

МЕТОДОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТНИХ ЗРАЗКІВ З ДЕФЕКТАМИ ДЛЯ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ: КЛАСИФІКАЦІЯ, ХАРАКТЕРНІ ПРИКЛАДИ, ДОСЛІДЖЕННЯ СИГНАЛІВ ТА СТАТИСТИЧНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ

В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5. E-mail: vuchanin@gmail.com

У роботі розвинуто методологію використання стандартних зразків з дефектами для забезпечення досягнення високої достовірності та повторюваності результатів вихрострумової дефектоскопії. Запропоновано класифікацію стандартних зразків з дефектами та наведено відповідні приклади, що підтверджують правомірність запропонованої класифікації. В якості прикладу представлено конструкції складених багатозначних стандартних зразків для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів у циліндричних і плоских об'єктах контролю. Показано нові конструкції складених стандартних зразків, які імітують дефекти з різною глибиною залягання. Наведено відповідний комплект стандартних зразків, які імітують підповерхневу тріщину однакового розміру з чотирма значеннями глибини її залягання та експериментально досліджено відповідні сигнали вихрострумового перетворювача подвійного диференціювання. Запропоновано спосіб виготовлення стандартних зразків для імітації нахилених тріщин. Проаналізовано низку робіт, які розглядають можливі причини відмінності сигналів вихрострумового перетворювача від природної тріщини та штучних дефектів. Шляхом розрахунків методом об'ємних інтегральних рівнянь показано, що основною причиною відмінності сигналів вихрострумового перетворювача від природних втомних і штучних дефектів є їхня ширина (розкриття). Розглянуто вплив довжини тріщини на особливості сигналу вихрострумового перетворювача параметричного типу, які необхідно враховувати під час вибору довжини тріщин стандартних зразків для забезпечення порогу чутливості та відтворюваності результатів контролю. Наведено статистично обґрунтований спосіб достовірного оцінювання параметрів стандартних зразків з природними дефектами, який успішно використано для оцінювання зразків з втомними тріщинами у трубчастих зразках. Бібліогр. 45, рис. 10.

Ключові слова: стандартний зразок, класифікація, вихрострумовий метод, неруйнівний контроль, вихрострумовий перетворювач, штучний дефект, параметри дефекту

Вступ і стан проблеми. Для досягнення високої достовірності та повторюваності результатів вихрострумової дефектоскопії важливу роль відіграють методи та засоби метрологічного забезпечення [1–3]. Існує два підходи. Найчастіше для імітації дефектів використовують стандартні зразки (СЗ) зі штучними дефектами (ШД) із заданими геометричними параметрами, серед яких зазвичай нормують поріг чутливості, тобто мінімальну глибину ШД, який повинен виявляти вихрострумовий дефектоскоп (ВД). Параметри ШД у СЗ повинні відповідати вимогам технічної документації щодо порогу чутливості ВД та умов її визначення (відстань вихрострумового перетворювача (ВСП) від поверхні об'єкта контролю (ОК), електрофізичні характеристики (питома електропровідність і магнітна проникність) матеріалу ОК, товщина ОК тощо). Скануючи поверхню СЗ за допомогою ВСП, метролог або оператор-дефектоскопіст можуть оцінювати відповідність ВД нормованим характеристикам щодо чутливості до дефектів. Інший рідкісний підхід базується на використан-

ні електронних імітаторів дефектів, імітаційні обмотки яких створюють електромагнітне поле або сигнал, ідентичний до тих, що створюють вихрові струми в ОК з дефектом.

Проблемі метрологічного забезпечення ВД із використанням СЗ не приділяють належної уваги. У літературі та стандартах з неруйнівного контролю (НК) довгий час можна було зустріти велике розмаїття термінів: «випробувальний зразок», «контрольний зразок», «еталонний зразок», «еталон», «калібрувальний еталон», «стандартний калібрувальний зразок», «імітатор» тощо, що підтверджує відсутність єдиних підходів. В англійській літературі також використовують різні терміни, зокрема «reference standard» [4] або «reference block» [5]. І тільки останніми десятиріччями термін «стандартний зразок» став найуживанішим для СЗ дефектоскопії. Згідно з загальноприйнятою метрологічною термінологією [6] «стандартний зразок складу або властивостей речовини (матеріалу) – це засіб вимірювань у вигляді визначеної кількості речовини або матеріалу, призначений для відтворення і зберігання розмірів величин, що характеризують склад або властивості цієї речовини (матеріалу), значення яких встановлені в

Учанін В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>
© В.М. Учанін, 2025

результати метрологічної атестації, яку використовують для передачі розміру одиниці при повірці, калібруванні, градуюванні засобів вимірювання, атестації методик виконання вимірювань, і затверджений в якості СЗ в установленому порядку». Очевидно, що зазначений термін не враховує специфіку дефектоскопії засобами НК. Але існує також метрологічний термін «міра, як вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) збереження фізичної величини заданого значення» [6]. Цей термін більше підходить для засобів відтворення фізичної величини, на вимірюванні якої побудовано метод НК, ніж для зразків з ШД. Важливими прикладами можуть бути зразки для приладів магнітного структурного аналізу на основі визначення параметрів петлі магнітного гістерезису [7] або зразки питомої електропровідності (ПЕП) для вихрострумівих структуроскопів [8]. На жаль, використання терміну «міра» в метрології НК поки не є усталеною практикою. Підтвердженням цього є дискусія між авторами винаходу «Міра коерцитивної сили для метрологічного забезпечення коерцитиметрів з приставними давачами» (автори В.М. Учанин, В.Г. Рибачук, С.М. Мінаков, Р.М. Соломаха) та експертами Державної патентної експертизи, які спочатку відмовились видати патент з такою назвою. Але авторам вдалося відстояти свою позицію і патент на сьогодні знаходиться на стадії видачі.

Зазначене вище формулювання терміну «стандартний зразок» є дуже загальним і не враховує особливості дефектоскопічного НК, що є важливими для забезпечення високої достовірності та повторюваності отриманих результатів. Тому для СЗ дефектоскопії, що використовуються в НК, сформульовано наступне визначення: «Стандартний зразок дефектоскопії – виріб з нормованими метрологічними характеристиками для відтворення властивості порушень суцільності ОК створювати сигнал первинного перетворювача визначеного методу НК». Таке визначення підкреслює головну вимогу до СЗ дефектоскопії – адекватно відтворювати особливості імітованих дефектів і конструктивних особливостей ОК. З іншого боку, СЗ для дефектоскопії – це фізична модель порушення суцільності матеріалу, яка має правильну геометричну форму й адекватно замінює несущість матеріалу під час настроювання або калібрування засобів НК. У цьому означенні закладено певне протиріччя, оскільки СЗ, як будь-яка модель, не може повністю відображати всі властивості реального ОК. Питання адекватності слід вирішувати, враховуючи особливості поставленої задачі й методу НК. Зокрема СЗ для НК повинні враховувати фізичні явища, на основі яких побудовано конкрет-

ний метод НК. Як приклад можна навести СЗ для ультразвукового контролю, які виготовляють із матеріалів з відповідними акустичними характеристиками (наприклад, органічного скла), нехтуючи електрофізичними характеристиками ОК, зокрема їхньою питомою електропровідністю та магнітною проникністю (МП). Відповідно для вихрострумівого контролю можна знехтувати відмінністю акустичних характеристик матеріалу СЗ і ОК. Для цього методу важливо забезпечити електрофізичні характеристики СЗ, зокрема їхні ПЕП і МП, які мають відповідати характеристикам матеріалу ОК. Найпростіший шлях забезпечити адекватність електрофізичних характеристик – виготовити СЗ із того ж матеріалу, що й ОК. При цьому технологія виготовлення СЗ (зокрема поверхнева та термічна обробка) повинна забезпечувати відповідну структуру матеріалу та часову стабільність електрофізичних характеристик матеріалу, яка пов'язана з фізичним старінням матеріалу й зношуванням поверхневого шару. Іншою вимогою до СЗ є можливість виконання ШД визначених параметрів із заданою точністю, що необхідно для їх відтворення під час виготовлення партії СЗ. Не менш важливою є можливість вимірювання нормованих параметрів ШД для їх метрологічної оцінки.

Згадаємо, що з 2016 р. вступив у дію новий закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [9], який змінив поняття багатьох метрологічних термінів з метою гармонізації їх з міжнародною метрологічною практикою [10]. Новий закон ввів поняття «законодавчо регульованої метрології», до сфери якої відносяться види діяльності, щодо яких здійснюється державне регулювання стосовно вимірювань, одиниць вимірювання та засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Метрологічні роботи на підприємствах стосуються метрологічного підтвердження ЗВТ, під яким розуміють сукупність операцій, необхідних для гарантування того, що ЗВТ відповідає метрологічним вимогам щодо його використання за призначенням. На національному та міжнародному рівнях метрологічне підтвердження ЗВТ передбачає проведення метрологічних робіт, а саме їх повірку та калібрування. Термін «повірка» відповідає терміну «верифікація», під якою розуміється отримання об'єктивних свідчень, що даний ЗВТ відповідає встановленим вимогам. З 1993 по 2015 рр. термін «повірка» стосувався ЗВТ, які підлягають державному метрологічному нагляду. Крім того, з 2016 р. існують окремо ЗВТ у сфері законодавчо регульованої метрології та інші ЗВТ, які не підлягають законодавчо регульованій метрології. Тут

існує аналогія з державною та відомчою повіркою ЗВТ, які існували до 1993 р. У той же час є сподівання, що сформульовані нижче основи методології використання СЗ у вихрострумовій дефектоскопії будуть актуальними незалежно від змін законодавства України.

У цій статті здійснено спробу започаткувати створення методології використання СЗ у вихрострумовій дефектоскопії. Зокрема запропоновано класифікацію СЗ з відповідними прикладами, наведено низку технічних рішень щодо СЗ для імітації підповерхневих і нахилених дефектів, досліджено вплив ширини та довжини дефекту СЗ на сигнал ВСП і наведено статистично обґрунтований спосіб визначення параметрів СЗ з природними дефектами.

1. Класифікація стандартних зразків дефектоскопії. Для створення методології використання СЗ для метрологічного забезпечення ВД розглянемо можливі варіанти СЗ на основі їх класифікації, де в якості класифікаційних ознак використано наступні особливості: тип і походження дефекту; технологія виготовлення ШД; основні нормовані параметри та кількість нормованих значень; конструктивне виконання, а також етап, на якому їх використовують (рис. 1).

