

# ТРИВИМІРНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ВИЯВЛЕНИХ ДЕФЕКТІВ МЕТОДАМИ ВИХРОСТРУМОВОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТОМОГРАФІЇ

О.О. Вертій<sup>1</sup>, В.М. Учанін<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет радіоелектроніки, 61058, м. Харків, просп. Науки, 14.  
E-mail: alexey.vertiy@gmail.com

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.  
E-mail: vuchanin@gmail.com

Комп'ютерна томографія, яка заснована на різних фізичних явищах, розглядається як ефективний метод для вирішення багатьох проблем НК в контексті революції NDE 4.0. Представлено принцип вихрострумкової томографії та експериментальну установку для реконструкції томографічних зображень, пов'язаних з розподілом електропровідності матеріалу. Зони заклепок у вигляді з'єднання двох листів з алюмінієвого сплаву зі штучними дефектами типу тріщина довжиною 2 мм вибрано як приклад достатньо складної для контролю структури. Дослідження проводили із застосуванням двох типів вихрострумових перетворювачів (ВСП): перший – традиційний ВСП абсолютного типу із коаксіальними вимірювальною та генераторною обмотками, а другий – низькочастотний ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201. Отримано набір вертикальних (ортогональних до досліджуваної поверхні) перерізів для зони заклепки, які дозволили продемонструвати ефективність вихрострумкової томографії. Горизонтальні перерізи аналізували для демонстрації можливості отримання томографічних зображень на різній глибині. Для реконструкції вертикальних томографічних перерізів із застосуванням ВСП подвійного диференціювання застосували двошарові структури, які склалися з верхньої обшивки товщиною 0...8 мм та нижньої обшивки товщиною 5 мм і дефектом типу тріщина. Останні результати демонструють високу глибину контролю із застосуванням ВСП подвійного диференціювання і можливість оцінювати розмір виявленого дефекту та його відстань від контрольованої поверхні. Бібліогр. 34, рис. 8.

*Ключові слова:* вихрострумова томографія, вихрострумовий перетворювач (ВСП), ВСП подвійного диференціювання, електропровідність, томографічні зображення, перерізи, зони заклепок

Четверта промислова революція поступово набуває реального змісту, свідченням чого є численні публікації [1, 2]. Вже працюють повністю автоматизовані заводи, побудовані на принципах Індустрії 4.0 з керуванням усіма процесами в реальному часі. В більшості промислово розвинутих країн діють відповідні державні програми. Нажаль, Україна поки ще дуже відстає від цього загальносвітового тренду, хоча і тут з'являються поодинокі лідери [3].

Очевидно, що прийдешня перебудова промисловості не омине необхідності формування нових підходів у неруйнівному контролі (НК) і світова НК спільнота вже активно дискутує на цю тему, проголошуючи формування четвертої революції в НК під аббревіатурою NDE 4.0 (Non-destructive Evaluation 4.0) [4, 5]. Огляд цих робіт не є метою даної статті. Зазначимо тільки, що одним із напрямків розвитку технологій НК 4.0 є автоматизація контрольних операцій (у тому числі на основі використання роботів) та інтелектуалізація засобів контролю. Зі стриманим оптимізмом зазначимо, що в цих напрямках вітчизняні спеціалісти з вихрострумового контролю (ВК) мають певні напрацювання [6–8]. Створено низку автоматизованих (в тому числі, роботизованих) систем

і розроблено нові підходи щодо обробки сигналів вихрострумових перетворювачів (ВСП) [6–9].

До технологій NDE 4.0 можна впевнено віднести методи НК, побудовані на томографічних принципах обробки і надання інформації. Найпоширеніші методи НК, які базуються на зондуванні об'єкта контролю (ОК) зовнішніми полями різної природи, поступово отримують томографічні реалізації.

Вперше математичні томографічні алгоритми були використані в рентгенівському діапазоні випромінювання, для якого характерний експоненціальний закон загасання. Рентгенівська комп'ютерна томографія (КТ) дозволяє реалізувати НК внутрішньої структури ОК багатократним рентгенівським просвічуванням у різних напрямках з наступною обробкою проєкційних даних і побудовою тривимірного розподілу ступеня загасання випромінювання. Вперше рентгенівську КТ для застосування в медицині винайшов англійський винахідник Годфрі Хаунсфілд, який у 1972 р. отримав відповідний патент [10], а вже у 1979 р. отримав разом з Аланом Кормаком Нобелівську премію з фізіології і медицини з формулюванням «За розробку комп'ютерної томографії». І вже як проєкція успіху медичної КТ виникла рентгенівська промислова томографія як метод НК. На теперішній час

рентгенівська КТ є найуживанішим методом томографічної побудови зображень внутрішньої структури в медицині і промисловому НК [11–14]. Цей поступ призвів то до того, що застосування рентгенівської КТ в НК з 2011 р. регулюється низкою міжнародних стандартів (EN 16016–1(2,3):2011).

