

# ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПАРАМЕТРИЧНОГО ТИПУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ТРІЩИН

В.М. Учанін

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

У роботі узагальнено результати досліджень щодо оптимізації конструкції параметричних ВСП, які призначені для виявлення поверхневих дефектів. Показано, що вибір діаметра ВСП суттєво залежить від найменшої довжини тріщин, які необхідно виявляти. Зокрема визначено, що для виявлення тріщини завдовжки більше 2 мм оптимальним є використання ВСП з обмотками, встановленими на ФО діаметром 1,2 мм. Для виявлення коротких тріщин завдовжки більше 1 мм необхідно використовувати ВСП з обмотками на ФО діаметром 0,75 мм. Проаналізовано вплив параметрів ФО (довжини, магнітної проникності та відступу обмотки від кінця ФО) на ефективність параметричних ВСП, що необхідно використати для їх оптимізації. Проаналізовано умови розділення впливу дефекту та зазору шляхом інтерпретації сигналів в комплексній площині та показано можливість їх розділення для розроблених ВСП для всіх немагнітних конструкційних сплавів. Представлено конструкцію параметричного ВСП, яка дозволяє збільшити їх добротність більше ніж у 2 рази та розглянуто питання оптимального вибору з'єднувального кабелю для підключення ВСП до ВД. Проведено випробування оптимізованого параметричного ВСП, які підтвердили його високу чутливість до коротких тріщин завдовжки більше 2 мм з надійним розділенням впливу дефекту і зазору. Бібліогр. 21, табл. 2, рис. 12.

*Ключові слова:* вихрострумний неруйнівний контроль, поверхнева тріщина, вихрострумний перетворювач, феритове осердя

**Вступ і стан проблеми.** Останні десятиріччя вихрострумний метод зайняв чільне місце серед найпоширеніших методів неруйнівного контролю, які забезпечують виявлення поверхневих дефектів (наприклад, втомних тріщин) у металевих конструкціях без контакту з контрольованою поверхнею або навіть через діелектричне покриття [1–9]. Зазначимо в якості безальтернативного прикладу, що тільки мініатюрні вихрострумні перетворювачі (ВСП) можуть надійно виявити тріщини у важкодоступних місцях авіаційних конструкцій, зокрема, розташованих на бічній стінці заклепкових отворів, де тріщини зазвичай утворюються через концентрацію механічних напружень [1, 7]. У той же час методам вихрострумової дефектоскопії притаманна чутливість до низки факторів (окрім дефектів), які суттєво впливають на вихідний сигнал ВСП. Ці фактори включають зміни електропровідності та магнітної проникності досліджуваного матеріалу, варіації геометричних параметрів чи зазору між ВСП і поверхнею об'єкта контролю (ОК). Досвідчені оператори шукають можливості усунути або зменшити ці завади для досягнення достовірних результатів контролю. Зміни зазору або нахилу ВСП є особливо небезпечними для ручного вихрострумного контролю, коли під час сканування змінюється положення ВСП відносно ОК. Зміни зазору, викликані різною шорсткістю поверхні ОК або зміною товщини ді-

електричного покриття, також можуть призвести до помилкових рішень про наявність дефектів. Тому для надійного виявлення дефектів важливо зменшити вплив зміни зазору. Зазвичай в конструкціях важко виявити короткі (навіть глибокі) дефекти, такі, як корозійні язви та неглибокі (навіть довгі) тріщини. Тому розвиток технологій контролю спрямовано на покращення можливостей виявлення коротких і неглибоких дефектів з високою достовірністю на основі зменшення впливу завад різної фізичної природи. Достовірність контролю оцінюють імовірністю виявлення дефектів як кількісного показника, заснованого на статистиці. Навіть для одного й того ж обладнання на ймовірність виявлення дефектів впливають кілька факторів, таких, як властивості матеріалу ОК, тип і розміри дефекту, умови контролю тощо.

Важливими складовими методики виявлення поверхневих тріщин є вибір типу та геометричних параметрів ВСП для надійного виявлення тріщин, розміри яких характеризують поріг чутливості, та проста інтерпретація сигналу, що дозволяє відокремити корисні сигнали, створені тріщинами, від сигналів, пов'язаних з такими факторами, як зазор або вплив краю [1, 5, 7, 9]. Для більшості методик вихрострумного контролю вважається достатнім надійно виявляти тріщини завдовжки більше 2 мм і завглибшки більше 0,2 мм, що визначає поріг чутливості вихрострумних дефектоскопів (ВД). Такий дефект необхідно надійно виявляти через діелектричне покриття товщиною до 0,5 мм. У

цьому випадку захищені антикорозійним покриттям елементи конструкції будуть контролюватись без коштовної процедури його видалення. Але для контролю деталей авіаційних двигунів перспективним завданням є можливість виявляти тріщини удвічі меншої довжини (близько 1 мм), для чого в принципі також можна використати вихрострумний метод за умови правильного вибору параметрів ВСП.

У роботах [1–8] розглянуто та проаналізовано різні типи ВСП, які можна застосувати для виявлення поверхневих тріщин. Для виявлення коротких поверхневих тріщин у режимі ручного сканування найзручнішим є використання найпростішого ВСП з однією одношаровою обмоткою, розташованою на циліндричному феритовому осерді (ФО) [1, 8, 10–13]. Важливою перевагою такого ВСП є незалежність його чутливості від напрямку тріщини, що дозволяє вибирати довільні траєкторії сканування без необхідності витримувати орієнтацію ВСП відносно напрямку ймовірної тріщини. Не менш важливими особливостями параметричних ВСП, що впливають на такий вибір, є простота конструкції, малий розмір, нескладність виконання вимог щодо повторюваності параметрів під час виробництва та низька ціна [1, 7, 8, 10, 11]. Такі ВСП традиційно використовують в автогенераторних ВД [8]. Крім того, ВСП з однією обмоткою використовують в ВД, що працюють в резонансному режимі, серед яких найпоширенішими є відомі ВД сімейства DEFECTOMETR (наприклад, DEFECTOMETR 2.837), розроблені в Німеччині інститутом доктора Ферстера (Institute Dr. Foerster GmbH&Co). У деяких ВД універсального типу, наприклад, ВД типу EDDYCON C виробництва НВФ «Промприлад» (Україна) або ВД типу ELOTES M2 фірми Rohmann GmbH (Німеччина) резонансний режим використовується як додатковий.