Стандартні зразки дефектоскопії можна створювати, використовуючи природні або штучні дефекти (рис. 1). Очевидно, що реальні умови виявлення дефектів найкраще відтворюють СЗ з природними дефектами, що виникають під час виробничих циклів (плавлення, литво, штампування деформації, термічна та хіміко-термічна обробка; механічна обробка, зварювання) або експлуатації (втомні тріщини, корозійні пошкодження різного типу тощо). Недоліками СЗ з втомними тріщинами, зокрема, є проблема зі створенням тріщин із заданими геометричними параметрами з гарантованою точністю. Можливість визначення параметрів втомної тріщини під час метрологічної оцінки також обмежена через мале розкриття (ширину). Точні характеристики СЗ з природними дефектами можна встановити тільки після їх руйнування. Тому на практиці для перевірки та настроювання засобів НК традиційно використовують СЗ із ШД простої форми [11–13]. Перевагою таких СЗ є нескладність їх виготовлення та метрологічної оцінки, яку виконують вимірюванням нормованих параметрів ШД методами вимірювання лінійних розмірів.

Незалежно від походження дефекти прийнято поділяти на видовжені (лінійні) і локальні (об'ємні). Тріщиною називають дефект, для якого спра-

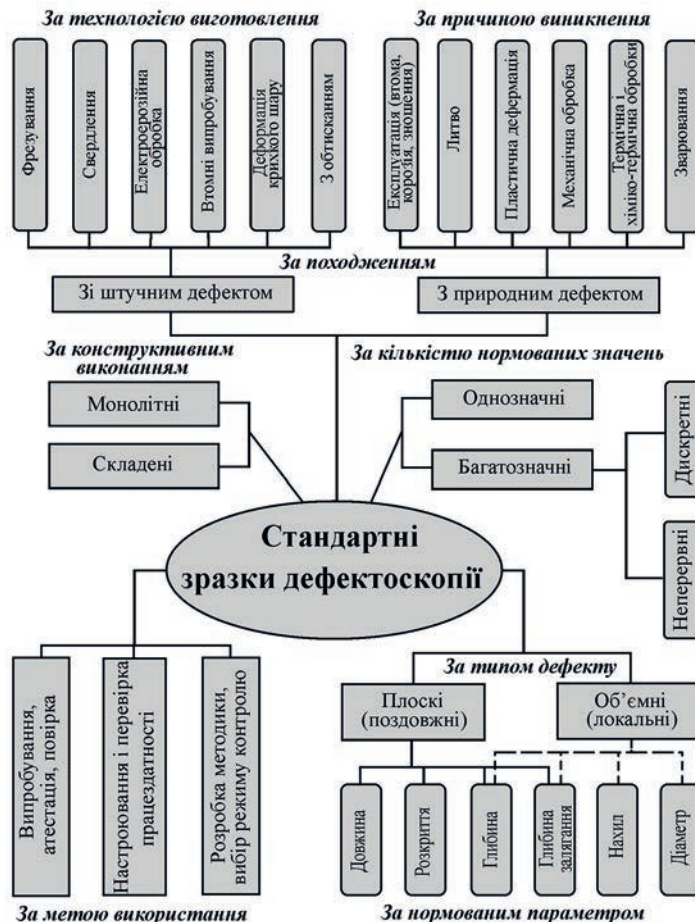


Рис. 1. Класифікація стандартних зразків дефектоскопії

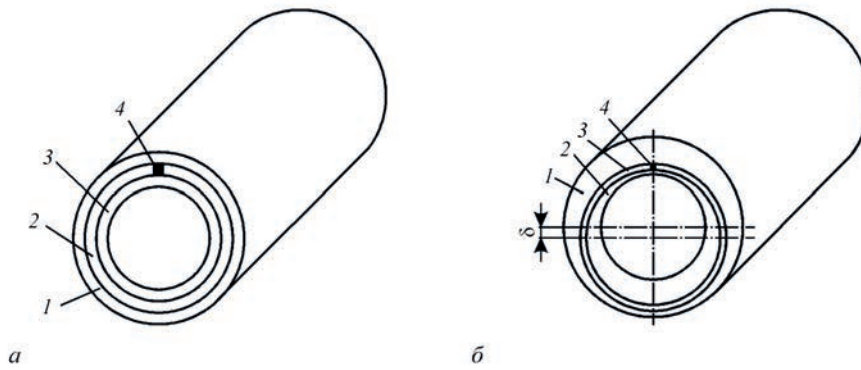


Рис. 2. Однозначний дискретний (а) і багатозначний (б) СЗ складеного типу для імітації дефектів циліндричних ОК: 1–3 – шари циліндричного СЗ; 4 – ШД; δ – ексцентриситет

ведливе співвідношення $l_{тр} \gg a \gg c$, де $l_{тр}$ – довжина тріщини, a – її глибина та c – ширина. Для локальних дефектів (наприклад пор), ці параметри близькі. Видовжені ШД типу тріщини переважно імітують пазами (прорізами), які виконують електроерозійним методом або тонкою фрезою. Найтонкіші пази, що краще відтворюють природну тріщину, виконують електроерозійним методом, який створює дефекти шириною (розкриттям) до 0,1 мм. Виконання ШД фрезуванням простіше, але не дає можливості виконати ШД завширшки менше 0,2 мм. Розкриття таких ШД зменшують обтисканням, для чого нагрівом збільшують пластичні властивості матеріалу [11]. Локальні об’ємні дефекти типу пори або корозійної виразки імітують зазвичай свердленням з плоским дном [14, 15].

Недоліком СЗ із ШД є те, що за своїми властивостями і, що особливо важливо, за здатністю формувати відповідний сигнал ВСП вони відрізняються від СЗ з природними дефектами (зокрема втомними й корозійними). В окремих випадках для відтворення властивостей втомних тріщин їх створюють шляхом циклічних навантажень на машинах для механічних випробувань. Для поздовжніх дефектів типу тріщини основними параметрами, які нормують під час атестації СЗ, може бути їхня глибина, глибина залягання для підповерхневих дефектів або нахил площини дефекту відносно поверхні ОК. Для локальних дефектів нормованими параметрами є: глибина, діаметр, глибина залягання для підповерхневих дефектів або нахил відносно контрольованої поверхні.

За кількістю значень відтворюваного нормованого параметра дефекту СЗ можуть бути однозначними або багатозначними (рис. 1). Тобто СЗ може імітувати один або декілька дефектів з різними значеннями нормованого розміру. Багатозначні СЗ можуть відтворювати дискретні або неперервні значення нормованого параметра дефекту в діапазоні його зміни. Конструктивно СЗ можна викона-

ти у вигляді монолітного зразка або скласти з двох або більше частин. Складені СЗ використовують найчастіше для імітації підповерхневих дефектів [16–18].

На рис. 2 наведено складений СЗ для імітації підповерхневих дефектів у циліндричних ОК. СЗ на рис. 2, а виконано у вигляді шаруватого циліндра з ШД у вигляді прорізу вздовж твірної циліндра в одному з шарів [16]. Вибором товщини циліндричного шару з наскрізним ШД задають його глибину, а вибором товщини зовнішнього шару – глибину його залягання. Такий СЗ відтворює тільки одне значення глибини ШД і одне значення його глибини залягання, тобто дискретні значення параметрів ШД. Він не може імітувати ШД, різні за глибиною та з різною глибиною залягання. Для цього необхідно створювати окремі СЗ, які імітуватимуть дискретні значення відповідних параметрів.

Універсальнішим є складений СЗ на рис. 2, б у вигляді ексцентричних втулок 1, 2, між якими розташовано циліндричну втулку 3 з ШД 4 [17]. Поворотом втулки такого СЗ можна змінювати глибину залягання ШД у певному діапазоні за сталих розміру ШД і товщини циліндричного ОК, тобто цей СЗ є багатозначною мірою глибини залягання дефекту. Недоліком є складність виготовлення цього СЗ, оскільки для щільного з’єднання втулок необхідно забезпечити їх точні розміри по всій довжині зразка. В іншому випадку будуть існувати зазори між шарами, що впливатимуть на сигнал ВСП.

СЗ дефектоскопії можуть класифікуватися відповідно до мети їхні використання, оскільки вони призначені для забезпечення достовірності контролю шляхом: 1) випробувань, атестації та перевірки (калібрування) ВД; 2) налаштування та періодичної перевірки працездатності ВД для виконання конкретної методики контролю; 3) вибору режимів контролю під час розробки методики з урахуванням особливостей ОК і чинників, що створюють завади (рис. 1). Процедури

випробування, атестації і первинної повірки (калібрування) ВД – важливий етап їх створення, під час якого нормують метрологічні характеристики (переважно поріг чутливості й роздільну здатність). Цей етап підлягає метрологічному контролю акредитованими установами за допомогою СЗ, які пройшли відповідну метрологічну оцінку. Такі СЗ пропонує розробник ВД або акредитована установа, тому їх часто називають первинними. Перевірку настроювання ВД і його спроможності виконувати методику контролю конкретного виробу здійснюють безпосередньо на робочому місці. Тут використовують СЗ, які максимально відтворюють особливості ОК. Параметри ШД таких дефектів обирають залежно від вибраного бракувального критерію, який може відрізнятися від порога чутливості ВД. Ці СЗ повинні імітувати особливості всієї номенклатури ОК підприємства та їх на практиці найчастіше виготовляють підприємства, що експлуатують засоби НК. Такі СЗ часто визначають як вторинні СЗ. Вони не завжди підлягають метрологічній оцінці та, у кращому випадку, проходять технічний контроль на відповідність кресленням. На дослідницькому етапі визначають принципову можливість розв’язати нову задачу НК, вибирають режими контролю (наприклад, тип ВСП, робочу частоту тощо) та оптимізують методику контролю з урахуванням конструкційних особливостей ОК. Тут необхідні СЗ, що повністю відтворюють умови контролю конкретного виробу (ПЕП, МП, наявність покриття, кривизна поверхні, конструктивні особливості тощо). Ці СЗ не потребують метрологічної оцінки, оскільки після закінчення досліджень їх не використовують.

Для реалізації технологій кількісної дефектоскопії з визначенням параметрів виявлених дефектів метрологічне забезпечення (у тому числі підходи до вибору СЗ) має суттєво змінюватись. Сьогодні практика атестує ВД тільки за допомогою СЗ з ШД, що характеризує поріг чутливості. Для кількісної дефектоскопії необхідно створити СЗ, які відтворюють параметри ШД у діапазоні їх зміни та оцінити похибку їх визначення.