Наступним томографічним «бастіоном» стали досягнення з ультразвукової КТ, де можна відзначити результати науковців Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ [15–18]. З часом настала черга електричних (резистивних) і електромагнітних (у тому числі, вихрострумівих) методів [19–28]. Тут результати представників України, які отримано у Турецько-Українській міжнародній лабораторії високих технологій науково-дослідного центру «Мармара» (м. Гебзе, Туреччина), є пріоритетними. При цьому використовували теоретичні підходи, розвинуті раніше для діапазону НВЧ [20–22]. Важливо, що крім формулювання теоретичних засад отримано низку експериментальних результатів [19, 23–24], які показали, що практична реалізація підходів вихрострумової томографії (ВТ) дозволить піднести вихрострумівий метод НК на принципово новий рівень. Зазначимо, що закордонні дослідження з ВТ дотепер мають теоретичний характер і не вийшли на експериментальний рівень [28].

Метою цієї статті є презентація і узагальнення напрацювань з вихрострумової обчислювальної томографії. Зазначимо, що українська наукова спільнота НК з поданими результатами практично не знайома.

**Принцип вихрострумової томографії.** Відновлення розподілу питомої електропровідності (ПЕП) у будь-якому поперечному перерізі ОК базується на інтегральному рівнянні томографії [19–22]:

$$\frac{\hat{\psi}(v, y_1) \exp(i\gamma_1 y_1)}{c_1(v)} = \iint_S K(x', y') \exp[-2\pi i(\alpha x' + \beta y')] dx' dy', \quad (1)$$

де  $\hat{\psi}(v, y_1)$  – Фур'є-перетворення комплексного розсіяного поля  $\psi(x, y_1)$ , яке вимірюється над поверхнею досліджуваного середовища на лінії сканування  $y = y_1$ ; змінна  $v$  – просторова частота;  $c_1[\gamma_1(v), \gamma_2(v)]$  – комплексна функція від  $v$ ;  $\gamma_1, \gamma_2$  та  $\beta$  – комплексні функції від  $v$  у загальному випадку;  $\alpha$  – дійсна функція від  $v$ ;  $K(x', y')$  – невідомий (шуканий) нормований розподіл струму в області  $S$  (поперечний переріз ОК), що є джерелом розсіяного поля. Досліджувана область обмежена, тому інтеграл у рівнянні (1) можна розглядати в нескінченних границях. Тут приймається, що Фур'є-перетворення розсіяного поля існує, так як це поле розглядається в обмеженій області простору.

Розв'язок цього інтегрального рівняння дає можливість знайти функцію  $K(x', y')$ , що описує нормований розподіл струму у досліджуваному поперечному перерізі, перпендикулярному до поверхні металу, і який містить лінію сканування (вертикальний переріз). Функція  $K(x', y')$  залежить від робочої частоти (частоти зондуючого електромагнітного поля). В томографії вимірювання та реконструкція функції  $K(x', y')$  проводяться для певного набору робочих частот у заданому діапазоні. Функція томографічного зображення є модулем суми цих функцій. Вона дає можливість виявити неоднорідність ПЕП металу у вертикальному перерізі, у тому числі пов'язану з наявністю дефектів. Застосування томографічного алгоритму дозволяє отримати достатньо якісні зображення поперечних перерізів локальних (типу пор) і протяжних (типу тріщин) дефектів. Набір зображень у різних вертикальних (ортогональних відносно поверхні об'єкта контролю) перерізах дозволяє реконструювати тривимірне зображення досліджуваної зони ОК.

**Експериментальна установка для автоматизованого контролю за принципом вихрострумової обчислювальної томографії.** Експериментальна установка (рис. 1) складається з персонального комп'ютера 1, блоку вихрострумівого контролю 2 для визначення складових сигналу в діапазоні робочих частот, блоку керування 3 кроковими електродвигунами 4 і 7 сканування ВСП 6 по координатах  $X$  і  $Y$ , які є складовою двокоординатного сканувального пристрою 8, і досліджуваного зразка 5. Зовнішній вигляд установки з двокоординатним сканувальним пристроєм, встановленим на досліджуваній зразок, наведено на рис. 2.

Персональний комп'ютер керує роботою крокових електродвигунів двокоординатного сканувального пристрою і блоку ВК, реєструє і зберігає параметри (амплітуду і фазу) сигналів ВСП в дискретних точках вибраної зони контролю на шістнадцяти робочих частотах у вибраному діапазоні, проводить дискретизацію та обробку сигналів за розробленим томографічним алгоритмом і формує кольорову презентацію отриманих результатів, яка відтворює двовимірний розподіл ПЕП у вибраних перерізах ОК. Блок ВК працює як звичайний бага-