Відомий традиційний підхід щодо визначення ефективності ВСП, при якому сканують поверхню стандартного зразка (СЗ) з дефектом і спостерігають обумовлений дефектом вихідний сигнал ВСП. Ефективність ВСП визначають за параметрами сигналу від дефекту, зокрема його амплітудою. Таку процедуру зазвичай використовують під час вибору оптимального ВСП і робочої частоти для рішення конкретної задачі дефектоскопії [1, 8, 14]. Подібна практика закладена також в європейській стандарт з визначення характеристик ВСП [15]. За такого підходу результати з оцінювання ефективності, виконані різними дослідниками, складно порівнювати, так як необхідно витримати умови експерименту. Зокрема для виготовлення СЗ необхідно використати матеріал з ідентичними електрофізичними характеристика-

ми та виконати дефект з ідентичними розмірами. Прогресивнішим є спосіб визначення ефективності ВСП, представлений американським бюро стандартів у роботах [16, 17], коли вимірюють імпеданс ВСП при розміщенні його на віддалі від СЗ (у «повітрі») та при встановленні на поверхню алюмінієвого СЗ. Ефективність ВСП оцінюють за різницею отриманих імпедансів. Недоліком цього способу є його залежність від вибраної робочої частоти, резонансної частоти та кількості витків обмоток ВСП, що обмежує його використання для визначення конструктивної ефективності ВСП незалежно від кількості витків і робочої частоти контролю.

Для кількісного оцінювання впливу різних конструкційних чинників на ефективність ВСП запропоновано використати безрозмірний коефіцієнт вихрострумної ефективності  $\xi$  (Учанін В.М. Спосіб визначення ефективності вихрострумних перетворювачів. Україна пат. 105072, 2014, Бюл. № 4). Було також визначено умови, необхідні для його дослідження, та показано інваріантні властивості коефіцієнта вихрострумної ефективності  $\xi$  для обмоток без ФО щодо діаметра обмотки та кількості витків [18]. Опрацьовано методику розрахунків ефективності  $\xi$  ВСП для різних ВСП (у тому числі з ФО) методом об'ємних інтегральних рівнянь [12, 13, 19] за допомогою програми VIC-3D [20].

У цій роботі узагальнено результати низки досліджень і розробок, пов'язаних з оптимальним вибором конструкційних і електричних параметрів найпростіших ВСП параметричного типу, які найчастіше використовують для виявлення поверхневих дефектів.

**1. Забезпечення порогу чутливості по довжині тріщини шляхом вибору діаметра обмотки параметричного ВСП.** Вибір діаметра обмотки ВСП визначається довжиною найкоротшої тріщини, яку необхідно виявляти. Неоптимальний вибір розмірів ВСП може призвести до пропусків критичних дефектів або невиннованого збільшення витрат часу на проведення контролю. Крім того, аналіз особливостей сигналу ВСП для тріщини різної довжини необхідний для інтерпретації результатів контролю. Для вибору діаметра обмотки ВСП використаємо результати роботи, в якій методом об'ємних інтегралів досліджено просторовий розподіл сигналу, створеного тріщинами різної довжини [9]. Під час моделювання тріщина розміщувалась в центрі системи координат: координата  $X$  відповідала поперечному відносно тріщини напрямку, координата  $Y$  – напрямку вздовж тріщини. Параметри обмотки ВСП наступні: середній діаметр обмотки  $D_c$ , товщина обмотки (різниця між зовнішнім і внутрішнім радіусами)  $\Delta r$  і

висота обмотки  $l_o$ . Сигнал від тріщини розраховували у вигляді внесеної дефектом модуля  $Z_{тр}$  імпедансу ВСП, який нормували до модуля імпедансу ВСП  $Z_{ок}$  під час встановлення на бездефектній частині ОК:  $Z'_{тр} = \Delta Z / Z_{ок}$ . Довжину тріщини та координати ВСП нормували до середнього діаметра обмотки ВСП: приведена довжина тріщини  $l'_{тр} = l_{тр} / D_c$ , приведена координата ВСП вздовж тріщини  $y' / D_c$ .

Під час розробки процедур вихрострумового контролю часто враховують інформацію про напрямок можливого поширення тріщин, які в реальних конструкціях визначаються діючими механічними напруженнями. Це дозволяє проводити сканування в поперечному відносно тріщини напрямку, що відповідає розподілу амплітуди сигналу ВСП по координаті X (рис. 1), який отримано для сканування через середину ( $y' = 0$ ) чотирьох

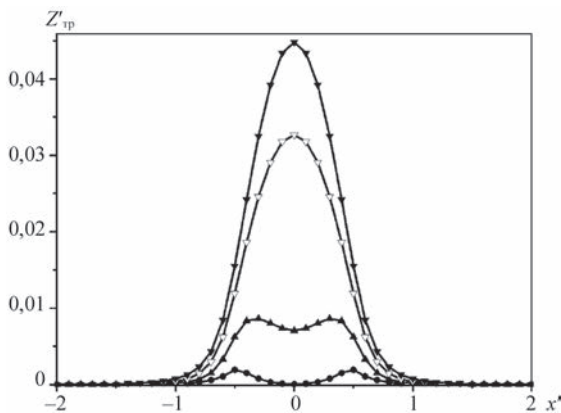


Рис. 1. Зміни сигналу ВСП під час сканування впоперек тріщин з приведеними довжинами: (●) –  $l'_{тр} = 0,3$ ; (▲) –  $l'_{тр} = 1,0$ ; (▼) –  $l'_{тр} = 2,0$ ; (◻) –  $l'_{тр} = 5,0$