У реальних умовах контролюють умови впливу низки параметрів, що змінюють граничну чутливість ВД. Строго кажучи, поріг чутливості ВД є функцією багатьох параметрів (наприклад, зазору між ВСП і поверхнею ОК, відстанню до краю ОК, ПЕП і товщини ОК). Методологічно вірний підхід передбачав би нормування цих впливів для оцінювання можливості дефектоскопії у реальних умовах. Але на практиці такий підхід не застосовують, оскільки для цього необхідний великий набір СЗ.

На практиці використовують найпростіші плоскі СЗ, на всю ширину яких нанесено паз, глибина якого відповідає порогу чутливості ВД. Такий СЗ оцінює поріг чутливості тільки за глибиною. Суттєвим недоліком є неможливість встановити поріг чутливості ВД за довжиною дефектів. Крім того, не оцінюється вплив кривизни поверхні й краю. Кращі можливості забезпечують СЗ з поверхневими дефектами, виконані із алюмінієвого сплаву Д16 (СОП 5-1), титанового сплаву ВТ3 (СОП 5-2) і феромагнітної сталі Ст45 (СОП 5-3), якими раніше комплектували ВД типу ПРОБА-5 (рис. 3) [12]. Пази завдовжки 2 мм розкриттям до 0,1 мм виконані електроерозійним способом латунним електродом завтовшки 0,05 мм. На поверхні СЗ із алюмінієвого сплаву нанесені пази завглибшки 0,2 і 0,5 мм, а у СЗ із титанового сплаву та сталі – завглибшки 0,5 і 1,5 мм. Крім пазів, на плоску частину СЗ (рис. 3, дефекти 1, 2) нанесено пази на циліндричній випуклій (дефекти 3, 4) та увігнутій (дефекти 5, 6) ділянках радіусом 6 мм. Крім того, на край СЗ нанесено два дефекти завдовжки 0,5 і 1,0 мм (дефекти 7, 8). Таким чином, такі СЗ дають можливість оцінювати чутливість ВД за глибиною та довжиною поверхневого ШД на плоскій і криволінійній поверхнях у феромагнітних сталях і неферомагнітних матеріалах з різною ПЕП. Недоліком цього СЗ є складність виготовлення та висока ціна, що унеможливило комплектування ними кожного ВД. Тим не менше, ці СЗ успішно використовувались нами під час державних випробувань вихрострумівих автогенераторних дефектоскопів типу ЛЕОТЕСТ ВД, які проведено на базі ДП «Дніпро-стандартметрологія» (м. Дніпро) [13].

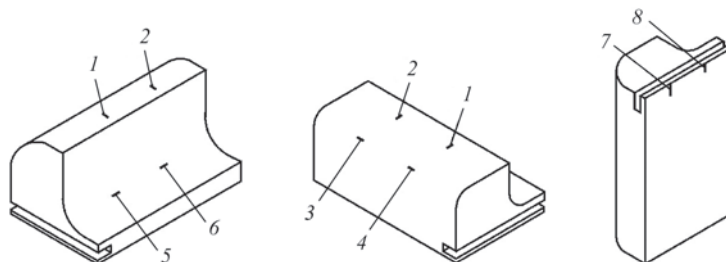


Рис. 3. СЗ типу СОП з поверхневими дефектами на плоскій (1, 2), випуклій (3, 4), увігнутій (5, 6) і крайовій (7, 8) ділянках

Європейський стандарт з перевірки характеристик ВСП пропонує загальні вимоги до СЗ, комплект яких для перевірки накладних ВСП наведено на рис. 4 [5]. Кожний із СЗ повинен мати довжину й ширину, як мінімум, у 10 разів більшу від довжини зони чутливості ВСП. Коли ця характеристика невідома, її треба замінити максимальним (активним) розміром ВСП у площині сканування. Відстань від паза до краю СЗ повинна у 2,5 рази перевищувати протяжність зони впливу краю. Товщина СЗ має бути, як мінімум, удвічі більша за стандартну глибину проникання вихрових струмів на найнижчій робочій частоті ВСП. Детальніші вимоги до кожного конкретного СЗ, зокрема кількість пазів, ширину та глибину пазів, діаметр отвору, слід навести в методиці контролю або експлуатаційній документації. Для дослідження сигналів ВСП від видовжених дефектів запропоновано СЗ типу А1 (рис. 4) з пазом у центральній зоні, який має бути довшим від мінімальної довжини паза, що викликає максимальний сигнал ВСП, і глибшим від мінімальної глибини поверхневого паза, що викликає максимальний сигнал ВСП. Для дослідження сигналів ВСП від локальних дефектів запропоновано СЗ типу А2 з отвором у центральній зоні. Рекомендовано, щоб глибина отвору дорівнювала глибині паза в блоці А1. Для оцінки впливу товщини, зокрема ефективної глибини проникання вихрових струмів, запропоновано набір СЗ типу А3, які подібні до зразка А1 без паза з різною товщиною, що збільшується до трьох значень стандартної глибини проникання або до двох активних розмірів ВСП. Цей СЗ разом з таким типу А1 використовують також для визначення ефективної глибини виявлення підповерхневих дефектів. Згідно з запропонованою класифікацією тут застосовано складений СЗ, в якому вибором товщини пластин імітують різну товщину ОК. Для

оцінки впливу глибини паза, зокрема визначення мінімальної глибини, яка викликає максимальний сигнал ВСП, запропоновано СЗ типу А4 (рис. 4). Він подібний до зразка А1, але має набір паралельних пазів, розташованих по центру СЗ. При цьому всі пази мають однакову довжину і ширину (як у СЗ А1), а глибина поступово збільшується з постійним кроком. Відстань між двома послідовними пазами має бути щонайменше у 5 разів більше, ніж розмір зони чутливості ВСП. Для оцінки впливу довжини дефекту на сигнал ВСП, зокрема визначення мінімальної довжини, що забезпечує постійний сигнал ВСП, запропоновано СЗ типу А5 (4). Він подібний до зразка А1, але з низкою паралельних пазів, які мають таку саму глибину та ширину, як пази у зразку А1, але їхня довжина поступово збільшується з постійним кроком. Відстань між двома послідовними пазами має бути щонайменше у 5 разів більша від розмірів зони чутливості ВСП.

Нагадаємо, що згідно з Європейським стандартом ці СЗ призначені для характеризування ВСП, що необхідно для вибору відповідного ВСП для вирішення поставленої задачі на етапі розробки методики контролю, а не для метрологічної оцінки ВД. Вони дають можливість визначити мінімальні глибину та довжину тріщини, які викликають максимальний сигнал ВСП. За їх допомогою можна встановити локальність контролю (за розмірами зони чутливості), дослідити вплив орієнтації ВСП відносно тріщини, вплив товщини ОК тощо. Проте вони не забезпечують оцінку роздільної здатності, для якої необхідні СЗ з дефектами, розташованими на різній відстані. Роздільну здатність у цьому випадку можна оцінити тільки опосередковано за розмірами зони чутливості. Європейський стандарт передбачає також використання складеного СЗ, в якому дефект імітовано

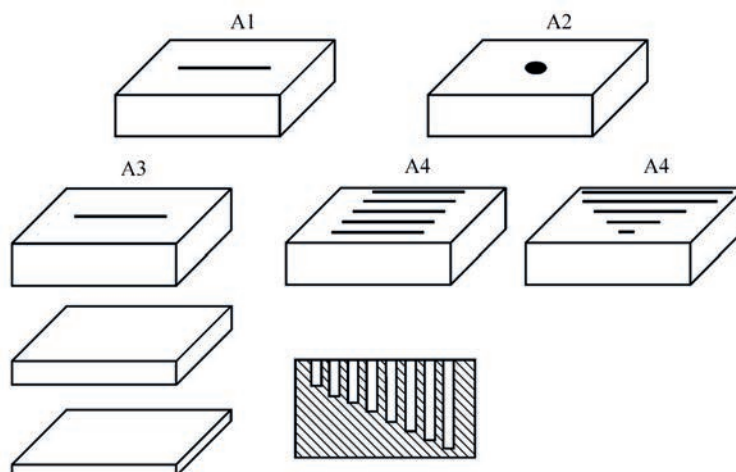


Рис. 4. СЗ для перевірки характеристик накладних ВСП згідно з Європейським стандартом [5]

стиком двох шліфованих пластин. Цей варіант СЗ традиційно використовують для дослідження сигналів ВСП з різною глибиною залягання, а також для відпрацювання методик контролю багатощарових авіаційних вузлів.

2. Багатозначні складені СЗ для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів у циліндричних плоских ОК. Більшість відомих СЗ можна використовувати тільки для імітації поверхневих дефектів. Для реалізації технологій виявлення та оцінки прихованих підповерхневих дефектів на низьких робочих частотах необхідні СЗ з ШД, які додатково пронормовано за глибиною їх залягання. Нами запропоновано багатозначний складений СЗ (рис. 5) для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів для обертового контролю циліндричних ОК (В.М. Учанин, В.Л. Найда, І.І. Кириченко, О.М. Гоголя Стандартний зразок для настроювання, калібрування та атестації вихрострумових дефектоскопів. Пат. України № 39172. Опубл. 10.02.2009; Бюл. № 3). СЗ для імітації поверхневих дефектів складається з двох циліндричних трубчастих частин 1 і 2 з зовнішнім діаметром D , внутрішнім d і товщиною стінки T . Для імітації (рис. 5, а) один кінець циліндричної трубчастій частині 1 оброблено на кінцевій ділянці 3 з довжиною l по конусній поверхні так, що зовнішній діаметр кінцевої ділянки 3 збільшується від кінця трубки по довжині ділянки l під заданим кутом α° відносно поверхні циліндра. Частину 2 зразка оброблено на кінцевій ділянці 4 з довжиною l по конусній поверхні так, що внутрішній діаметр кінцевої ділянки 4 зменшується від кінця трубки по довжині ділянки l під тим самим кутом α° . Обидві частини СЗ з'єднані по конусних поверхнях кінцевих ділянок 3 і 4 так, що утворюють єдиний циліндр. Для імітації поверхневого дефекту типу тріщина на кінцеву конусну ділянку 4 другої частини СЗ нанесено тонкий наскрізний проріз з довжиною l і шириною c . У результаті СЗ імітує поверхневий дефект, глибина a якого змінюється

від 0 до T залежно від положення обертового ВСП уздовж СЗ (рис. 5, а).