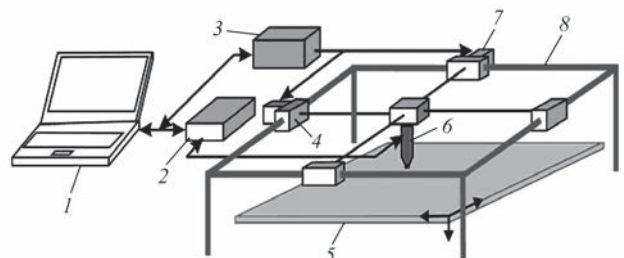


Рис. 1. Схема побудови експериментальної установки вихрострумової томографії

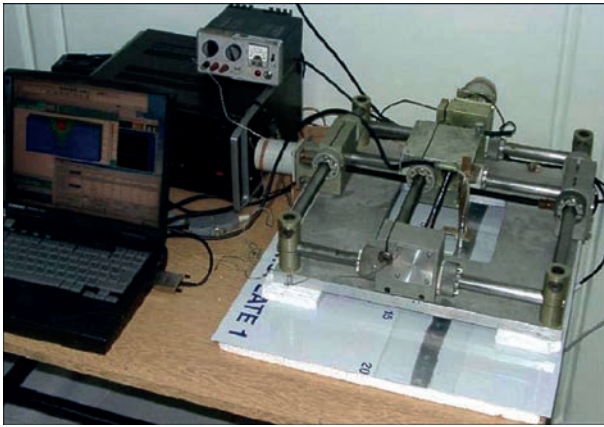


Рис. 2. Зовнішній вигляд експериментальної установки вихрострумової томографії

точастотний дефектоскоп, який оперує з ВСП різного типу (абсолютні, диференційні тощо). Його особливістю є швидке перемикання робочих частот, необхідне для реалізації томографічних алгоритмів, та покращена схема компенсації, яка дозволяє розширити динамічний діапазон під час обробки вихідних сигналів ВСП. На томографічних реконструйованих зображеннях однорідну область ОК відтворювали синім кольором, зону аномалії (дефекту) – червоним, а перехідні зони – зеленим.

Для експериментальних досліджень використано два різні типи ВСП. Перший – традиційний ВСП абсолютного типу фірми Nortec, який складався з двох (генераторної і вимірювальної) коаксіальних обмоток. Особливості ВСП цього типу подано в огляді [29], а особливості просторового розподілу сигналу ВСП від тріщин різної довжини аналізували в роботі [30]. Інший, низькочастотний ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201, розроблено у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАНУ [31]. ВСП подвійного диференціювання складається з двох включених послідовно і розташованих поруч обмоток збудження і двох диференційно включених вимірювальних обмоток. Вимірювальні обмотки розта-

шовано в нейтральній площині, в якій електромагнітне поле обмоток збудження має протилежний напрямок, через що сумарне електромагнітне поле обох обмоток відсутнє, а вихрові струми навпаки складаються. Для локального дефекту такий ВСП має чотири зони чутливості. Видовжені дефекти створюють «квазіабсолютний» сигнал з максимальною амплітудою безпосередньо над дефектом, як у звичайних ВСП абсолютного типу. Особливістю цього ВСП є велика глибина контролю, що відзначалось у низці публікацій [31, 32].

**Томографічна візуалізація дефектів в зоні заклепок.** Заклепки є найуживанішим елементом багат шарових авіаційних конструкцій, які використовують для з'єднання сполучених обшивок, підсилювальних пластин, стрингерів тощо. В той же час заклепкові шви авіаційних конструкцій створюють найбільшу кількість концентраторів напружень і тому вимагають підвищеної уваги під час експлуатації. Слід зазначити, що під час виявлення дефектів в зоні заклепок необхідно позбутися сильного впливу самої заклепки, яка по суті також є допустимим, згідно конструкції, дефектом великого розміру і яка створює додаткові сигнали завад. Тому задача виявлення втомних тріщин (особливо внутрішніх), що утворюються в процесі експлуатації в зоні заклепок, є реальним викликом для розробників засобів ВК і практиків. Тим не менше, в наших роботах показано, що на основі вихрострумового методу можна створити низку безальтернативних технологій НК заклепкових вузлів, особливо коли необхідно виявляти втомні тріщини у внутрішніх шарах або під головкою заклепки [33, 34]. В нашому експерименті зона заклепки з дефектом вибрана з метою показати можливості ВТ у складних випадках.

Для досліджень використано фрагмент авіаційної двохшарової обшивки із алюмінієвого сплаву, ПЕП якого дорівнює 35,4 МСм/м, з рядами заклепок зі штучними дефектами типу тріщина, виконаними електроерозійним методом. Товщина кожного

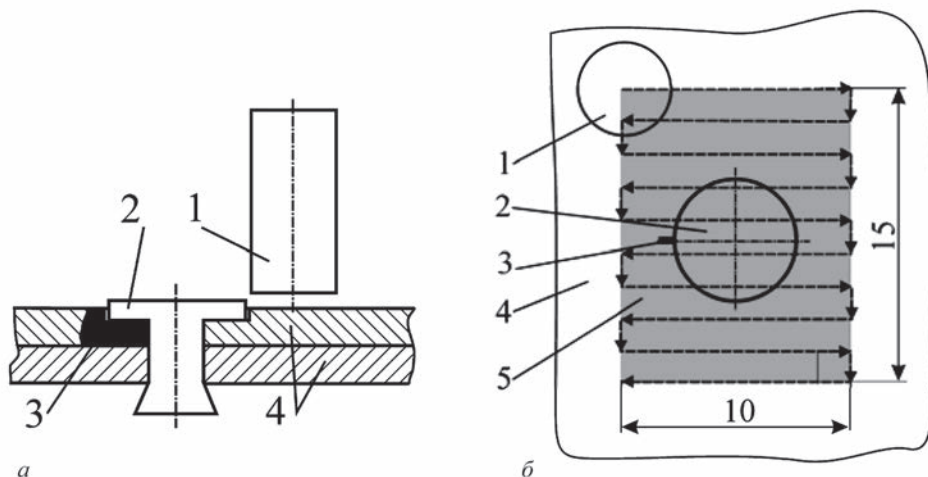


Рис. 3. Схема сканування зони заклепок: 1 – ВСП; 2 – заклепка; 3 – дефект; 4 – двохшарова конструкція; 5 – ділянка сканування

шару конструкції складала 2,5 мм. Діаметр головки заклепки 6 мм, а заклепкового отвору – 5 мм. Схема сканування зони вибраної заклепки подана на рис. 3, *a* (вид збоку) і рис. 3, *б* (вид зверху). Прямокутна ділянка двовимірного сканування (кадр) для окремої заклепки був вибраний 10 мм по координаті *X* і 15 мм по координаті *Y* (на рис. 3, *б* затемнене сірим кольором). На рис. 3, *a* видно, що у вибраній конструкції заклепки розміщувались в спеціальних заглибленнях, через що між матеріалом обшивки і тілом заклепки утворювалась щільна.