тріщин різної приведеної довжини ( $l'_{тр} = 0,3; 1,0; 2,0$  і  $5,0$ ). Видно, що залежність сигналу ВСП для коротких тріщин  $l'_{тр} < 0,3$  має два максимуми, а при розташуванні ВСП над центром такої тріщини сигнал може досягати нуля при розташуванні ВСП над центром тріщини ( $x' = 0$ ). Але зі збільшенням довжини тріщин максимальне значення амплітуди сигналу від тріщини спостерігається саме під час розташування ВСП безпосередньо над дефектом ( $x' = 0$ ). За такого сканування максимум є достатньо «гострим», коли сигнал ВСП від дефекту на незначній відстані, що близька до одного діаметру обмотки ВСП, швидко зростає до максимуму, а після проходження максимуму так само швидко зменшується. Така особливість дозволяє оператору-дефектоскопісту впевнено відрізнити сигнал від дефекту від можливих завад, вплив яких призводить до повільніших змін сигналу під час сканування. Власне ця особливість і надає такому скануванню певні переваги.

Розподіли сигналу ВСП під час сканування вздовж тріщини по осі Y за умови збереження центрального положення ВСП відносно середньої площини тріщини наведено на рис. 2. Зазначимо, що максимуми сигналу ВСП при проведенні впорядкованого поперечного сканування в різних перерізах тріщини (при різних координатах  $y$ ) також утворюють профіль, подібний за розподіли на рис. 2. Отримані залежності дозволяють дослідити, за якого розташування ВСП відносно тріщини ми маємо максимальні значення сигналів та можливі «провали» чутливості («мертві» зони).

Аналіз отриманих розподілів (рис. 2) показує їх суттєву залежність від співвідношення довжи-

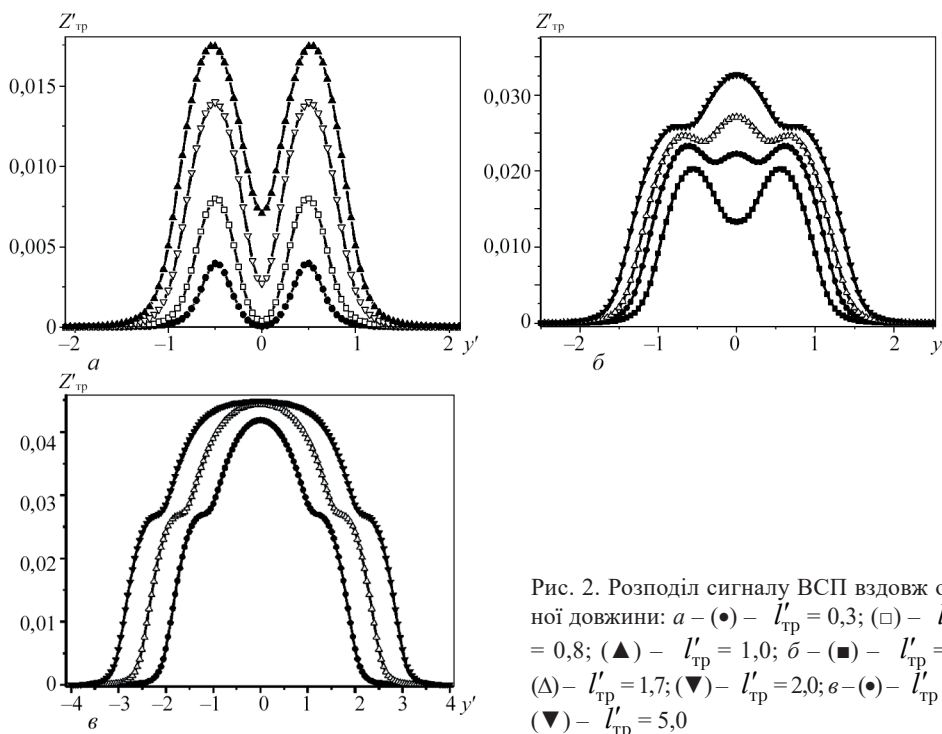


Рис. 2. Розподіл сигналу ВСП вздовж осі Y для тріщин різної довжини: а – (●) –  $l'_{тр} = 0,3$ ; (◻) –  $l'_{тр} = 0,5$ ; (▼) –  $l'_{тр} = 0,8$ ; (▲) –  $l'_{тр} = 1,0$ ; б – (■) –  $l'_{тр} = 1,2$ ; (●) –  $l'_{тр} = 1,5$ ; (Δ) –  $l'_{тр} = 1,7$ ; (▼) –  $l'_{тр} = 2,0$ ; в – (●) –  $l'_{тр} = 3,0$ ; (Δ) –  $l'_{тр} = 4,0$ ; (▼) –  $l'_{тр} = 5,0$

ни тріщини до діаметру ВСП, тобто приведеної довжини тріщини  $l'_{тр}$ . При цьому змінюються не тільки амплітудні характеристики сигналу ВСП, а і загальний вигляд розподілів сигналу. Це спонукає розподіли сигналу для тріщин різної довжини аналізувати окремо.

