по поверхні ОК: 1 – ВСП; 2 – область сканування; 3 – ВСМ

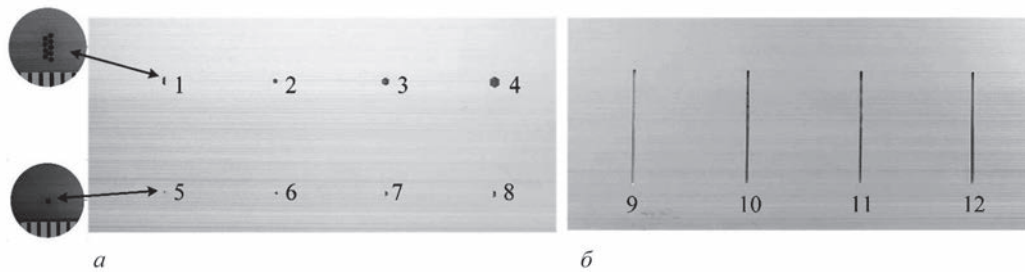


Рис. 2. Зразок зі сплаву АД31Т5: 1–12 – дефекти різних типів і розмірів

де параметр l – конкретний параметр дефекту (довжина, глибина залягання, глибина тріщини тощо).

Останній коефіцієнт також повинен визначатися за умови однакових для обох перетворювачів параметрів збудження електромагнітного поля вихрових струмів і коефіцієнтів підсилення вимірювальних каналів. До прикладу, якщо використовується амплітудний метод виявлення дефектів, а тестовий зразок має два дефекти з розмірами $l_1, l_2 \in \Delta l$, $l_1 < l_2$ і ці дефекти викликають у перетворювачах сигнали амплітудами $U_{\text{ВСМ}}(l_1)$, $U_{\text{ВСМ}}(l_2)$ та $U_{\text{ВСП}}(l_1)$, $U_{\text{ВСП}}(l_2)$, чутливості перетворювачів визначатимуться як:

$$S_{\text{ВСМ}}(\Delta l) = \frac{U_{\text{ВСМ}}(l_2) - U_{\text{ВСМ}}(l_1)}{l_2 - l_1},$$

$$S_{\text{ВСП}}(\Delta l) = \frac{U_{\text{ВСП}}(l_2) - U_{\text{ВСП}}(l_1)}{l_2 - l_1}, \quad (8)$$

а коефіцієнт (7):

$$k_s = \frac{U_{\text{ВСМ}}(l_2) - U_{\text{ВСМ}}(l_1)}{U_{\text{ВСП}}(l_2) - U_{\text{ВСП}}(l_1)}, \quad l_1, l_2 \in \Delta l. \quad (9)$$

Отже, для комплексної оцінки скорочення часу контролю, підвищення достовірності контролю та його чутливості запропонований безрозмірний коефіцієнт цілком придатний для визначення ефективності застосування ВСМ.

За неможливості експериментального отримання складових коефіцієнта k_p , k_s вони можуть бути прийняті рівними одиниці, а наближене значення $k_{\text{еф}}$ може бути оцінено як $k_{\text{еф}} \approx k_i$.

Експериментальні дослідження. Використані матеріали та прилади. Для проведення досліджень було підготовлено зразок із алюмінієвого сплаву 31Т5 (АД31Т5), що широко використовується в авіаційній промисловості. Цей зразок має штучно створені дефекти різної конфігурації та розмірів (рис. 2, а, б) і має розміри: 360 мм завдовжки, 120 мм завширшки та 5 мм завтовшки. У тестовому зразку поздовжні дефекти мають ширину 1 мм і глибину 1...4 мм. Крім цього, на поверхні зразка присутні дефекти, що являють собою скупчення різної кількості отворів (рис. 2, а) і тріщини різної глибини (рис. 2, б). Отвори мають глибину 4 мм і діаметр 0,5 мм кожний та розташовані у різній кількості та у безпосередній

близькості один від одного. Проте, деякі розміри сформованих таким чином дефектів можуть бути занадто малими для адекватного контролю за допомогою використовуваної у дослідженні ВСМ.