**Результати, отримані з використанням традиційного ВСП абсолютного типу.** Процес отримання томографічних зображень у різних перерізах, що відповідають різним лініям сканування, і, відповідно, різним положенням ВСП відносно заклепки, наведено на рис. 4. Цифрами зазначено координати по осях *X* і *Y*. Результати отримано шляхом обрахунку амплітуди і фази сигналу ВСП на шістнадцяти робочих частотах у діапазоні від 5 до 50 кГц. Праворуч на кожному зображенні показано координати у перпендикулярному від поверхні (вглиб зразка) напрямку.

По закінченню сканування вибраної ділянки отримано горизонтальні перерізи, що відповідають розподілу ПЕП на різній глибині. Реконструйовані томографічні зображення наведено на рис. 5.

Розроблені алгоритми дозволяють розглядати і аналізувати різні перерізи зони контролю після завершення процесу сканування. В якості прикладу на рис. 6 наведено тривимірне томографічне зображення зони заклепки, коли переріз зони контролю вибраний вздовж дефекту.

Наведені результати показують також, що під час використання традиційного ВСП абсолютного типу в діапазоні робочих частот від 5 до 50 кГц можна отримати горизонтальні томографічні зображення на глибині до 1,5 мм. Зазначимо, що аналогічні дослідження, проведені в діапазоні робочих частот від 100 кГц до 1,0 МГц, дозволяють досягати глибини контролю тільки 0,2 мм, що легко пояснити сильнішим впливом скін-ефекту.

**Результати контролю зони заклепок, отримані з використанням низькочастотного ВСП подвійного диференціювання.** В наступному експерименті використали низькочастотний ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201 [31]. Отримані результати, що характеризують горизонтальні перерізи на різних глибинах до 3 мм для бездефектної (зверху) і дефектної (знизу) заклепок, наведено на рис. 7. Робочі частоти під час використання цього ВСП змінювали в діапазоні 0,9...10 кГц.

Томографічні зображення горизонтальних перерізів для бездефектної заклепки (рис. 7, *a*, *б*, *в*) мають характерний чотирьохпелюстковий вигляд, який відповідає чотирьом зонам чутливості ВСП

подвійного диференціювання [31]. Наявність дефекту типу тріщина спотворює чотирьохпелюсткове зображення, яке характерне для бездефектної заклепки. Зображення стає асиметричним і одна пелюстка зникає. Подібні спотворення зображень спостерігались під час традиційної візуалізації результатів контролю зони заклепок, коли двовимірний розподіл сигналу ВСП реєстрували на електрохімічному папері [33]. Зазначимо, що глибина контролю тут сягає 3 мм, що підтверджує високу глибину контролю з застосуванням цього ВСП.

**Вертикальні перерізи розподілу електропровідності від підповерхневих дефектів з різною глибиною залягання.** Низькочастотний ВСП типу МДФ 1201 використали також для проведення експериментів з шаруватими зразками з дефектами типу тріщина у внутрішніх шарах. Нагадаємо, що для видовжених дефектів типу тріщина сигнал ВСП подвійного диференціювання має «квазіабсолютний» характер, що впливає на отримані томографічні зображення. Тріщину імітували стиком двох алюмінієвих пластин товщиною 5,0 мм, які розміщували на базовій алюмінієвій пластині товщиною 5,0 мм. Зразок зверху накривали пластинами товщиною 1,5; 2,5; 5,0; 6,5 і 8,0 мм для зміни глибини залягання дефекту. Шаруваті зразки сканували ВСП паралельно до поверхні за лінійною траєкторією довжиною 39,6 мм. Для реконструкції вертикального (перпендикулярного до поверхні) перерізу зразка в кожній точці через 0,6 мм по лінії сканування реєстрували сигнали ВСП на шістнадцяти робочих частотах у діапазоні 0,9...10 кГц. На томографічних реконструйованих зображеннях однорідну область відтворювали синім кольором, зону аномалії – червоним, а перехідні зони – зеленим. На томографічних зображеннях вертикального перерізу шаруватих зразків (рис. 8) зверху вказані координати вздовж лінії сканування по поверхні зразка в мм, а праворуч – координати у перпендикулярному від поверхні (вглиб зразка) напрямку.