Для початку розглянемо найцікавіший випадок коротких тріщин, під якими умовно будемо розуміти тріщини з приведеною довжиною  $l'_{тр} < 1,2$ . Для коротких тріщини розподіл сигналу ВСП має двогорбий симетричний характер сигналу з мінімумом при розміщенні ВСП безпосередньо над тріщиною (при  $y = 0$ ). Для дуже короткої тріщини (відносно розмірів ВСП) при  $l'_{тр} < 0,3$  амплітуда під час розміщення тріщини по центру обмотки ВСП може досягати нуля. Це легко пояснити особливостями розподілу густини вихрових струмів ВСП, яка є максимальною безпосередньо під витками обмотки та загасає до нуля при наближенні до центру ВСП (так звана «мертва» зона). Тобто нульовий сигнал ВСП маємо у випадку, коли коротка тріщина розташована в центральній «мертвій» зоні ВСП і практично не впливає на перерозподіл вихрових струмів. В той же час максимального значення сигнал ВСП досягає, коли середина тріщини розташовується безпосередньо під витками ВСП і максимально впливає на вихрові струми. Звідси стає зрозумілим, чому для коротких тріщин з  $l'_{тр} < 1,0$  відстань між максимумами приблизно дорівнює діаметру обмотки  $D_c$ , а в приведених координатах на рис. 2 дорівнює 1,0. Зі збільшенням довжини тріщини відстань між максимумами несуттєво збільшується (див. розподіл для  $l'_{тр} = 1,2$  і  $1,5$  на рис. 2, б), а значення амплітуди сигналу в точці мінімуму зростають. При  $l'_{тр} = 1,5$  розподіл сигналу ВСП має вже три максимума, так як центральний мінімум поступово починає перероджуватись в максимум. З подальшим збільшенням довжини тріщини цей максимум зростає (див., наприклад, зміни сигналу для  $l'_{тр} = 1,7$  на рис. 2, б).

При подальшому зростанні довжини тріщини розподіл сигналу ВСП має тільки один максимум при знаходженні ВСП безпосередньо по центру тріщини з двома симетричними майже горизонтальними ділянками по обидва боки. Важливо, що збільшення довжини тріщини починаючи від  $l'_{тр} = 4,0$  вже не впливає на амплітуду сигналу в центральній частині розподілу. Зі зростанням приведеної довжини тріщини  $l'_{тр}$  центральний максимум розширюється і утворюється горизонтальна ділянка (рис. 2, в). Встановлені особливості розподілу сигналу від тріщин різної довжини дозволили запропонувати новий спосіб визначення їх довжини, інваріантний відносно заданої чутливості контролю (див. Учанін В.М. Вихрострумовий

спосіб визначення довжини тріщин. України пат. 86505, 2009, Бюл. № 3).

«Провали» розподілів сигналів на рис. 1 і рис. 2, а дозволяють зробити висновок про можливість пропуску коротких тріщин за умови неправильного вибору діаметра ВСП і сканування через центр тріщини. Тут також можливе хибне трактування результатів, так як два максимума для короткої тріщини можна прийняти за сигнали від двох окремих дефектів. Розглянемо фізичне пояснення процесу формування характерного розподілу сигналу ВСП на прикладі тріщини з приведеною довжиною  $l'_{тр} > 1,5$  (рис. 2, б). При переміщенні ВСП в зону тріщини починається поступове збільшення амплітуди сигналу. При подальшому переміщенні ВСП вздовж тріщини по осі  $Y$  початок тріщини входить в «мертву» зону, збільшення амплітуди сигналу ВСП уповільнюється і утворюється горизонтальна ділянка. Далі тріщина перетинає контур вихрових струмів з другої сторони ВСП і починається подальше зростання сигналу, який досягає максимуму безпосередньо над дефектом. При подальшому переміщенні ВСП в «мертву» зону попадає вже кінець тріщини і утворюється друга горизонтальна ділянка.

Представлені результати було використано для обґрунтування розмірів ВСП для контролю вузлів літаків, де було поставлено завдання виявляти тріщини завдовжки більше 2 мм [8]. Для цього оптимальним є ВСП з обмотками, встановленими на ФО діаметром 1,2 мм, що відповідає відносно рівномірному розподілу сигналу для  $l'_{тр} > 1,7$  на рис. 2, б. Параметричний ВСП з ФО такого діаметру будемо детальніше аналізувати в наступному розділі на предмет оптимізації вибору параметрів ФО. Для виявлення коротких тріщин в деталях авіаційних двигунів завдовжки більше 1 мм розроблено ВСП з обмоткою, розташованою на ФО діаметром 0,75 мм.

**2. Оптимізація параметрів феритового осердя параметричного ВСП.** Взаємодія витків ВСП з матеріалом об'єкта контролю (ОК) суттєво зменшується залежно від їх відстані від поверхні ОК. Тому геометрія ВСП має суттєвий вплив на його чутливість [1, 16, 17]. Використання ФО має на меті збільшити електромагнітну взаємодію верхніх витків ВСП з матеріалом ОК. Тому оптимальний вибір конструкції ВСП з ФО є важливим етапом його створення. Серед конструкційних параметрів ВСП з ФО найсуттєвішими є діаметр  $D_\phi$  і довжина  $l_\phi$  ФО, довжина  $l_o$  обмотки (яка для одношарової обмотки визначається кількістю витків  $w$  і діаметром проводу  $d$ ) та відступ (зміщення)  $l_b$  обмотки відносно кінця ФО (рис. 3).

Очевидно, що діаметр ФО  $D_\phi$  у більшості випадків визначає діаметр обмотки ВСП, вибір яко-

го подано у попередньому розділі. Усі інші зазначені параметри ВСП з ФО (рис. 3) по різному впливають на роботу параметричного ВСП. Для кількісного оцінювання їх впливу скористаємось представленим вище коефіцієнтом вихрострумової ефективності  $\xi$  (далі – ефективність  $\xi$ ). Для параметричних ВСП з однією обмоткою проаналізуємо вплив ФО на ефективність  $\xi$  залежно від кількості витків  $w$ , яку під час розрахунків змінювали від 1 до 100. Для порівняння визначена також ефективність  $\xi$  аналогічних обмоток ВСП без ФО. Досліджували залежність коефіцієнта  $\xi$  від кількості витків при встановленні обмотки безпосередньо на кінці ФО довжиною 10,0 мм з початковою магнітною проникністю (МП) матеріалу  $\mu = 100, 600, 1200, 2000$  без зміщення ( $l_0 = 0$ ). Розрахунки проводили для робочої частоти 10,0 МГц під час встановлення на мідний зразок, що відповідає умовам дослідження ефективності  $\xi$  [18]. Залежності ефективності  $\xi$  від кількості витків  $w$  для котушок без осердя та з ФО з різною початковою МП  $\mu$  подано на рис. 4, а.