Для імітації підповерхневої тріщини (рис. 5, б) тонкий наскрізний проріз з довжиною l і шириною c нанесено на кінцеву конусну ділянку 3 першої частини 1. Після з'єднання частин СЗ по конусних поверхнях 3 і 4 імітується підповерхневий дефект з довжиною l , шириною c зі змінною глибиною залягання h_3 від 0 до T . Для імітації об'ємного локального дефекту типу пори на кінцеві ділянки СЗ можна нанести свердлення різного діаметра.

СЗ на рис. 5 є простими у виготовленні та імітують дефекти різного типу й розміру, які залягають на різній відстані від поверхні ОК. Глибину дефекту або його глибину залягання в зоні контролю визначає положення обертового ВСП b вздовж дефектної ділянки СЗ, тому цей СЗ згідно з класифікацією (рис. 1) є складеним багатозначним.

Для імітації підповерхневих дефектів різної глибини і глибини залягання в плоских ОК запропоновано складений багатозначний СЗ (рис. 6), який містить дві клиновидні частини 1 і 2, що мають однаковий кут нахилу α (В.М. Учанин, В.Г. Рибачук Стандартний зразок для настроювання та атестації вихрострумових дефектоскопів. Патент України № 39189. Опубл. 10.02.2009; Бюл. № 3). Частини СЗ стикуються по площині 4 так, що утворюється пластина з плоскопаралельними поверхнями. Для імітації тріщин в одній з клиновидних частин виконують тонкий розріз 5. Площина розрізу є перпендикулярною до площини стику 4 клиновидних частин. Під час встановлення ВСП на поверхню СЗ, яка належить до клиновидної частини 1 без розрізу (рис. 6), імітується підповерхнева тріщина зі змінною глибиною залягання h_3 та змінною глибиною a , які залежать від відстані l між ВСП та краєм СЗ з довжиною L . Під час встановлення ВСП b на поверхню СЗ, яка належить до клиновидної частини 2 з розрізом, ШД імітує поверхневу тріщину. При цьому глибина ШД a змінюється залежно від відстані l між ВСП та краєм СЗ. Із рис. 6 видно, що

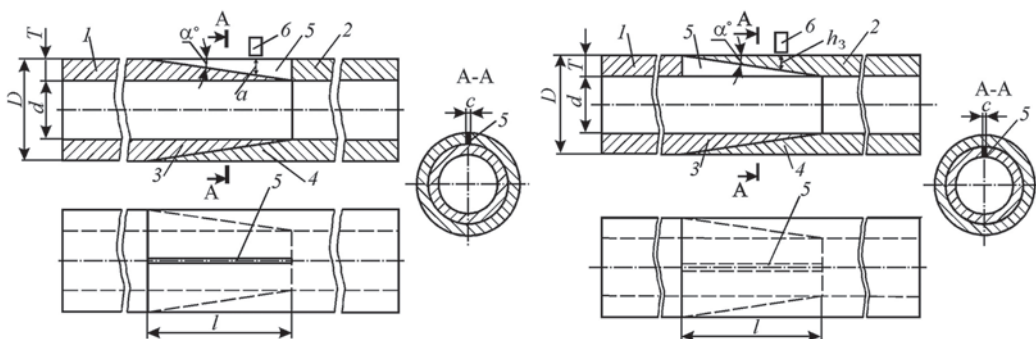


Рис. 5. Складений СЗ для імітації поверхневих (а) і підповерхневих (б) дефектів типу тріщини в циліндричних ОК: 1, 2 – частини СЗ; 3, 4 – конусні кінцеві ділянки частин СЗ; 5 – дефект на зовнішній (а) і внутрішній (б) конусних ділянках; 6 – ВСП

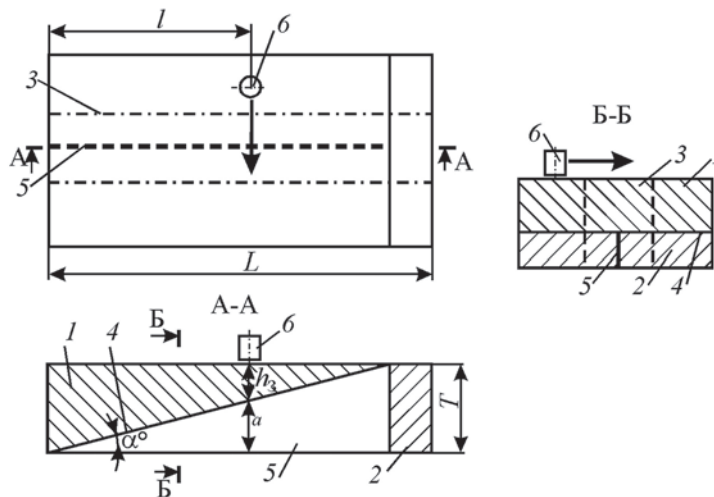


Рис. 6. Складений багатозначний СЗ для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів у плоских ОК зі зварним швом: 1, 2 – клиновидні частини; 3 – область зварного шва; 4 – стик; 5 – ШД дефект; 6 – ВСП

глибина залягання h_3 тріщини та її глибина a залежать від відстані l між ВСП та краєм СЗ відповідно до співвідношень $a = l \cdot \operatorname{tg} \alpha$ і $h_3 = T - a = T - l \cdot \operatorname{tg} \alpha$. Змінюючи відстань l ВСП від краю СЗ, можна імітувати поверхневу та підповерхневу тріщини різної глибини та глибини залягання у деякому неперервному діапазоні значень цих параметрів. За необхідності на поверхню СЗ можна нанести лінійну шкалу імітованого параметра.

Для імітації дефектів типу непровар у зварних швах клиновидні частини СЗ виготовляли з пластин із попередньо нанесеним зварним швом (штрихова лінія на рис. 6). При цьому напрямок нахилу клиновидних частин СЗ збігається з напрямком зварного шва. ШД у вигляді розрізу наносили на клиновидну частину 2 в області зварного шва.

Існують ситуації, коли достатньо імітувати дискретні значення параметра дефекту. Зокрема для дослідження впливу глибини залягання де-

фекту незалежно від його розміру можна застосовувати СЗ, який імітує дефект однакової глибини для двох дискретних значень глибини залягання (рис. 7) [19]. Дві частини СЗ складають так, що після їх суміщення утворюється прямокутна пластинка з товщиною T з підповерхневим дефектом з глибиною a . Дефект – перпендикулярний до поверхні зразка стик двох частин. З різної поверхні згідно зі співвідношенням $h_{31} + h_{32} + a = T$. Виготовлено два СЗ із алюмінієвого сплаву Д16Т завтовшки 7 мм: один імітує тріщину завглибшки 2 мм, що залягає на глибинах 2 і 3 мм; а інший – тріщину завглибшки 2 мм, що залягає на глибинах 1 і 4 мм.

Такий комплект СЗ дозволяє імітувати чотири значення глибини залягання однакового за розмірами дефекту та дослідити вплив глибини його залягання на сигнал ВСП незалежно від розмірів і товщини пластини. Сигнали ВСП для цих СЗ досліджували за допомогою вихрострумової плати EDDYMAX. На рис. 8 наведено сигнали ВСП типу МДФ 0801 у комплексній площині на робочій частоті 1 кГц. Коефіцієнт підсилення для ШД з глибиною залягання $h_3 = 1$ і 2 мм дорівнював 44 дБ. Для дефектів з $h_3 = 3$ і 4 мм (рис. 8, в, г) підсилення збільшили на 12 дБ, зважаючи на велику різницю амплітуди сигналу для ШД з різною глибиною залягання.

Наведені результати ілюструють принцип застосування СЗ (рис. 7) для визначення можливості

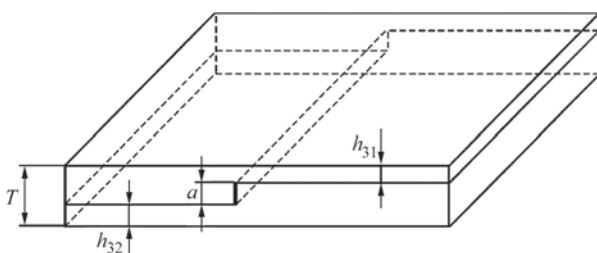


Рис. 7. Складений СЗ для імітації двох дискретних значень глибини залягання дефекту

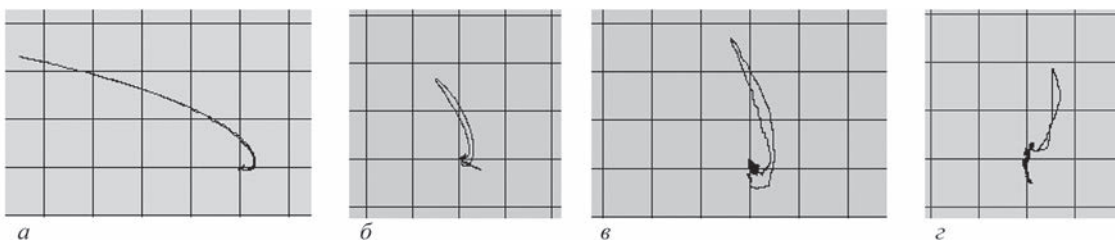


Рис. 8. Сигнали ВСП від протяжного дефекту типу тріщини з глибиною залягання h_3 (мм): 1 (а); 2 (б); 3 (в), 4 (г)

вихрострумове методу, зокрема для виявлення дефектів типу тріщини завглибшки $a = 2$ мм, що залягають у виробі із алюмінієвих сплавів на глибині до 4 мм. Видно, що вибраний ВСП на робочій частоті 1 кГц забезпечує надійне виявлення усіх дефектів СЗ з розміром у глибину 2 мм, що залягають в алюмінієвих сплавах на глибині до 4 мм. Зі збільшенням глибини залягання ШД амплітуда сигналу ВСП суттєво зменшується. При цьому годограф сигналу ВСП зі збільшенням глибини залягання розгортається за годинниковою стрілкою, тобто змінюється фаза сигналу ВСП, що необхідно врахувати під час розробки методики контролю. Описаний комплект складених СЗ використали для дослідження та розробки методики виявлення внутрішніх дефектів у багатошарових авіаційних конструкціях і зварних з'єднаннях із алюмінієвих сплавів.