На томографічних зображеннях вертикального перерізу аномальні зони, що відповідають дефекту, виділені червоним кольором, верхній край яких відповідає глибині залягання (товщині верхньої пластини) дефектів (відлік по правій шкалі). Протяжність червоної аномальної зони по вертикалі вглиб металу відповідає висоті дефекту (5,0 мм). Винятком є томографічне зображення перерізу зразка з поверхневим (без верхньої пластини) дефектом (рис. 8, *a*), на якому аномальна зона розділилася на дві ділянки. Це можна пояснити існуванням бічних максимумів для дефектів великого розміру у ВСП подвійного диференціювання. Однак вертикальна межа червоної ділянки зображення очікувано починається від поверхні зразка. Зі збільшенням глибини залягання на томографічних зображеннях з'являються зелені

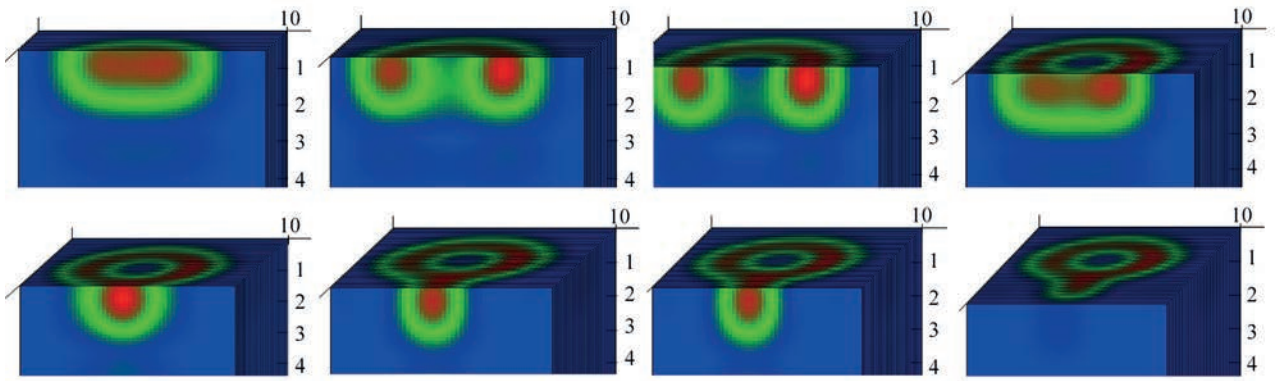


Рис. 4. Тривимірні томографічні зображення зони заклепок з дефектом у різних вертикальних перерізах

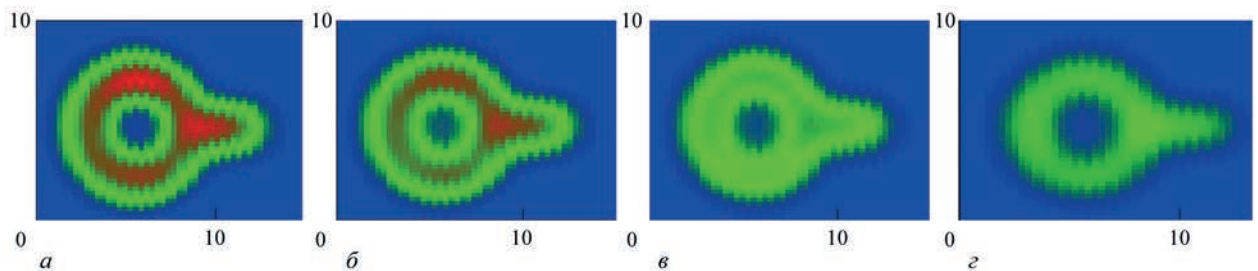


Рис. 5. Томографічне відтворення горизонтального перерізу зони заклепок з дефектом на глибині: 0 (а); 0,9 (б); 1,2 (в), 1,5 мм (г) за допомогою традиційного ВСП абсолютного типу

ділянки, що пов'язано зі зростанням чутливості системи ВК і, відповідно, рівня завад. Але за червоною аномальною зоною можна достовірно ідентифікувати дефект, який залягає на глибині до 8,0 мм. Крім того, чітко видно положення нижньої кромки дефекту, яка для дефекту, що залягає найглибше, відповідає відстані від поверхні 13 мм.

Наведені результати свідчать про принципову можливість кількісного ВК з оцінкою параметрів виявлених дефектів на основі томографічних підходів. Крім того, підтверджена велика глибина контролю з використанням ВСП типу МДФ 1201.

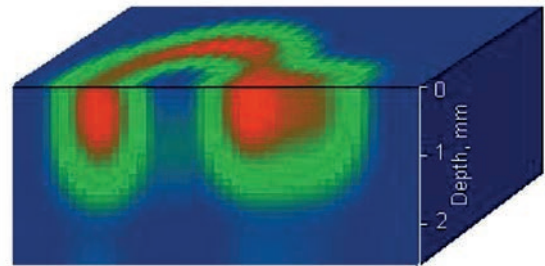


Рис. 6. Тривимірне томографічне зображення зони заклепки з вертикальним перерізом вздовж дефекту