У даному дослідженні використовувався вихрострумний дефектоскоп Olympus Omniscan MX з ВСМ (рис. 3), яка належить до категорії гнучких датчиків і виготовляється з плівки за технологією друкованої плати [15]. З метою підлаштування до досліджуваної поверхні датчик має можливість встановлення на основу з необхідною кривизною. ВСМ складається з 32 котушок, кожна з яких має діаметр 3 мм.

Дефектоскоп реалізує мультиплексування окремих елементів матриці для запобігання взаємному впливу сусідніх елементів, а його спеціальне програмне забезпечення дозволяє формувати С-скани сигналів та одночасно відображати сигнали у вигляді годографів.

Методика досліджень та обговорення результатів. Результати сканування у вигляді С-сканів поверхні досліджуваного зразка представлені на рис. 4 (для зручності результати сканування розбиті на три зони та використано нумерацію дефектів згідно з рис. 2). У проведеному експерименті використовувалися наступні нала-

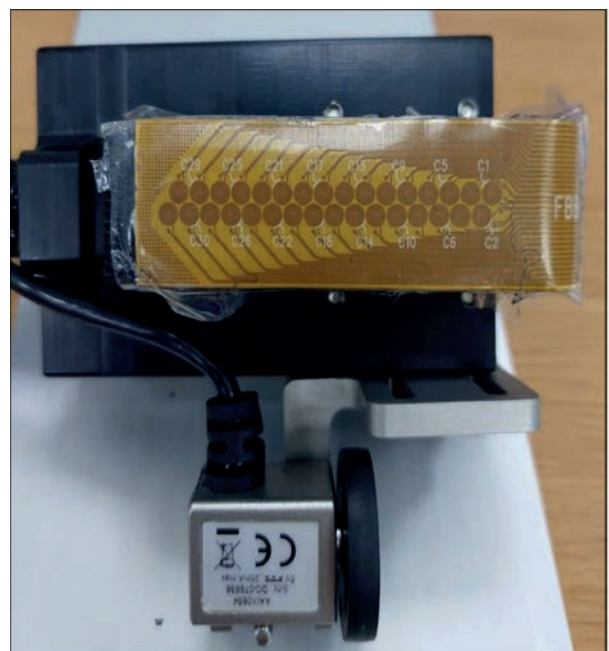


Рис. 3. Використана в досліді вихрострумова матриця

штування: робочі частоти 80, 160, 320 кГц, амплітуда сигналу на котушках збудження 1 В, підсилення сигналу в каналі вимірювання 78 дБ.

Для адекватної інтерпретації та порівняння результатів контролю було підібрано рівень чутливості в 78 дБ, який задовольняв (за амплітудною шкалою) усі режими сканування ОК і надавав чітку візуалізацію (видимість) дефектів. Збільшення чутливості підвищує ризик помилкових спрацьовувань через вищий рівень шуму та може призвести до того, що дефекти будуть пропущені, а бездефектні ділянки ОК будуть прийняті як дефектні [16].

Кількісну оцінку параметрів дефектів можна отримати за амплітудами сигналів після проходження ВСМ через дефектну ділянку. Отримані значення амплітуд сигналів дефектів зведені в табл. 1.

На рис. 4, а, б показані результати сканування ділянки ОК з різною кількістю отворів. Аналіз ре-

зультатів їх сканування свідчить, що найвища чутливість досягається на частоті 320 кГц, але якщо враховувати взаємне розташування отворів в одному скупченні (наприклад, дефекти 2 і 8 мають у своєму складі однакову кількість отворів, але відрізняються їх взаємним розташуванням), то частота 80 кГц дає різницю в амплітуді більше 600 мВ, але зі збільшенням частоти вплив геометрії стає менш помітним за амплітудою. Так, дефект 2 на частотах 160 і 320 кГц характеризується однаковою величиною амплітуди.