3. Виготовлення СЗ для імітації нахилених дефектів. Більшість відомих СЗ можна використовувати тільки для імітації поверхневих дефектів, орієнтованих перпендикулярно до поверхні ОК. Це можна пояснити тим, що такі дефекти є характерними для більшості конструкцій, хоча відомі випадки утворення нахилених тріщин, зокрема за контактної взаємодії поверхонь під час кочення [20]. У нечисленних випадках для виявлення та оцінки дефектів різної орієнтації необхідні СЗ з дефектами, що орієнтовані відносно поверхні ОК під заданим кутом. Відомі способи виготовлення СЗ не дозволяють створити нахилені ШД із заданим кутом нахилу, оскільки під час спроб їх нанести тонкі фрези деформуються й процес різання стає нестабільним, особливо за малих (менше 60°) кутів нахилу фрези відносно поверхні. Для створення СЗ з нахиленими дефектами запропоновано спосіб їх виготовлення (В.М. Учанін Спосіб виготовлення контрольних зразків для настроювання, калібрування та атестації приладів неруйнівного контролю. Пат. України № 29293. Опубл. 10.01.2008; Бюл. № 1). Для його реалізації спочатку вибирають матеріал, електрофізичні характеристики (ПЕП і МП) якого відповідають ОК, з якого виготовляють заготовку 1 (рис. 9.). На поверхні за-

готовки виконують клиноподібний виріз 2, бокова поверхня якого нахилена під кутом φ відносно до поверхні заготовки. Після цього на бокову поверхню вирізу наносять електроерозійним методом або тонкою фрезою ШД у вигляді тонкого паза 3 (рис. 9, а). Далі частину заготовки разом з вирізом видаляють по лінії 4 (рис. 9, а), формуючи поверхню СЗ. Отриманий СЗ імітує нахилений під кутом φ дефект типу тріщини (рис. 9, б). Вибором кута φ , глибини прорізу, нанесеного на бокову поверхню вирізу, і товщини видаленого шару заготовки можна імітувати дефекти різної глибини з різним нахилом відносно поверхні. Використання СЗ з нахиленими дефектами важливо для дослідження та відпрацювання вихрострумів методик кількісної оцінки параметрів нахилених тріщин [21].

4. Аналіз можливих причин відмінності сигналів ВСП штучних і природних тріщин та дослідження впливу ширини тріщини на сигнал ВСП. Автори [22] вважають, що природні тріщини та ШД у вигляді тонких пазів створюють близькі за характеристиками сигнали ВСП. Водночас велика кількість робіт щодо цього питання показують суттєву відмінність сигналів ВСП від природних і ШД [23–27]. Серед причин, якими пояснюють можливість розходження, називають: 1) наявність зони пластичної деформації в зоні природної тріщини [23]; 2) більшу величину розкриття ШД порівняно з природною тріщиною [24, 27]; 3) можливість електричного контакту стінок природної тріщини, на відміну від ШД, в якому можливість такого контакту відсутня [26]; 4) більшу шорсткість поверхні зламу природної тріщини на відміну від ШД, який має гладкі стінки [28]. Розглянемо ці відмінності сигналів ВСП від природних і ШД детальніше.

Традиційні моделі формування сигналу ВСП не враховують змін електрофізичних параметрів матеріалу в зоні пластичних деформацій, створених втомною тріщиною. У [23] вважають, що ширина цієї зони є достатньо великою та може значно перевищувати об'єм самої тріщини. Це призводить до значних змін ПЕП і МП у зоні дефекту, що може впливати на сигнал ВСП. Проте експерименталь-

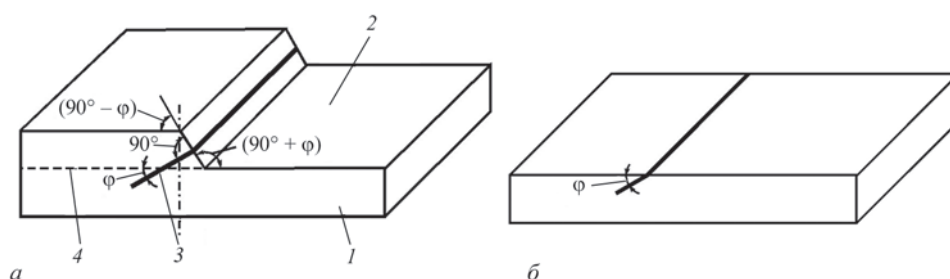


Рис. 9. Схема реалізації способу виготовлення (а) СЗ для імітації нахилених тріщин (б): 1 – заготовка; 2 – клиноподібний виріз; 3 – дефект; 4 – лінія видалення вирізу

них доказів щодо такого впливу не наведено.

Більша шорсткість поверхні зламу втомної тріщини, на відміну від ШД з гладкими стінками, характерними для електроерозійних ШД, також може бути однією з причин відмінності сигналів. Відомо, що шорстка поверхня втомної тріщини має фрактальний характер [29–31]. У [28] розглянуто вплив фрактального характеру зламу природної тріщини на сигнал ВСП. В якості простої моделі зламу тріщини використано один із варіантів поверхні Коха [32]. Показано, що збільшення фрактальної розмірності D поверхні зламу природної тріщини ($D > 2$) порівняно з розмірністю гладкої поверхні ($D = 2$) ШД призводить до збільшення електричного опору вихровим струмам у зоні тріщини. Проте експериментальних доказів щодо суттєвості такого впливу також не наведено.

У більшості робіт [24–27] на основі експериментальних досліджень показано, що сигнали від ШД суттєво перевищують сигнали від природних тріщин. У [24], зокрема, зазначено, що сигнал від ШД може перевищувати сигнал від природної тріщини відповідної глибини у 2–5 разів. Показано, що сигнали від природної тріщини мають більшу варіабельність порівняно з сигналами від ШД, а також існує залежність розходження параметрів сигналу від ШД і природної тріщини від робочої частоти, коли відмінність між сигналами ВСП від природних і ШД стає більшою зі збільшенням робочої частоти. Автори цих робіт припускають, що основною причиною розходжень сигналів природних і ШД є різне розкриття дефектів, оскільки порівнювали сигнали від природних тріщин з малим розкриттям і ШД у вигляді пазів достатньо великої ширини. Зазначимо, що проведені експерименти могли дати хибні результати, оскільки за рівності глибини та довжини порівнюваних природних і ШД не було забезпечено однакових значень їхньої ширини (розкриття) через брак необхідних зразків. Для підтвердження висновку про вирішальний вплив ширини ШД на сигнал ВСП важливо провести відповідні теоретичні дослідження.

Для дослідження впливу ширини (розкриття) дефекту методом об'ємних інтегральних рівнянь [33–34] проведено розрахунок годографів сигналів параметричного ВСП для тріщини однакової глибини та довжини зі зміною її ширини. Досліджували сигнали від тріщини завдовжки 5 мм і завглибшки 1 мм, що залягає в немагнітному півпросторі з ПЕП 20 МСм/м на робочій частоті 1 МГц. Обмотка досліджуваного ВСП складалася із 20 витків заввишки 0,5 мм з внутрішнім і зовнішнім радіусами 0,45 і 0,55 мм відповідно. Отримані значення імпедансу ВСП під час взаємо-

дії з дефектом нормували відносно імпедансу ВСП за встановлення його на бездефектний півпростір з ПЕП 20 МСм/м ($R_{20} = 0,174$ Ом; $X_{20} = 1,806$ Ом і $L_{20} = 0,287$ мкГн). Усі геометричні параметри разом із розкриттям c нормували відносно середнього діаметра ВСП (1 мм). Розрахунки виконано для відносних значень розкриття c' від 0,01 до 2,4, що відповідає можливому розкриттю природних і штучних дефектів. Зазначимо, що ШД найчастіше виготовляють з розкриттям до 0,3 мм, що в нашому випадку відповідає приведеному значенню $c' = 0,3$. Отримані результати (рис. 10) свідчать, що амплітуда сигналу ВСП суттєво залежить від розкриття тріщини. З його збільшенням від 0,01 до 0,3 амплітуда зростає на порядок (від 0,0026 до 0,083), а фаза сигналу змінюється від 62 до 82°. Зі збільшенням розкриття від 0,01 до 2,4 амплітуда сигналу зростає на два порядки (від 0,026 до 0,26), а фаза змінюється від 62 до 103°.

Отримані розрахункові результати підтвердили висновок про вирішальний вплив ширини дефекту на відмінність сигналів ВСП від природних і ШД. Під час виготовлення СЗ, що імітує втомні тріщини, важливо виконувати ШД з малим розкриттям. Перевагу слід віддавати методам, що передбачають обтискання СЗ зі штучним дефектом для зменшення його ширини.

5. Дослідження впливу довжини тріщини на сигнал ВСП. Дослідження впливу довжини тріщини на сигнал ВСП має методологічне значення для визначення умов відтворюваності результатів контролю під час використання СЗ з дефектами типу тріщина. У метрології відтворюваність (в англійській літературі – reproducibility) є характеристикою якості вимірювань, яка відображає близькість результатів вимірювань однієї й тієї ж величини, виконаних у різних умовах [6]. Для дефектоскопії відтворюваність є не менш важли-

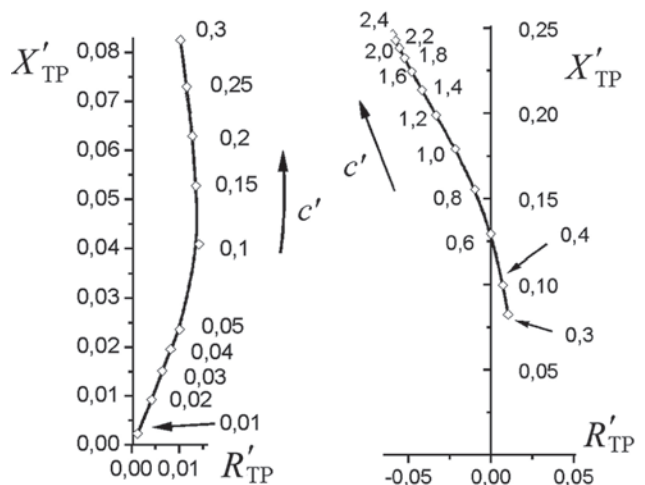


Рис. 10. Годограф сигналу ВСП від тріщини залежно від її розкриття c' у діапазоні від 0,01 до 0,3 (а) і від 0,3 до 2,4 (б)

вою, оскільки виступає мірою порівнюваності результатів контролю, що отримані у різних місцях, різними операторами-дефектоскопістами та засобами контролю. Зазначимо, що крім терміну «відтворюваність», у новіших документах з метрології використовують споріднений термін «повторюваність» (в англійській літературі – *repeatability*), який відображає близькість результатів вимірювань в умовах повторюваності, коли незалежні результати випробувань отримано одним методом на ідентичних зразках в одній лабораторії та одним оператором із використанням одного обладнання за короткий інтервал часу [35]. Очевидно, що цей термін відображає індивідуальні особливості оператора, зокрема рівень його кваліфікації.