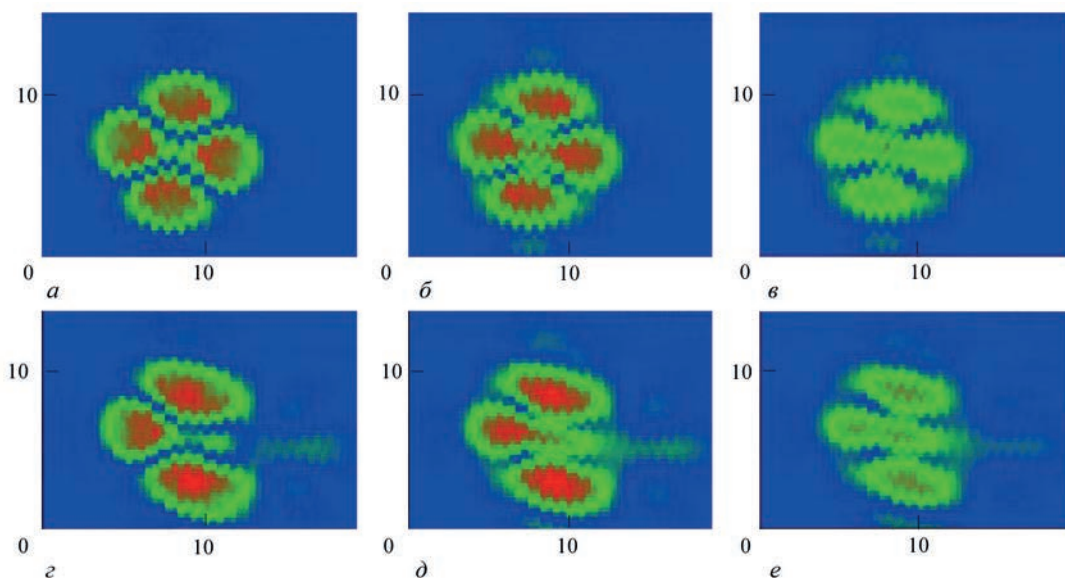


Рис. 7. Томографічне зображення горизонтального перерізу на різних глибинах: 0 (а, г); 2,0 (б, д), 3,0 мм (в, е) під час вихрострумового сканування зони бездефектної заклепки (а, б, в) і заклепки з тріщиною (г, д, е)

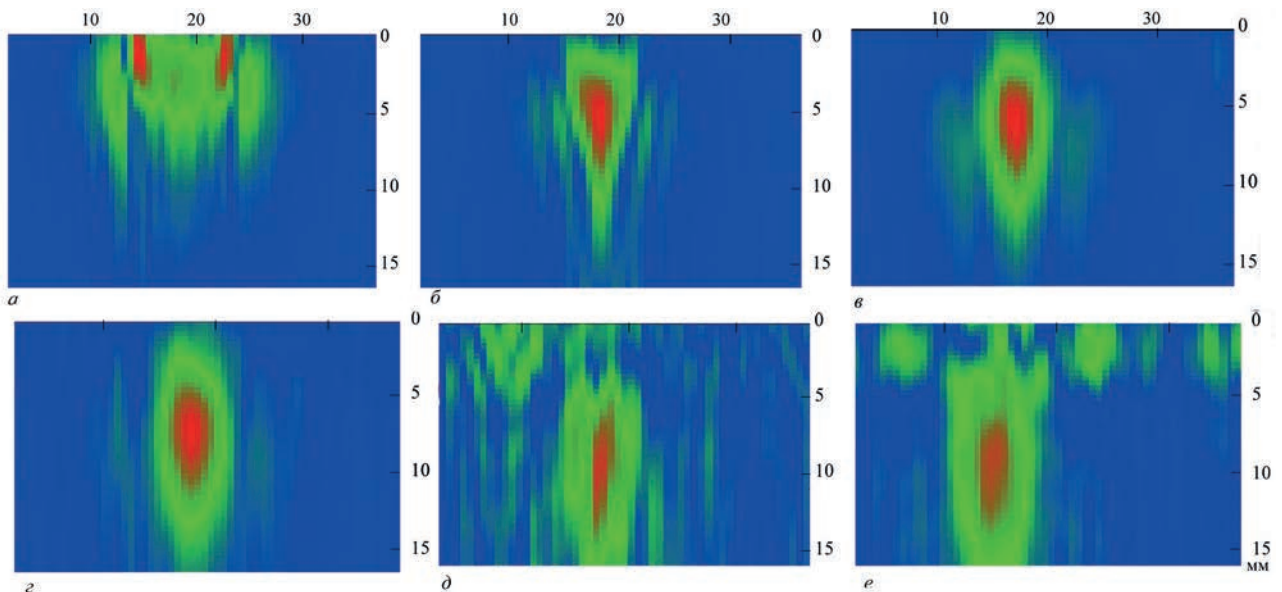


Рис. 8. Реконструйований вертикальний переріз зразка для поверхневого дефекту (а) і дефектів, що залягають на глибинах 1,5 (б), 2,5 (в), 5,0 (г), 6,5 (д), 8,0 мм (е)

**Висновки**

1. Наведено короткий огляд неруйнівних методів комп’ютерної томографії, заснованої на різних фізичних явищах, як ефективний метод вирішення багатьох проблем НК в контексті революції NDE 4.0.

2. Представлено принцип ВТ та експериментальну установку для реконструкції томографічних зображень, пов’язаних з розподілом електропровідності матеріалу.

3. Для досліджень використано два типи ВСП: перший – традиційний ВСП абсолютного типу із коаксіальними вимірювальної та генераторною обмотками, а другий – низькочастотний ВСП подвійного диференціювання.

4. Для досліджень з ВТ використано двошаровий зразок, що складається з двох листів алюмінієвого сплаву з заклепками і дефектами типу тріщина довжиною 2 мм. Для зони заклепок отримано набір вертикальних (ортогональних до контрольованої поверхні) перерізів, які продемонстрували ефективність ВТ. Проаналізовано також томографічні зображення горизонтальних перерізів на різній глибині.