Отримані залежності (рис. 4, а) показують, що ефективність  $\xi$  для ВСП з одношаровою обмоткою, встановленою на ФО, суттєво збільшується порівняно з ВСП без осердя залежно від довжини обмотки (від кількості витків  $w$ ) навіть за мі-

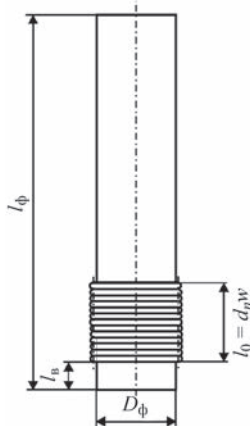


Рис. 3. Конструкція найпростішого ВСП з однією одношаровою обмоткою на ФО

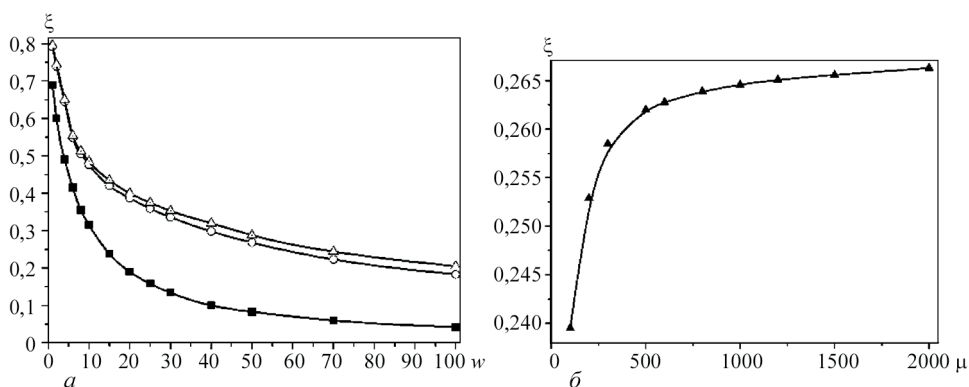


Рис. 4. Залежності ефективності  $\xi$  одношарового параметричного ВСП від кількості витків  $w$  за відсутності ФО (■) і з ФО з МП матеріалу  $\mu = 100$  (○) і  $\mu \geq 600$  (Δ) (а) і від початкової МП  $\mu$  матеріалу ФО (б)

німального значення МП  $\mu$  матеріалу ФО. У той же час цей ефект залежить від довжини обмотки, так як з її збільшенням ефективність  $\xi$  поступово зменшується. Отримані залежності ефективності  $\xi$  для МП  $\mu = 100$  і  $600$  є досить близькими. Залежності ефективності  $\xi$  від кількості витків  $w$  (або довжини обмотки) для  $\mu = 600, 1200$  і  $2000$  практично ідентичні. Це підтверджується залежністю ефективності  $\xi$  від початкової МП  $\mu$  матеріалу ФО (рис. 4, б). Цю залежність розраховано для одношарової котушки, що складається з 25 витків, намотаних дротом діаметром 0,06 мм, розміщеним зі зміщенням 0,5 мм на ФО, що має діаметр 1,2 мм і довжину 7,0 мм. Подані на рис. 4, б результати показують, що зі збільшенням початкової МП  $\mu$  від 100 до 2000 ефективність  $\xi$  збільшується з 0,24 до 0,27. Проте найбільше зростання ефективності  $\xi$  спостерігається на початковій ділянці залежності, коли МП ще не досягає значення  $\mu = 500$ . При подальшому збільшенні МП  $\mu$  зростання ефективності  $\xi$  є несуттєвим.

Наступні залежності (рис. 5) дозволяють оцінити вплив на ефективність  $\xi$  ВСП довжини ФО та розташування на ньому обмотки. Для цього було пораховано ефективність  $\xi$  ВСП, одношарова обмотка якого складається з 25 витків, намотаних на ФО діаметром 1,2 мм. Як зазначено вище, ВСП такого діаметра є оптимальним для виявлення тріщин завдовжки 2 мм. Розрахунки проводилися для МП матеріалу осердя  $\mu = 500$ . Коефіцієнти ефективності  $\xi$  для параметричних ВСП з різною довжиною ФО були розраховані для обмотки, яка розміщена на кінці ФО без зміщення ( $l_0 = 0$ ), і для обмотки, встановленої зі зміщенням  $l_0 = 0,5$  мм (рис. 3). Ефективність  $\xi$  ВСП з аналогічною обмоткою без ФО також була розрахована і становила близько 0,025 (точка □ на рис. 5).