Вплив довжини тріщини на сигнал ВСП досліджувався у багатьох роботах, які показали близькі результати [36–41]. У [36] за результатами експериментальних досліджень на фізичних моделях зі сплаву Вуда помилково зазначено, що розподіл сигналу ВСП від довгої тріщини має два максимуми в зоні її закінчень за відсутності центрального максимуму, що можна пояснити недостатньою точністю експериментальних досліджень. Очевидно, що теоретичні дослідження дозволяють виявити особливості, які можуть бути пропущені за експериментальних досліджень [37]. У [41] дослідження розподілу сигналу ВСП проведено у широкому діапазоні співвідношення довжини тріщини відносно діаметра ВСП, результати яких добре узгоджуються з результатами досліджень інших авторів [37–40]. У [41] досліджували параметричний ВСП з однією обмоткою під час сканування електропровідного немагнітного ОК з тріщиною у вигляді поверхневого прямокутного пазу довжиною $l_{\text{ТР}}$, глибиною a та шириною (розкриттям) c ($l_{\text{ТР}} \gg a \gg c$), розміщеного в центрі системи координат, де координати X і Y відповідають поперечному та повздовжньому відносно тріщини напрямкам відповідно. Внесені тріщиною зміни амплітуди сигналу ВСП $Z_{\text{ТР}}$ нормували відносно амплітуди імпедансу ВСП $Z_{\text{ОК}}$ за встановлення на бездефектну частину ОК: $Z'_{\text{ТР}} = \Delta Z / Z_{\text{ОК}}$. Геометричні параметри нормували до діаметру ВСП D_c , тобто приведена довжина тріщини $l'_{\text{ТР}} = l_{\text{ТР}} / D_c$, а приведена координата $y' = y / D_c$. Розрахунок розподілу амплітуди по координаті Y проведено для алюмінієвого сплаву з ПЕП $\sigma = 20$ МСм/м на робочій частоті 1 МГц. На рис. 11 наведено розподіл амплітуди сигналу вздовж тріщини вздовж її довжини за координатою y для різних співвідношень довжини тріщини до діаметру ВСП, а саме: для коротких тріщин з $l'_{\text{ТР}} = 0,3$ (○) і $l'_{\text{ТР}} = 1$ (●) та довгих тріщин з $l'_{\text{ТР}} = 4$ (△) і $l'_{\text{ТР}} = 5$ (▼). Отримані розпо-

діли амплітуди сигналів ВСП у такому широкому діапазоні довжин $l'_{\text{ТР}}$ дають можливість наглядно підкреслити суттєвий вплив довжини тріщини на характер просторового розподілу амплітуди сигналу від тріщини. Для коротких тріщин розподіл сигналу має двогорбий симетричний характер з мінімумом при $y = 0$ (ВСП над центром тріщини), який може досягати нуля для тріщин завдовжки $l'_{\text{ТР}} < 0,3$. Максимального значення сигнал ВСП досягає, коли коротка тріщина розташована безпосередньо під витками ВСП у зоні максимальних вихрових струмів. Наявність двох максимумів для коротких тріщин може інтерпретуватися як сигнали від двох окремих дефектів. Для довгих тріщин розподіл має один максимум, що відповідає положенню ВСП по центру тріщини. Подальше збільшення довжини тріщини від $l'_{\text{ТР}} = 4$ вже не буде впливати на амплітуду сигналу, оскільки криві розподілу на цій ділянці фактично збігаються.

Аналіз наведених залежностей дозволяє зробити важливі висновки щодо вибору довжини тріщин під час розробки СЗ. Короткі тріщини створюють велику варіабельність сигналу ВСП під час сканування зони тріщини. Це унеможливує використання СЗ з короткими тріщинами для оцінки відтворюваності або повторюваності результатів вихрострумовевого контролю, оскільки забезпечення однакових умов відтворюваності результатів під час сканування зони тріщини різними операторами-дефектоскопістами фактично неможливе. Для оцінювання відтворюваності або повторюваності результатів контролю доцільно використовувати СЗ з довгими тріщинами, під час використання яких незначне зміщення не буде суттєво впливати на сигнал ВСП. У цьому випадку доцільно й суттєво простіше виготовити СЗ зразки з дефектом типу тріщина по всій ширині СЗ.

У той же час, СЗ з короткими дефектами типу

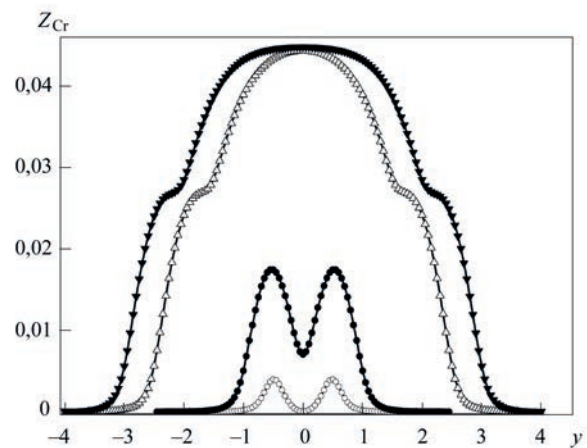


Рис. 11. Розподіл амплітуди сигналу вздовж тріщини за координатою y залежно від її довжини для коротких ($l'_{\text{ТР}} = 0,3$ (○) і $l'_{\text{ТР}} = 1$ (●)) та довгих ($l'_{\text{ТР}} = 4$ (△) і $l'_{\text{ТР}} = 5$ (▼)) тріщин

тріщина необхідно використовувати для оцінки границі чутливості по довжині тріщин, які необхідно виявляти у випадках, коли це важливо для поставленої дефектоскопічної задачі (див., наприклад, СЗ на рис. 3).

6. Методика статистичного оцінювання параметрів стандартних зразків. Для створення СЗ можливе застосування природних дефектів або дефектів, отриманих під час втомних випробувань (рис. 1). Але проблема полягає у визначенні параметрів таких дефектів, оскільки з достатньою точністю визначити їх шляхом прямих вимірювань можна тільки після руйнування СЗ, коли вони вже непридатні для метрологічного обслуговування приладів НК.

Відомі методики створення СЗ, де цього протиріччя позбуваються шляхом дослідження СЗ з руйнуванням частини відібраних довільно зразків і приписуванням незруйнованим зразкам значення контрольованого параметра, визначеного прямими вимірюваннями [42]. При цьому загальну кількість зразків і тих, що руйнуються, визначають емпірично, а номінальне значення параметра незруйнованим зразкам приписують за неперевіреним припущенням про однорідність всієї вибірки. Очевидно, що така методика є правомірною лише тоді, коли розкид значень контрольованого параметра для більшої кількості зразків невеликий. В інших випадках приписане СЗ значення контрольованого параметра недостатньо обґрунтоване, оскільки може відрізнятись від дійсного з невизначеною похибкою.

Одним із можливих варіантів комплексного вирішення проблеми є використання статистичного підходу, який вперше був використаний для створення СЗ для атестації і повірки приладу вимірювання коефіцієнта заповнення шихти у порошковому дроті [43, 44], що проводили згідно з нашим винаходом (А.Я. Тетерко, О.Л. Годовник, Ю.В. Поздняков, В.Н. Учанин. Способ настройки, калибровки и поверки прибора для контроля заполнения порошковой проволоки шихтой. Авт. свид. СССР № 1569694. Опубл. 07.06.90, Бюл. № 21). У подальшому статистичний спосіб атестації і повірки СЗ був розвинутий для інших задач НК, зокрема дефектоскопії (В.Н. Учанин, Ю.В. Поздняков, Ю.Н. Агапов. Способ получения меры для поверки приборов неразрушающего контроля. Авт. свид. СССР № 1753394. Опубл. 07.08.92, Бюл. № 29). Запропонований статистичний підхід дає оцінку похибки визначення контрольованого параметра незруйнованих СЗ, які залишили для використання, оскільки базуються на можливості використання для оцінювання СЗ робочого засобу

НК, який необхідно повірять. Зазначимо, що в дефектоскопії контрольованим параметром найчастіше є глибина дефектів. Для СЗ вихрострумової дефектоскопії з втомними тріщинами запропоновану методику можна подати як послідовність наступних операцій [45]:

1) На першому етапі відбирають сукупність із N зразків, якими можуть бути самі контрольовані вироби або їхні фрагменти з природними тріщинами. Матеріал і геометричні параметри відібраних зразків мають бути однаковими. Під час виготовлення СЗ з тріщинами методом втомних випробувань бажано відбирати зразки з однаковою кількістю циклів навантаження. Достатню для групи кількість N зразків можна визначити заздалегідь, аналізуючи розкид контрольованого параметра для зразків даного типу.

2) На наступному етапі використовують ВД, від якого вимагають тільки певної кореляції між параметрами вихідного сигналу та контрольованим параметром тріщини (наприклад, між амплітудою сигналу та глибиною тріщини). Вибирають робочу частоту такою, щоб існувала залежність сигналу від параметра тріщини (наприклад, глибини) у визначеному діапазоні змін. Для цього можна використати СЗ зі ШД.

3) Контролюють відібрані зразки за допомогою підготовленого ВД і реєструють його покази для кожного зразка. Після цього впорядковують зразки, розташовуючи їх за порядком зростання показів ВД.

4) Формують першу групу контрольованого параметра (глибини тріщини). Для цього із первісної сукупності N зразків відбирають W зразків, для яких значення показів приладу є близькими до мінімальних. Для більшості ВД індикаторного типу цього достатньо. Для кількісного контролю формують аналогічно групи зі зразків, що мають середні й максимальні покази ВД у діапазоні змін. За великої дисперсії значень показів приладу необхідно збільшити (наприклад, подвоїти) об'єм первісної вибірки зразків доти, поки із досліджуваної кількості зразків буде отримано по W однорідних зразків для кожної групи.

5) Далі у довільному порядку відбирають із кожної групи по Q із W зразків, дійсні значення X контрольованого параметра дефекту (глибини) визначають прямими методами (наприклад, за допомогою вимірювального мікроскопа) після їх руйнування.

6) Розраховують оцінку математичного сподівання досліджуваного параметра (глибини) для кожної групи однорідних зразків за формулою:

$$W_{ik} = 1 / Q \sum_{k=1}^Q X_{ik}, \text{ де } i - \text{ номер групи, } k = 1 \dots Q.$$

Цю оцінку приймають за дійсне значення контрольованого параметра, відтворюваного кожною групою мірою. Після цього значення математичного сподівання приписують відповідним СЗ групи на підставі раніше встановленої однорідності зразків, що в неї входять.