5. Для реконструкції вертикальних томографічних перерізів із застосуванням ВСП подвійного диференціювання застосовували багат шарові структури, які склалися з верхньої обшивки товщиною 0...8 мм та дефектами типу тріщини у нижньому шарі. Отримані результати показали високу глибину контролю з використанням ВСП цього типу та можливість оцінювати розмір виявленого дефекту та його відстань від контрольованої поверхні.

6. Використання принципів ВТ дозволить піднести рівень вихрострумowego контролю на принципово новий рівень. Поновлення досліджень і розробок з ВТ можна вважати питанням національного пріоритету.

*Автори висловлюють подяку академіку З.Т. Назарчуку, який сприяв організації спільних досліджень і співробітництву авторів.*

**Список літератури/Rferences**

- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E.F.R., Ramos, L.F.P. (2017) Past, present and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal. *Intern. J. of Production Research*, 55, 12, 3609–3629. <http://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>.
- Drath, R., Horch, A. (2014) Industrie 4.0: Hit or Hype. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56–58. <http://doi.org/10.1109/mie.2014.2312079>.
- Юрчак А. (2019) Далеко від сусідів: чому Україна пасе задніх у сфері розвитку індустрії 4.0. *Економічна правда*. <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2019/11/5/653346>.
- Yurchak, A. (2019) Far from the neighbours: why Ukraine lags behind in the sphere of industrial development 4.0. *Економічна Правда*. <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2019/11/5/653346>.
- Singh, R. (2019) The Next Revolution in Nondestructive Testing and Evaluation: What and How. *Materials Evaluation*, 77(1), 45–50.
- Vrana, J. (2020) NDE Perception and Emerging Reality: NDE 4.0 Value Extraction. *Materials Evaluation*, 78(7), 835–851.
- Найда В.Л., Учанін В.Н., Мозжухін А.А. і др. (2008) Разработка системы автоматизированного вихретокового контроля перемишек коллекторов атомных станций, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 21–24.
- Naida, V.L., Uchanin, V.N., Mozhukhin, A.A. et al. (2008) Development of elements of a system of automated eddy current testing of collector bridges in nuclear power plants. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 21–24 [in Russian].
- Lutcenko, G., Uchanin, V., Mischenko, V., Opanasenko A. (2012) Eddy Currents Versus Magnetic Particles. *Proc. 18-th World Conf. on Nondestructive Testing, Durban*, [www.ndt.com](http://www.ndt.com).
- Доліненко В.В., Шаповалов С.В., Скуба Т.Г. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумowego контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, 5–6, 60–67. <http://doi.org/10.15407/as2017.06.10>.
- Dolinenko, V.V., Shapovalov, E.V., Skuba, T.G. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, 5–6, 60–67. <http://doi.org/10.15407/as2017.06.10>.
- Lysenko, Ju., Eremenko, V., Kuts, Yu. et al. (2020) Advanced signal processing methods for inspection of aircraft structural materials. *Transactions on Aerospace Research*, 2(259), 27–35. <http://doi.org/10.2478/tar-2020-0008>.
- Hounsfield, G. N. (1972) *A method and apparatus for examination of a body by radiation such as X-ray or gamma radiation*. British Patent No. 1283915. British Patent Office, London.