Наведені результати свідчать, що використання ФО суттєво збільшує ефективність параметричного ВСП. Для обмоток, розміщених на кінці ФО, коефіцієнти  $\xi$  збільшуються в 7 разів навіть для коротких ФО завдовжки 0,5 мм. Ефективність  $\xi$  ВСП зростає зі збільшенням довжини ФО. При

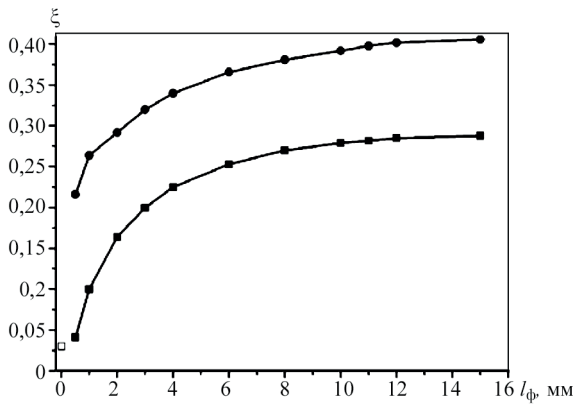


Рис. 5. Залежність ефективності від довжини ФО за розміщення обмотки на кінці ФО (●), з відступом 0,5 мм (■) і за відсутності ФО (□)

досягненні певної довжини ФО (близько 5 мм для даної обмотки) зростання ефективності  $\xi$  сповільнюється, а при досягненні довжини ФО  $l_f = 10,0$  мм наближається до максимального значення. Ці результати показують, що довжину  $l_f$  ФО доцільно вибирати в діапазоні від 6,0 до 10,0 мм. При цьому ефективність обмоток ВСП, встановлених з відступом 0,5 мм, знижується не так сильно, як для коротких ФО довжиною менше  $l_f = 2,0$  мм. Для ФО завдовжки  $l_f = 10$  мм зміщення обмотки відносно кінця ФО на відстань  $l_b = 0,5$  мм зменшує ефективність  $\xi$  в 1,45 рази. Такі втрати можна вважати припустимими. Зазначимо, що таке зміщення обмотки відносно робочого кінця ФО запобігає можливому руйнуванню ВСП через зношення під час сканування поверхні ОК. Тому певний компроміс під час вибору зміщення обмотки є виправданим. Крім того, ці результати дозволяють оцінити можливі зміни характеристик ВСП, коли частина ФО зношується в процесі експлуатації. Необхідно пам'ятати, що при використанні ФО суттєво збільшується і абсолютне значення індуктивності ВСП.

**3. Оптимізація електричних і конструкційних характеристик параметричних ВСП.** Подані в розділах 1 і 2 дослідження використано для проектування базового параметричного ВСП для авіаційної галузі України згідно з технічними вимогами основних замовників (ДП «Антонов», ДП

Таблиця 1. Характеристики базового ВСП

Характеристика	Значення
Діаметр ФО $D_\phi$ , мм	1,2
Висота ФО $l_\phi$ , мм	7,0
Кількість витків $w$	25
Діаметр проводу $d_n$ , мм	0,06
МП матеріалу ФО $\mu_\phi$	500
Відстань $l_b$ , мм	0,5
Кількість шарів	1
Опір обмотки, Ом	1,2

«Івченко-Прогрес», ПАТ «Мотор-Січ» тощо). Під час розробки було проаналізовано та враховано існуючу номенклатуру ФО. Основні характеристики базового ВСП зведено в табл. 1.

Вибір робочої точки для розділення впливу дефекту та зазору. Наведені в табл. 1 параметри ВСП визначають повний електричний опір індуктивної обмотки  $Z_{об}$  за умови розміщення її віддалено від електропровідних об'єктів (у «повітрі»). Розглянемо зміни електричних характеристик обмотки базового параметричного ВСП при встановленні його на немагнітні конструкційні матеріали з різною питомою електропровідністю (ПЕП). Індуктивність  $L$  і внесений опір  $R_{вн}$  базового ВСП (без кабелю) розраховували методом об'ємних інтегральних рівнянь [11, 12, 19] на робочій частоті 2,0 МГц при встановленні його на СЗ з немагнітного металу, ПЕП  $\sigma$  якого змінювали від 0,05 до 58,0 МСм/м. Крім того, індуктивності базового ВСП без кабелю під час його встановлення на СЗ із різними ПЕП вимірювали за допомогою вимірювача добротності ВМ 560. Отримані результати (рис. 6, а) показують непогану збіжність результатів розрахунків з експериментом (в межах 5...8 %). При цьому індуктивність базового ВСП на робочій частоті 2 МГц суттєво зменшується в діапазоні змін ПЕП до 0,5 МСм/м. За подальшого збільшення ПЕП в діапазоні до 5,0 МСм/м швидкість зростання індуктивності зі збільшенням ПЕП уповільнюється. При подальшому збільшенні ПЕП до значення ПЕП міді (58,0 МСм/м) індуктивність  $L$  обмотки ВСП практично не змінюється. Це дозволяє обґрунтувати можливість використання для ВД тільки двох режимів: перший – для контролю низькопровідних немагнітних сплавів (титанові сплави, аустенітна сталь) з ПЕП від 0,44 до 2,4 МСм/м; другий – для контролю у ширшому діапазоні від магнієвих сплавів (найменше значення ПЕП – 5,8 МСм/м) до міді (58,0 МСм/м). Такий широкий діапазон ПЕП контрольованих сплавів у другому режимі може бути забезпечений завдяки незначним змінам індуктивності базового ВСП в діапазоні змін ПЕП у цих сплавах (рис. 6, а). Це суттєво спрощує схему побудови автогенераторних ВД.

Внесений опір  $R_{вн}$  обмотки ВСП зі збільшенням ПЕП спочатку зростає до максимуму при  $\sigma \approx 0,2$  МСм/м, а потім починає зменшуватися, що відповідає загальним закономірностям теорії вихрострумовевого методу щодо змін складових імпедансу зі збільшенням ПЕП [1–6].