З наведених даних можна зробити наступні висновки. По-перше, сигнали від дефектів 9–12, які відрізняються глибиною штучних дефектів, на кожній з частот практично не відрізняються за амплітудами. Такий результат відповідає теоретичним очікуванням, оскільки глибина проникнення вихрових струмів в алюміній на частоті 80 кГц за питомої електропровідності алюмінію ~ 36 МСм/м становить $\sim 0,3$ мм, а мінімальна глибина дефектів 9–12 становить 1 мм. По-друге, для дефектів 1–8 (рис. 2) спостерігається певна залежність амплітуди сигналів дефектів від їх розмірів і сукупної площі (форми).

Для детальнішого аналізу цієї залежності віділимо підгрупу однотипних дефектів у вигляді протяжних сукупностей отворів. До цієї групи належать дефекти 1, 6, 7, 8. Значення амплітуд сигналів цих дефектів, упорядковані в порядку зростання розміру дефекту (чи кількості отворі n) для різних робочих частот представлені в табл. 2 та на рис. 5.

Аналізуючи отримані графіки можна дійти таких висновків.

1. На робочих частотах не менше 80 кГц перетворювач здатний виявляти дефекти, менші за розміри котушок ВСМ (діаметр котушок становить 3 мм). Наприклад, від дефекту 6 протяжністю $\sim 1,1$ мм отримано сигнал амплітудою не менше 1 В, що свідчить про високу чутливість перетворювача до дефектів малих розмірів.

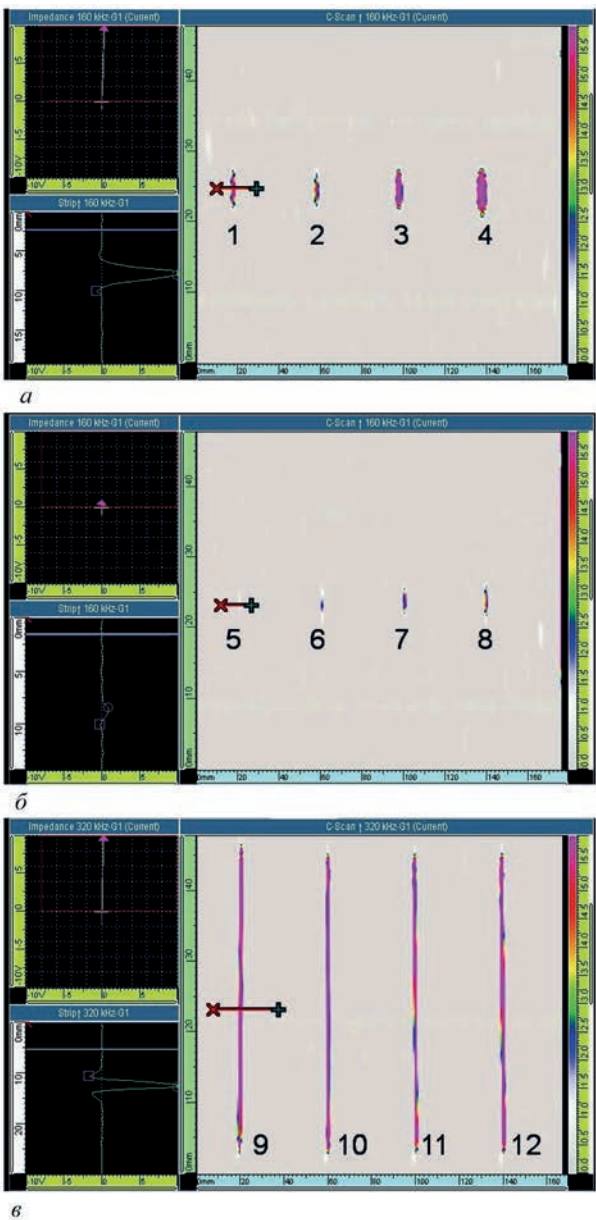


Рис. 4. Графічне відображення на екрані дефектоскопа Olympus Omniscan MX результатів сканування ОК