11. Вайнберг Э.И., Ключев В.В., Курозаев В.П. (1986) Промышленная рентгеновская вычислительная томография. *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник* (Ключев В.В. ред.). 2-е изд. Москва, Т. 1. Vajnberg, E.I., Klyuev, V.V., Kurozaev, V.P. (1986) Industrial X-ray computed tomography: *Book. Devices for non-destructive testing of materials and products: Refer. book.* Ed. by V.V. Klyuev. 2nd Ed., Moscow, Vol. 1 [in Russian].
12. Вайнберг Э.И., Казак И.А., Курозаев В.П. (1981) Реконструкция внутренней пространственной структуры объектов по интегральным проекциям в реальном масштабе времени. *ДАН СССР*, 257(1), 89–94. Vajnberg, E.I., Kazak, I.A., Kurozaev, V.P. (1981) Reconstruction of internal space structure of objects by integral projections in real time. *DAN SSSR*, 257(1), 89–94 [in Russian].
13. Reimers, P., Goebbels, J. (1983) New Possibilities of Nondestructive Evaluation by X-ray Computed Tomography. *Materials Evaluation*, 42(6), 732–737.
14. Maire, E., Buffiere, J., Salvo, L. et al. (2001) On the Application of X-ray Microtomography in the Field of Materials Science. *Advanced Engineering materials*, 3(8), 539–546.
15. Nazarchuk, Z.T., Koshovy, V.V., Krivin, E.V., Romanyshyn, I.M. (1999) Ultrasonic tomography, technologies for NDT and monitoring of material degradation. *Proc. Joint EC IAEA Specialists Meeting on NDT Methods for Monitoring Degradation*. Petten, The Netherlands, 79–89.
16. Koshovy, V.V., Nazarchuk, Z.T. (2001) Estimating the Predefective State of a Material Using Methods of Ultrasonic Computerized Tomography. *Materials Science*, 37(2), 279–293.
17. Кошевой В.В., Романишин И.М., Романишин Р.И., Шарамга Р.В. (2010) Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала (Часть 1). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 37–42. Koshevoj, V.V., Romanishin, I.M., Romanishin, R.I., Sharamaga, R.V. (2010) Ultrasonic computer tomography based on recording of a signal scattered by material structure. Pt. 1. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 37–42 [in Russian].
18. Кошевой В.В., Романишин И.М., Романишин Р.И., Шарамга Р.В. (2010) Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала (Часть 2). *Там же*, 3, 19–24. Koshevoj, V.V., Romanishin, I.M., Romanishin, R.I., Sharamaga, R.V. (2010) Ultrasonic computer tomography based on recording of a signal scattered by material structure. Pt. 2. *Ibid*, 3, 19–24 [in Russian].
19. Turk, A.S., Hocaoglu, A.K., Vertiy, A.A. (Eds.) (2011) *Sub-surface sensing*. John Wiley & Sons, Inc. 890 p.
20. Vertiy, A., Gavrilov, S., Voynovskyy, I., Stepanyuk, V. (2002) The millimeter wave tomography application for the sub-surface imaging. *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*, 23(10), 1413–1444.
21. Gavrilov, S.P., Vertiy, A.A. (1997) Application of tomography method in millimeter wavelengths band: I. Theoretical. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, 18(9), 1739–1760.
22. Vertiy, A.A., Gavrilov, S.P. (1997) Application of tomography method in millimeter wavelengths band: II. Experimental. *Ibid*, 18(9), 1761–1781.
23. Vertiy, A., Gavrilov, S., Voynovskyy, I. et al. (2004) Sub-surface imaging by deep penetrating eddy current tomography. *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів*, 9, 123–127.
24. Vertiy, A.A., Gavrilov, S.P., Voynovskyy, I.V. et al. (2004) Deep penetrating eddy current tomography for subsurface imaging. *Proc. 10-th Int. Workshop on Electromagnetic Evaluation. Michigan, USA*. 91–92.
25. Tamburrino, A., Rubinacci, G. (2002) A new non-iterative inversion method for electrical resistance tomography. *Inverse Problems*, 18(6), 1809–1829.
26. Tamburrino, A., Soleimani, M. (2006) Shape reconstruction in magnetic induction tomography using multifrequency data. *International. J. of informaton and systems sciences*, 2(3), 343–353.
27. Tamburrino, A., Rubinacci, G., Soleimani, M., Lionheart, W. (2003) Non iterative inversion method for electrical resistance, capacitance and inductance tomography. *3-rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, Canada*, pp. 233–238.
28. Tamburrino, A., Rubinacci, G. (2006) Fast methods for quantitative eddy-current tomography of conductive materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(8), 2017–2028.
29. Учанін В.Н. (2010) Вихретокові накладні преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 24–29. Uchanin, V.N. (2010) Eddy current overlay transducers: Expanded classification, comparative analysis and characteristic examples of realization. (Review). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 24–29 [in Russian].
30. Uchanin, V.M. (2007) Specific features of the space distribution of the signal of an eddy-current converter caused by cracks of different lengths. *Materials Science*, 43, 591–595. <http://doi.org/10.1007/s11003-007-0068-2>.
31. Учанін В.М. (2013) Вихреструміві накладні перетворювачі подвійного диференціювання. Львів, Сполом.
32. Mook, G., Hesse, J., Uchanin, V. (2007) Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. *Materials Testing*, 49(5), 258–264. <http://doi.org/10.3139/120.100810>.
33. Учанін В. (2006) Вихретокові методи виявлення дефектів в зоні заклепок многослойных авиационных конструкций. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–12.
34. Uchanin, V. (2020) Detection of the fatigue cracks initiated near the rivet holes by eddy current inspection techniques. *Transactions on Aerospace Research*, 1(258), 47–58. <http://doi.org/10.2478/tar-2020-0010>.

### THREE-DIMENSIONAL VISUALIZATION OF THE DETECTED DEFECTS BY EDDY CURRENT COMPUTING TOMOGRAPHY

O.O. Vertiy<sup>1</sup>, V.M. Uchanin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kharkiv National University of Radio Electronics. 14 Nauky Ave., 61058, Kharkiv, Ukraine. E-mail: alexey.vertiy@gmail.com

<sup>2</sup>G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

Nondestructive computing tomography methods based on different physical phenomena are reviewed as an effective tool to solve many NDT problems in the context of NDE 4.0 revolution. Eddy current (EC) tomography principle and experimental set-up are presented to demonstrate the possibility to reconstruct the tomography images related to the distribution of material electric conductivity. A riveted joint of two aluminum alloy sheets with 2 mm long artificial crack like defects was selected as an example of complex enough structure for control. Investigations were carried out with two types of EC probes application: the first one – the traditional EC probe of absolute type with coaxial driving and sensing coils, and the second – low-frequency double differential EC probe of MDF 1201 type. The set of vertical (orthogonal to the inspected surface) slices for the rivet zone were obtained to demonstrate the effectiveness of EC tomography. The horizontal slices were analyzed to demonstrate the possibility to produce tomography images at different depths. Two-layer structures, consisting of upper sheets with thicknesses from 0 to 8 mm and 5 mm thick lower sheath with a crack like defect were applied to reconstruct the vertical tomography slices with double differential EC probe application. The latter results demonstrate the high penetration ability of inspection using double differentiation EC probes and the possibility to estimate the defect size and distance from the inspected surface. 34 Ref., 8 Fig.

*Keywords:* eddy current (EC) tomography, eddy current probe (EC probe), double differentiation EC probe, electric conductivity, tomography images, slices, riveted joints

Надійшла до редакції 18.03.2021