Для настроювання ВД можна використати будь-який із незруйнованих зразків. Для калібрування приладів у середині та у кінці діапазону використовують СЗ відповідної групи. Основну похибку приладу в точках калібрування визначає, в основному, похибка кожної з груп, під якою слід розуміти похибку відтворення групами приписаних їм значень. Цю похибку можна оцінити через похибку повірки групи, попередньо оціненої точними прямими методами. Суттєвими чинниками, що визначають цю похибку, є точність прямих вимірювань, кількість зразків, що складають групу, і ступінь їхньої ідентичності за контрольованим параметром. Запропоновану методику статистичної оцінки успішно використано для оцінювання СЗ з втомними тріщинами у трубчастих зразках [45].

Висновки

Розвинуто методологію метрологічного забезпечення засобів вихрострумової дефектоскопії з використанням СЗ. Зокрема запропоновано класифікацію СЗ зі штучними дефектами та наведено відповідні приклади, що підтверджують правомірність запропонованої класифікації. В якості прикладу представлено конструкції складених багатозначних СЗ для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів у циліндричних і плоских ОК. Також наведено конструкцію складеного СЗ і відповідний комплект СЗ, які імітують підповерхневу тріщину однакового розміру з чотирма значеннями глибини її залягання та експериментально досліджено відповідні сигнали ВСП подвійного диференціювання. Запропоновано спосіб виготовлення СЗ для імітації нахилених тріщин. Проаналізовано низку робіт, які розглядають можливі причини відмінності сигналів ВСП від природної тріщини та ШД. За допомогою розрахунків методом об'ємних інтегральних рівнянь показано, що основною причиною відмінності сигналів ВСП від природних втомних дефектів і ШД є їхня ширина (розкриття). Розглянуто вплив довжини тріщини на особливості сигналу ВСП параметричного типу, які необхідно враховувати під час вибору параметрів СЗ щодо довжини тріщини. Наведено статистично обґрунтований спосіб достовірного оцінювання параме-

трів СЗ з природними дефектами, який успішно використано для оцінювання зразків з втомними тріщинами у трубчастих зразках.

Список літератури

1. Поліщук С.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. (2003) *Метрологія та вимірювальна техніка*. Львів, Бескид Біт.
2. Микитин Г.В. (2000) Особливості метрологічного забезпечення неруйнівного контролю. *Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту*, 5(3), 76–80.
3. Петрик В.Ф., Протасов А.Г. (2015) *Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі* (електр. ресурс). Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського.
4. Udpa, S.S., More P.O., et al. (2004) *Nondestructive testing handbook* (third edition). Vol. 5, *Electromagnetic testing*, American Society for NDT.
5. ДСТУ EN ISO 15548-2:2017. *Неруйнівний контроль. Обладнання для вихрострумового контролю. Частина 2. Визначення характеристик і верифікація перетворювачів* (EN ISO 15548-2:2013, IDT; ISO 15548-2:2013, IDT).
6. Шевченко О.І. (2022) *Метрологія. Терміни та пояснення*. Київ, ВАІТЕ.
7. Solomakha, R., Uchanin, V. (2024) Magnetic hysteresis analysis for non-destructive evaluation of aircraft structural steels. *Transaction in aerospace research*, 276(3), 1–12. DOI: <http://doi.org/10.2478/tar-2024-0013>
8. Uchanin, V.M., Ostash, O.P., Bychkov, S.A., Semenets, O.I., Derecha, V.Yu. (2021) Eddy current monitoring of aluminum alloy degradation during long-term operation of aircraft. *The Paton Welding J.*, 8, 45–51. DOI: <http://doi.org/10.37434/trwj2021.08.09>
9. *Про метрологію та метрологічну діяльність*. Закон України від 5.06.2014 р. № 1314-VII (зі змінами).
10. ISO/IEC Guide 99:2007. *International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms* (VIM).
11. Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение.
12. Билик Ю.З., Дорофеев А.Л. (1981) Электромагнитные дефектоскопы типа «Проба». *Дефектоскопия*, 6, 53–58.
13. Учанін В.М., Бичков С.А., Семенець О.І., Дереча В.Я., Александров С.А. (2022) Автогенераторні вихрострумові дефектоскопи для експлуатаційного контролю авіаційних конструкцій. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 22–29. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.04>
14. McMaster, R.C. McIntire, P. et al. (1986) *Nondestructive Testing Handbook*. Vol. 4: *Electromagnetic Testing (Eddy current, flux leakage and Microwave Nondestructive Testing)*. Second edition. USA, American Society for NDT.
15. Uchanin, V. (2024) Detecting and estimating local corrosion damages in long-service aircraft structures by the eddy current method with double-differential probes. *Transactions on aerospace research*, 275(2), 20–32. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0009>
16. Косовский Д.И., Шкарлет Ю.М., Хватов Л.А. и др. Имитатор для настройки дефектоскопов. Авт. свид. № 739391 СССР, МКИ G 01 N 27/86. Опубл. 05.06.80; Бюл. № 21.
17. Вяхирев В.Г., Никольшин В.С., Олейников П.П. Имитатор для настройки электромагнитных дефектоскопов. Авт. свид. № 926586 СССР, МКИ G 01 N 27/90. Опубл. 07.05.82; Бюл. № 17.
18. Вяхирев В.Г., Никольшин В.С., Олейников П.П. Настроечный имитатор для вихретоковых дефектоскопов (его варианты). Авт. свид. № 1006992 СССР, МКИ G 01 N 27/90. Опубл. 23.03.83; Бюл. № 11.
19. Mook, G., Uchanin, V., Lysenko, Ju. (2024) Studies of eddy current probes for inspection of aluminum alloy structure welds using smartphone-based flaw detector. *The Paton Welding J.*, 12, 42–48. DOI: <http://doi.org/10.37434/trwj2024.12.07>
20. Datsishin, O.P., Marchenko, G.P., Panasyuk, V.V. (1994) Theory of crack growth in rolling contact. *Materials Science*, 29(4), 373–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00566446>
21. Uchanin, V.M. (2025) Specific features of double-differentiation eddy current probe signals from inclined

- cracks. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 61(2), 139–144. DOI: <https://doi.org/10.15407/pcmm2025.02.139>
22. Hagemaijer, D.A., Register, J.A. (1990) Mock eddy current demonstration: cracks versus notches. *Materials Evaluation*, 48, 50–54.
 23. Тетерко А.Я., Назарчук З.Т. (2004) *Селективна вихрострумова дефектоскопія*. Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
 24. Rummel, W.D., Moulder, J.C., Nakagawa, N. (1991) The comparative responses of cracks and slots in eddy current measurements. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 10A, ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, pp. 277–283.
 25. Erdman, J. (1991) Correlation of eddy current response from EDM notches and tight fatigue cracks in ferromagnetic space shuttle RSRM components. *Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation*, 10A, ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, pp. 285–290.
 26. Beissner, R.E. (1994) Slots vs. cracks in eddy current NDE. *J. of Nondestructive Evaluation*, 13(4), 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00742583>
 27. Randle, W.R., Woody, B.D. (1991) Caution about simulated cracks in steel for eddy current testing. *Materials Evaluation*, 1, 44–48.
 28. Uchanin, V.M., Zhenirovs'kyi, M.I. (2008) Effect of the relief of crack surface on the signal of an eddy current converter. *Materials Science*, 44, 274–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-008-9060-8>
 29. Усов В.В., Шкатуляк Н.М. (2005) Фрактальна природа крихких зламів металу. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 1, 58–62.
 30. Баренблатт Г.И., Ботвина Л.Р. (1986) Методы подобия в механике и физике разрушения. *Физико-химическая механика материалов*, 1, 57–62.
 31. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксагоев А.А. (1994) *Синергетика и фракталы в материаловедении*. Москва, Наука.
 32. Гринченко В.Т., Мацыпура В.Т., Снарский А.А. (2005) *Введение в нелинейную динамику. Хаос и фракталы*. Київ, Наукова думка.
 33. Dunbar, W.S. (1985) The volume integral method of eddy current modeling. *J. of Nondestructive Evaluation*, 5(1), 9–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00568758>
 34. Sabbagh, H.A., Murphy, R.K., Sabbagh, E.H., Aldrin, J.C., Knopp, J.S. (2013) *Computational electromagnetics and model-based inversion – a modern paradigm for eddy-current nondestructive evaluation*. New York, Springer.
 35. ДСТУ ГОСТ ISO 5725-1:2005. *Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 1. Основні положення та визначення*. Київ, Держспоживстандарт.
 36. Беда П.И., Выборнов Б.И., Глазков Ю.А., Луцько С.П., Самойлович Г.С., Шелихов Г.С. (1976) *Неразрушающий контроль металлов и изделий*: Справочник (под ред. Г.С. Самойловича). Москва, Машиностроение.
 37. Беда П.И. (1970) Исследование сигнала накладного датчика в зависимости от изменения размеров и расположения дефектов типа трещин. *Дефектоскопия*, 1, 62–68.
 38. Беда П.И., Путников Ю.Г. (1994) Моделирование сигналов накладного преобразователя, вызванных плоским дефектом произвольной формы. *Дефектоскопия*, 2, 19–26.
 39. Auld, B.A., McFetridge, G., Riaziat, M., Jefferies S. (1985) Improved probe-flaw interaction modeling, inversion processing, and surface roughness clutter. In: *Thompson, D.O., Chimenti, D.E. (eds). Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 4A, 623–634. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9421-5_69
 40. Moulder, J.C., Gerlitz, J.C. (1986) Semi-elliptical surface flaw EC interaction and inversion: experiment. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 5A, 395–402.
 41. 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0068-2>
 42. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. (1969) *Индукционная толщинометрия*. Москва, Энергия.
 43. Походня И.К., Шлепаков В.Н., Максимов С.Ю., Рябцев И.А. (2010) Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой. *Автоматическая сварка*, 12, 34–42.
 44. Панасюк В.В., Тетерко А.Я., Походня И.К. и др. (1975) Непрерывный контроль заполнения шихтой порошковой проволоки в процессе ее изготовления. *Автоматическая сварка*, 5, 48–49.
 45. Uchanin, V.N., Ostash, O.P. (2002) Tubular samples for complex evaluation of heat exchanger tube material by fracture mechanic and nondestructive test methods. *Proc. 8th Europ. Conf. for NDT*. Barcelona (www.ndt.net).