Розділити вплив дефекту та зазору між ВСП і поверхнею ОК можна шляхом реалізації «закритичного» режиму (точка Б на рис. 7), який має місце за великих значень узагальненого параметру, де:  $R$  – еквівалентний радіус обмотки ВСП;  $\omega = 2\pi f$ , де

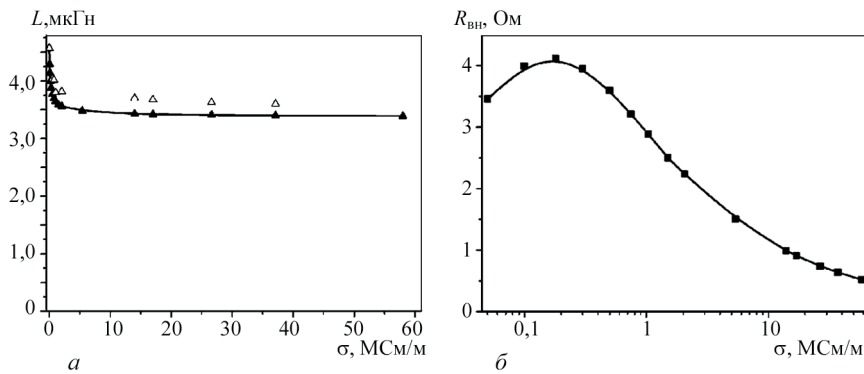


Рис. 6. Залежність індуктивності (а) і внесеного опору (б) базового ВСП від ПЕП  $\sigma$  матеріалу ОК:  $\blacktriangle$  і  $\blacksquare$  – розрахунок;  $\triangle$  – експеримент

$f$  – робоча частота;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала;  $\mu$  і  $\sigma$  – відносна МП та ПЕП матеріалу ОК.

На рис. 7 показано, що в «закритичному» режимі зміни внесеного опору, обумовлені дефектом (Д) і зазором (З), мають різний знак на відміну від «докритичного» режиму (точка А). Точка максимуму на рис. 6, б відповідає початку виконання умови «закритичного» положення робочої точки годографа внесеного імпедансу, необхідні для розділення впливу дефекту і зазору. Це означає, що для базового ВСП на робочих частот понад 2,0 МГц можливість розділення впливу дефекту та зазору реалізована навіть для низькопровідних титанових сплавів, ПЕП яких лежить в діапазоні від 0,44 до 2,4 МСм/м.

*Зменшення впливу паразитних складових імпедансу.* Еквівалентну схему параметричного ВСП включно з вузлами під'єднання їх до ВД можна подати у вигляді трьох послідовно з'єднаних елементів, імпеданс яких позначимо:  $Z_{об}$  – імпеданс безпосередньо обмотки ВСП;  $Z_{в}$  – імпеданс виводів обмотки та  $Z_{к}$  – імпеданс кабелю для з'єднання ВСП з ВД. Імпеданс  $Z_{об}$  безпосередньо обмотки ВСП аналізували в попередньому розділі. Імпеданс інших елементів, зокрема, імпеданс виводів

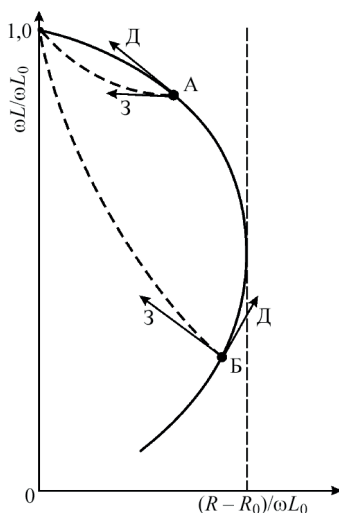


Рис. 7. Вплив дефекту (Д) і зміни зазору (З) на годографі імпедансу ВСП для робочої точки в «докритичному» (точка А) і «закритичному» (точка Б) режимах [1]

$Z_{в}$  і імпеданс з'єднувального кабелю  $Z_{к}$  є паразитними, так як вони не беруть участь у формуванні корисного сигналу від дефекту, а їх зміни можуть призводити до зменшення добротності ВСП в цілому та створення додаткових заводів. У автогенераторних або резонансних ВД ці елементи входять до складу коливального контуру, через що можуть суттєво впливати на їх роботу та обмежувати взаємозамінність ВСП (рис. 8).

Розглянемо детальніше паразитні компоненти імпедансу ВСП, а саме: імпеданс виводів  $Z_{в}$  і імпеданс з'єднувального кабелю  $Z_{к}$ . Паразитний імпеданс  $Z_{в}$  виводів може бути неприпустимо великий, так як у параметричних ВСП з невеликою кількістю витків (у базовому ВСП – 25) довжина виводів співмірна з сумарною довжиною витків обмотки. Це призводить до зменшення інформативної частки складових внесеного дефектом імпедансу (активного та індуктивного опорів) параметричного ВСП. При цьому також зменшується добротність ВСП, яка суттєво впливає на їх чутливість в автогенераторному або резонансному режимах роботи. З метою зменшення впливу паразитного імпедансу  $Z_{в}$  виводів запропоновано конструкцію параметричного ВСП, в якій введено діелектричний вкладиш з двома електропровідними шинами, перетини яких на порядок перевищують перетини дроту обмотки (див. Учанин В.М., Рибачук В.Г., Кириченко І.І. Накладний параметричний вихрострумний перетворювач. України пат. 137775, 2019, Бюл. № 21). Конструкцію параметричного ВСП для проведення ручного контролю наведено на рис. 9, а, де: 1 – корпус ВСП; 2 – обмотка; 3 – з'єднувач; 4 – діелектричний вкладиш; 5 – елек-

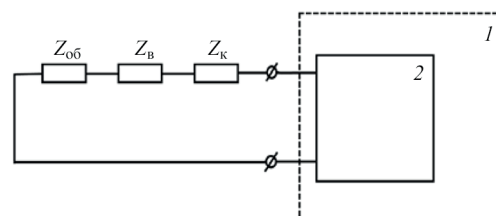


Рис. 8. Еквівалентна електрична схема параметричного ВСП: 1 – ВД; 2 – коливальний контур

тропровідні шини; 6 – виводи; 7 – з’єднувальні дроти; 8 – контакти з’єднувача. Виводи індуктивної обмотки з’єднані з кінцями електропровідних шин зі сторони торця вкладишу, який межує з обмоткою, а виводи з’єднувача кабелю або безпосередньо самого кабелю з’єднані з кінцями електропровідних шин зі сторони протилежного торця діелектричного вкладишу. Електропровідні шини краще розташувати з одного боку пластини діелектричного вкладишу, так як у цьому випадку їх паразитна ємність є суттєво меншою.