Таблиця 1. Дані експериментального дослідження ОК

Номер дефекту	Параметр дефекту	Розмір, мм	Амплітуда сигналу від дефекту, В		
			80 кГц	160 кГц	320 кГц
1	довжина	2,9	4,6	10,6	10,6
2		1,7	2,7	7,9	7,9
3		2,9	5,7	10,7	10,8
4		4,1	7,5	10,9	10,9
5		0,5	0,02	1,1	1,6
6		1,1	1,0	2,7	4,3
7		1,7	2,0	6,2	10,3
8		2,3	3,4	8,3	10,5
9	глибина	1,0	7,7	11,3	11,6
10		2,0	7,8	11,8	11,9
11		3,0	7,9	12,0	12,3
12		4,0	8,0	12,3	12,4

Таблиця 2. Експериментальні дані дослідження дефектів ОК, упорядковані за розмірами дефектів

Номер дефекту	Кількість отворів n у дефекті/протяжність дефекту, мм	Амплітуда сигналу від дефекту за різних робочих частот, В		
		80 кГц	160 кГц	320 кГц
6	3/1,1	1,0	2,7	4,3
7	5/1,7	2,0	6,2	10,3
8	7/2,3	3,4	8,3	10,5
1	9/2,9	4,6	10,6	10,6

2. Представлені залежності на частотах 80 і 160 кГц близькі до лінійних, що дає підстави для їх використання для кількісного оцінювання розмірів дефектів. Проте попередньо слід прийняти рішення про належність дефектів до певного класу, оскільки для різних класів і частот будуть мати місце різні функціональні залежності.

3. Зі збільшенням робочої частоти збільшується й чутливість перетворювачів, але разом з цим зменшується діапазон. Наприклад, на частоті 320 кГц цей діапазон обмежений значенням $\sim 1,1$ мм. Проте з'являється більша можливість розширити його в область дефектів менших розмірів.

Отже, для дефектів 1–8 існує певна залежність амплітуд сигналів дефектів від їх розміру та площ (форми сукупності отворів) (рис. 2, а). Очевидно, для детальнішого аналізу цієї залежності доцільно виділити підгрупу дефектів, які є однотипними за формою скупчень отворів. До цієї підгрупи слід віднести дефекти 1, 6, 7 і 8 з довжиною по вертикалі 2,9; 1,1; 1,7 та 2,3 мм відповідно. Порівнюючи значення сигналу для цих дефектів, видно, що для дефекту 6 завдовжки $\sim 1,1$ мм отримано сигнал з амплітудою не менше 1 В, що свідчить про високу чутливість ВСМ до дрібних дефектів за заданих налаштувань сканування.

Також на рис. 4, б видно, що колірне представлення дефектів 5 і 6 є найменш помітним за вказаних налаштувань сканування. Виявлення дефекту 5, який представлений одним отвором діаметром

0,5 мм, є складним без попереднього налаштування та калібрування ВСМ, що вказує на необхідність ретельнішого вибору режиму сканування для дефектів такого розміру.

На рис. 4, в показані результати сканування ділянки ОК з тріщинами різної глибини. Згідно з результатами (табл. 1), найвища чутливість отримана на частоті 160 кГц. Виходячи з експериментальних даних можна припустити, що збільшення глибини тріщини на 0,1 мм призведе до зміни напруги приблизно на 30...33 мВ, що є придатним для вимірювання з урахуванням можливостей дефектоскопа.

Коефіцієнт ефективності використання ВСМ за умови $k_p \approx k_s \approx 1$ визначається виразом у скороченні часу отримання вимірювальної інформації: $k_{\text{еф}} \approx k_t = n = 32$.

У цілому, результати проведених експериментів підтвердили високу продуктивність та ефективність технології ВСД на основі використання ВСМ і разом з цим дали можливість виявити обмеження та слабкі місця цієї технології, що потребує проведення подальших досліджень з метою визначення оптимальних режимів роботи таких перетворювачів у різних задачах ВСД та автоматизації даного процесу.