References

1. Polishchuk, E.S., Dorozhovets, M.M., Yatsuk, V.O. et al. (2003) *Metrology and measuring equipment*. Lviv, Beskyd Bit [in Ukrainian].
2. Mykytyn, G.V. (2000) Peculiarities of metrological support of non-destructive testing. *Visnyk Ternop. DTU*, 5(3), 76–80 [in Ukrainian].
3. Petryk, V.F., Protasov, A.G. (2015) *Metrology, standardization and certification in non-destructive testing*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
4. Udpa, S.S., More P.O., et al. (2004) *Nondestructive testing handbook* (3rd Ed.). Vol. 5, *Electromagnetic Testing*, American Society for NDT.
5. EN ISO 15548-2:2013. Non-destructive testing – Equipment for eddy current examination – Pt 2: Probe characteristics and verification (ISO 15548-2:2013).
6. Shevchenko, O.I. (2022) *Metrology. Terms and explanations*. Kyiv, VAITE [in Ukrainian].
7. Solomakha, R., Uchanin, V. (2024) Magnetic hysteresis analysis for non-destructive evaluation of aircraft structural steels. *Transact. in Aerospace Research*, 276(3), 1–12. DOI: <http://doi.org/10.2478/tar-2024-0013>
8. Uchanin, V.M., Ostash, O.P., Bychkov, S.A., Semenets, O.I., Derecha, V.Yu. (2021) Eddy current monitoring of aluminum alloy degradation during long-term operation of aircraft. *The Paton Welding J.*, 8, 45–51. DOI: <http://doi.org/10.37434/trpwj2021.08.09>
9. *On metrology and metrological activities*. Law of Ukraine dated 5.06.2014, No. 1314-VII (as amended) [in Ukrainian].
10. ISO/IEC Guide 99:2007. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms* (VIM).
11. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Y.G. (1980) *Electromagnetic defectoscopy*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
12. Bilik, Y.Z., Dorofeev, A.L. (1981) Electromagnetic flaw detectors of the Proba type. *Defektoskopiya*, 6, 53–58 [in Russian].
13. Uchanin, V.M., Bychkov, S.A., Semenets, O.I., Derecha, V.Ya., Aleksandrov, S.A. (2022) Self-generator eddy current flow detectors for operational control of aircraft structures. *Tekh. Diahnost. ta Neruinivnyi Kontrol*, 3, 22–29 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/dnk2022.03.04>
14. McMaster, R.C. McIntire, P. et al. (1986) *Nondestructive Testing Handbook*. Vol. 4: *Electromagnetic Testing (Eddy current, flux leakage and Microwave Nondestructive Testing)*. Second edition. USA, American Society for NDT.
15. Uchanin, V. (2024) Detecting and estimating local corrosion damages in long-service aircraft structures by the eddy current method with double-differential probes. *Transact. on Aerospace Research*, 275(2), 20–32. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0009>
16. Kosovsky, D.Y., Shkarlet, Y.M., Khvatov, L.A. et al. *Simulator for setting defectoscopes*. USSR Auth. Certificate 739391, Inc. Cl. G 01 N 27/86. Publ. 06.05.80 [in Russian].
17. Vyakhirev, V.G., Nikulshin V.S., Oleinikov P.P. *Simulator for setting up electromagnetic flaw detectors*. USSR Auth. Certificate 926586, Int. Cl. G 01 N 27/90. Publ. 07.05.82 [in Russian].
18. Vyakhirev, V.G., Nikulshin, V.S., Oleinikov, P.P. *Tuning simulator for eddy current defectoscopes (its variants)*. USSR Auth. Certificate 1006992, Int. Cl. G 01 N 27/90. Publ. 23.03.83 [in Russian].
19. Mook, G., Uchanin, V., Lysenko, Ju. (2024) Studies of eddy current probes for inspection of aluminum alloy structure welds using smartphone-based flaw detector. *The Paton Welding J.*, 12, 42–48. DOI: <http://doi.org/10.37434/trpwj2024.12.07>
20. Datsishin, O.P., Marchenko, G.P., Panasyuk, V.V. (1994) Theory of crack growth in rolling contact. *Mater. Sci.*, 29(4), 373–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00566446>

21. Uchanin, V.M. (2025) Specific features of double-differentiation eddy current probe signals from inclined cracks. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 61(2), 139–144. DOI: <https://doi.org/10.15407/pcmm2025.02.139>
22. Hagemaijer, D.A., Register, J.A. (1990) Mock eddy current demonstration: Cracks versus notches. *Materials Evaluation*, 48, 50–54.
23. Teterko, A.Ya., Nazarchuk, Z.T. (2004) *Selective eddy current flaw detection*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
24. Rummel, W.D., Moulder, J.C., Nakagawa, N. (1991) The comparative responses of cracks and slots in eddy current measurements. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 10A, Ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 277–283.
25. Hartman, J. (1991) Correlation of eddy current response from EDM notches and tight fatigue cracks in ferromagnetic space shuttle RSRM components. *Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation*, 10A, Ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 285–290.
26. Beissner, R.E. (1994) Slots vs. cracks in eddy current NDE. *J. of Nondestructive Evaluation*, 13(4), 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00742583>
27. Randle, W.R., Woody, B.D. (1991) Caution about simulated cracks in steel for eddy current testing. *Materials Evaluation*, 1, 44–48.
28. Uchanin, V.M., Zhenirovs'kyi, M.I. (2008) Effect of the relief of crack surface on the signal of an eddy current converter. *Mater. Sci.*, 44, 274–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-008-9060-8>
29. Usov, V.V., Shkatuliak, N.M. (2005) Fractal nature of brittle metal fractures. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 1, 58–62 [in Ukrainian].
30. Barenblatt, G.I., Botvyna, L.R. (1986) Similarity methods in the mechanics and physics of destruction. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 1, 57–62 [in Russian].
31. Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.Zh., Oksagoev, A.A. (1994) *Synergetics and fractals in materials science*. Moscow, Nauka [in Russian].
32. Grynchenko V.T., Matsypura V.T., Snarsky A.A. (2005) *Introduction to nonlinear dynamics. Chaos and fractals*. Kyiv, Naukova dumka [in Russian].
33. Dunbar, W.S. (1985) The volume integral method of eddy current modeling. *J. of Nondestructive Evaluation*, 5(1), 9–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00568758>
34. Sabbagh, H.A., Murphy, R.K., Sabbagh, E.H., Aldrin, J.C., Knopp, J.S. (2013) *Computational electromagnetics and model-based inversion – A modern paradigm for eddy-current nondestructive evaluation*. New York, Springer.
35. DSTU GOST ISO 5725-1:2005: *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Pt 1. Basic provisions and definitions*. Kyiv, Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
36. Beda, P.Y., Vyborno, B.Y., Glazkov, Y.A. et al. (1976) *Non-destructive control of metals and products: Handbook*. Ed. by G.S. Samoilovich. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
37. Beda, P.I. (1970) Investigation of the signal of an overhead sensor in relation to changes in the size and location of crack-type defects. *Defektoskopiya*, 1, 62–68 [in Russian].
38. Beda, P.I., Putnikov, Y.G. (1994) Modeling of overhead transducer signals caused by a planar defect of arbitrary shape. *Defektoskopiya*, 2, 19–26 [in Russian].
39. Auld, B.A., McFetridge, G., Riazat, M., Jefferies S. (1985) Improved probe-flaw interaction modeling, inversion processing, and surface roughness clutter. In: *Eds. by D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 4A, 623–634. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9421-5_69
40. Moulder, J.C., Gerlitz, J.C. (1986) Semi-elliptical surface flaw EC interaction and inversion: Experiment. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 5A, 395–402.
41. Uchanin, V.M. (2007) Specific features of the space distribution of the signal of an eddy-current converter caused by cracks of different lengths. *Mater. Sci.*, 43, 591–595. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0068-2>
42. Dorofeev, A.L., Nikitin, A.I., Rubin, A.L. (1969) *Induction thickness measurement*. Moscow, Energiya [in Russian].
43. Pokhodnya, I.K., Shlepakov, V.N., Maksimov, S.Yu., Ryabtsev, I.A. (2010) Research and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute in the field of electric arc welding and surfacing using flux-cored wire (Review). *The Paton Welding J.*, 12, 34–42.
44. Panasyuk, V.V., Teterko, A.Ya., Pokhodnya, I.K. et al. (1975) Continuous control of the filling of a flux-cored wire charge in the process of its manufacture. *Avtomaticheskaya Svarka*, 5, 48–49 [in Russian].
45. Uchanin, V.N., Ostash, O.P. (2002) Tubular samples for complex evaluation of heat exchanger tube material by fracture mechanic and nondestructive test methods. In: *Proc. of 8th Europ. Conf. for NDT*. Barcelona (www.ndt.net).

METHODOLOGY OF USING STANDARD SPECIMENS WITH DEFECTS FOR EDDY CURRENT INSPECTION: CLASSIFICATION, TYPICAL EXAMPLES, SIGNALS RESEARCH AND STATISTICAL METHOD FOR PARAMETERS ASSESSMENT

V.N. Uchanin

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: vuchanin@gmail.com

The work was aimed at development of a methodology for using reference standards (RS) with defects to ensure high reliability and repeatability of eddy current flaw detection results. In particular, a classification of reference standards with defects is proposed and relevant examples are given to confirm the validity of the proposed classification. As an example, designs of composite multi-valued reference standards are presented for simulating surface and subsurface defects in cylindrical and flat objects under eddy current testing. In particular, new designs of composite reference standards are presented that simulate defects with different depths of occurrence. A corresponding set of RSs is presented that simulate a subsurface crack of the same size with 4 values of its depth of occurrence, and the corresponding double-differentiation eddy current probe signals are experimentally investigated. A proposed method for manufacturing reference standards for simulating inclined cracks is presented. A number of studies are analyzed that consider possible reasons for the difference between eddy current probe signals from a natural crack and artificial defects. By means of calculations using the method of volume integral equations, it is shown that the main reason for the difference between eddy current probe signals from natural fatigue defects and artificial defects is their width (opening). The influence of the crack length on the features of the parametric type eddy current probe signal is considered, which must be taken into account when choosing the length of the cracks of the reference standards to ensure the sensitivity threshold and reproducibility of the inspection results. A statistically based method for reliable estimation of the parameters of the reference standards with natural defects is presented, which has been successfully used to evaluate reference standards with fatigue cracks in tubular specimens. 45 Ref., 10 Fig.

Keywords: reference standard, classification, eddy current method, non-destructive testing, eddy current probe, artificial defect, defect parameters

Отримано 03.06.25

Отримано у перекладеному вигляді 24.07.25

Прийнято 27.08.25