Висновки

Це дослідження підкреслює ключову роль технології ВСМ для контролю виробів з електропровідних матеріалів у багатьох галузях промисловості. У ході досліджень основну увагу було приділено надійності та чутливості контролю, а також оцінюванню продуктивності ВСМ у виявленні дефектів. Було запропоновано безрозмірний коефіцієнт, який дає змогу оцінити зменшення часу контролю, підвищення надійності контролю та чутливості, а також відносне зменшення часу контролю об'єкта, що є прийнятним для визначення ефективності застосування ВСМ.

Експериментальні дані, отримані на ОК з дефектами різних типів, розмірів і орієнтацій, виявили значні переваги ВСМ для вихрострумової дефектоскопії. Використання кількох близько розташованих котушок покращило покриття та чутливість до дефектів малих розмірів у процесі їх виявлення, які могли бути пропущені у випадку використання дефектоскопів із традиційними одноелементними ВСП. Сканування ОК і збір даних за один прохід ВСМ зі значної ділянки його поверхні дає змогу зменшити час контролю та спростити механічну частину засобів автоматизованого вихро-

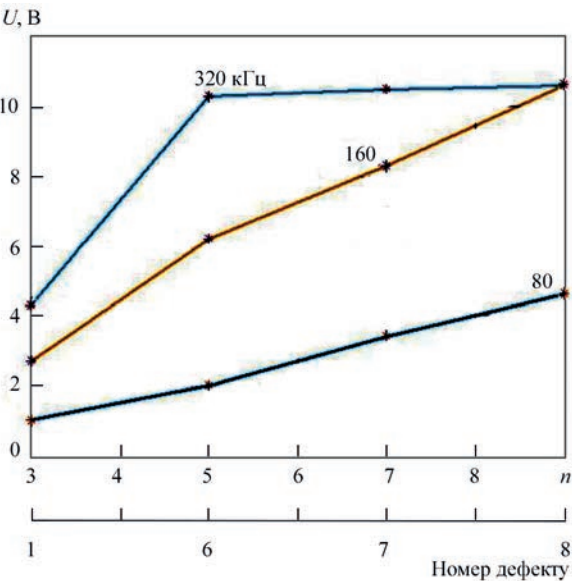


Рис. 5. Графіки залежності амплітуд сигналів дефектів 1, 6, 7, 8 від їх розміру та робочої частоти

струмового контролю, що є суттєвим у випадку виконання досліджень об'єктів значних розмірів.

Удосконалення технології ВСК із використанням ВСК здатне призвести до розширення функціональних можливостей цього виду контролю та покращення технічних характеристик засобів контролю, що сприятиме підвищенню безпеки та надійності експлуатації критично важливих конструкцій і механізмів різного призначення.

Подяки

Дана робота була виконана за підтримки гранту № BG05M20P001-1.002-0011 «Створення та розвиток Центру компетенцій у галузі мехатроніки та чистих технологій MIRACle (мехатроніка, інновації, робототехніка, автоматизація, чисті технології)», фінансованого Операційною програмою «Наука та освіта для розумного зростання» (2014–2020) та співфінансованого Європейським Союзом через Європейські структурні та інвестиційні фонди.

Список посилань/References

1. Hellier, C. (2001) *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill.
2. Ahmad, A., Bond, L.J. (2002) *Non-Destructive evaluation and quality control*. Vol. 17. ASM International.
3. Uchanin, V.M., Lutcenko, G.G., Opanasenko, A.V. (2023) Automated EDDY current inspection systems with surface probe of double differential type. *The Paton Welding J.*, 5, 48–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.08>
4. ASTM International (2017) *ASTM E2884 – 17 Guide for eddy current testing of electrically conducting materials using conformable sensor arrays*.
5. EN ISO 20339:2017 *Non-destructive testing – Equipment for eddy current examination – Array probe characteristics and verification* (ISO 20339:2017).
6. Lysenko, I., Kuts, Y., Uchanin, V. et al. (2023) Problems of using eddy current arrays NDT. In: Pawelczyk M, Bismor D, Ogonowski S, Kacprzyk J, editors. *Advanced, Contemporary Control. PCC 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 708, pp. 287–293. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35170-9_27
7. Allard, AM., Grenier, M., Sirois, M., Wassink, C. (2021) *Understanding eddy current array for high-performance inspections*. Materials Evaluation. DOI:<https://doi.org/10.32548/2021.me-04226>
8. Lamarre, A. (2015) *Eddy current array technology serves a variety of industries*. Quality magazine. [11.07.2024]. <https://www.qualitymag.com/articles/92427-eddy-current-array-technology-serves-a-variety-of-industries>
9. Куц Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю. та ін. (2021) Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Частина 2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 11–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01>
10. Deng, Y., Liu, X. (2011) Electromagnetic imaging methods for nondestructive evaluation applications. *Sensors*, 11(12), 11774–11808. DOI: <https://doi.org/10.3390/s111211774>
11. Mook, G., Michel, F., Simonin, J. (2011) Electromagnetic imaging using probe arrays. *J. of Mechanical Engineering*, 57(3), 227–236. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.173>
12. Lysenko, I., Kuts, Y., Uchanin, V. et al. (2024) Evaluation of eddy current array performance in detecting aircraft component defects. *Transactions on Aerospace Research*, 2024(2), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0007>
13. Uchanin, V.M. (2023) Surface EDDY current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems. *The Paton Welding J.*, 2, 46–55. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.02.07>
14. Mook, G., Michel, F., Simonin, J. (2008) Electromagnetic imaging using probe arrays. Proc. of 17th World Conf. on Nondestructive Testing, Shanghai. www.ndt.net. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.173>
15. Sun, Z., Cai, D., Zou, Ch. et al. (2017) Design and optimization of a flexible arrayed eddy current sensor. *Measurement Science and Technology*, 28(4), 8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5b76>
16. Ma, Q., Gao, B., Tian, G.Y. et al. (2020) High sensitivity flexible double square winding eddy current array for surface micro-defects inspection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 309, 111844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111844>

EFFECTIVENESS OF THE TECHNOLOGY OF AUTOMATED EDDY FLAW DETECTION WITH MATRIX CONVERTERS

Ju.Ju. Lysenko¹, Ju.V. Kuts¹, J. Mirchev², O.E. Levchenko¹, S.M. Glabets³

¹NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: j.lysenko@kpi.ua, y.kuts@ukr.net

²Institute of Mechanics of Bulgarian Academy of Sciences. Acad. G. Bontchev St., bl. 4 1113 Sofia, Bulgaria.

E-mail: mirchev@imb.bas.bg

³Laboratory of SC LLC «SPF «Diagnostychni prylady». 103 Patietyv Str., 03061, Kyiv. E-mail: s.glabets@gmail.com

The effectiveness of application of matrix converter method at eddy current testing (ECT) is studied in the work. Advantages of eddy current matrix application are analyzed, which include improvement of sensitivity to small defects, shortening of the total control time and improvement of the probability of detection of various types of defects. To evaluate their effectiveness, a dimensionless coefficient is proposed, which takes into account the inspection time, the reliability of defect detection, and the sensitivity to defects of a certain size. Experimental studies on samples with artificially induced defects of different dimensions, types and orientation confirmed the rationality of application of this coefficient for testing parameter optimization, in order to improve defect detection in structural elements. The influence of various factors, such as condition of the surface, sensor configuration in the matrix and verification parameters on the productivity of ECT hardware and software with matrix converters was additionally analyzed. Obtained results will promote better understanding of the possibilities and limitations of matrix application in ECT of the components of transport, aviation and military equipment. It will allow optimizing the strategies of checking the controlled products, improving the reliability of defect detection and general maintenance practices in many industries. 16 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: *automated eddy current control, converter matrix, effectiveness, mathematical modelling, flaw detection, signal processing, numerical methods*

Отримано 31.07.2024

Отримано у переглянутому вигляді 30.08.2024

Прийнято 30.09.2024