Крім того, ці конструктивні особливості використано для створення мініатюрних ВСП для виявлення дефектів на внутрішніх поверхнях важкодоступних порожнин за допомогою маніпуляторів. Конструкція мініатюрного ВСП (рис. 9, б) складається з трубчастого полістиролового корпусу 1 діаметром і висотою 4 і 8 мм відповідно, в якому розміщено ФО 2 з обмоткою 3 і діелектричний вкладиш 4 з електропровідними шинами. Усі елементи ВСП зафіксовано в корпусі 1 за допомогою епоксидної смоли 5. Виступаючі за межі корпусу частини електропровідних шин діелектричного вкладиша є контактами для підключення ВСП до кабелю ВД. Випробування показали, що добротність такого ВСП становить  $Q = 0,53$  на відміну від ВСП традиційної конструкції, для якого  $Q = 0,253$ . Таким чином, запропоноване технічне рішення дозволяє збільшити добротність параметричних ВСП більше ніж у 2 рази.

Оптимальний вибір з’єднувального кабелю для підключення параметричних ВСП. Як зазначено вище, характеристики кабелю для під’єднання параметричного ВСП також суттєво впливають на роботу ВД. Особливо це стосується автогенераторних і резонансних ВД, в яких імпеданс кабелю змінює характеристики резонансного контуру. Значення  $Z_k$

кабелю залежить від його марки та довжини кабелю. Для вибору марки кабелю аналізують його механічні властивості, зокрема гнучкість і витривалість при багатократних перегинаннях під час виконання контрольних операцій. Довжина кабелю повинна знаходитись у межах 1...1,5 м для зручного сканування оператором поверхні ОК в реальних виробничих умовах. Через це імпеданс кабелю  $Z_k$  не може бути зменшений до настільки малих значень порівняно з повним опором обмотки  $Z_{об}$ , щоб ним можна було б нехтувати. Під час вибору кабелю важливо забезпечити стабільні значення  $Z_k$  під час процедурних маніпуляцій та взаємозамінність ВСП. Останнє особливо критично для автогенераторних ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД, для яких визначено, що розподілена ємність з’єднувального кабелю має становити  $100 \pm 5$  пФ. Залежно від марки кабелю змінюється не тільки ємність, але й інші параметри, зокрема погонне (на одиницю довжини) загасання. У кабелів малого діаметру воно досягає 0,4 дБ/м. У товстіших кабелів цей параметр є суттєво меншим і може знижуватися до 0,05 дБ/м, але вони не зовсім придатні для використання через низьку гнучкість. Характеристики кабелю, зокрема їх добротність, суттєво залежить від використаних матеріалів. Для ізоляції використовують матеріали на основі поліетилену, полістиролу, політетрафторетилену тощо. Центральна жила радіочастотного кабелю може складатися з одної або декількох дротів з міді, луженої міді, міді з покриттям із срібла тощо. Для оптимального вибору кабелю за допомогою вимірювача добротності типу ВМ 560 виміряно електричні параметри різних варіантів кабелю довжиною 1,5 м. Результати наведено в табл. 2, де:  $R$  – активний опір;  $C$  – ємність;  $Q$  – добротність;  $L$  – індуктивність;  $-$  хвильовий опір;  $R_{екв} = \rho Q$  – еквівалентний опір.

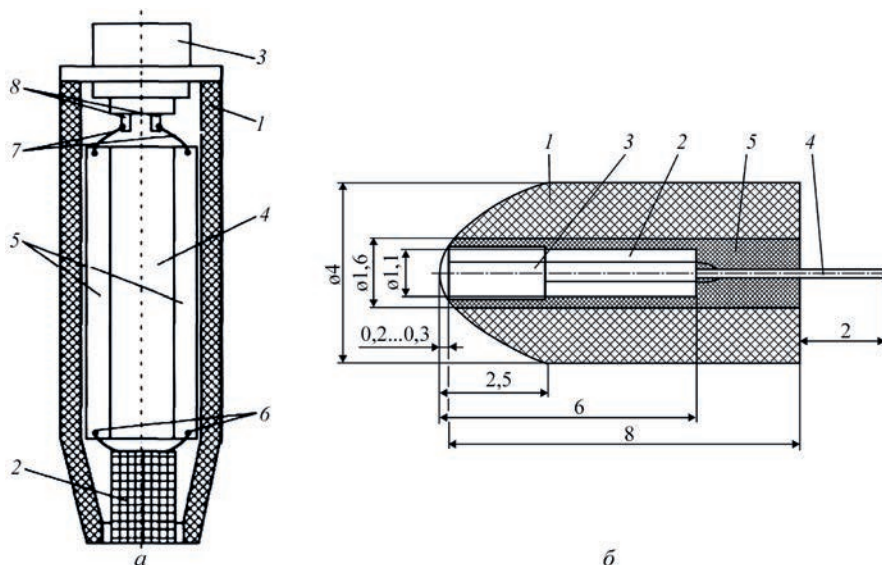


Рис. 9. Конструкції високодобротних параметричних ВСП: а – ВСП для ручного контролю; б – мініатюрний ВСП для контролю важкодоступних зон за допомогою маніпулятора



Таблиця 2. Електричні характеристики кабелів (довжина 1,5 м)

Тип кабелю	$R$ , Ом	$C$ , пФ	$Q$	$L$ , мкГн	$\rho$ , Ом	$R_{\text{екв}}$ , Ом
РК 50-1,5-11	0,24	121,0	6,0	0,23	40,3	242
РК 50-1,5-13	0,09	147,3	10,4	0,15	38,4	399
РК 50-2-11	0,25	168,0	7,0	0,19	33,7	236
РК 75-2-11	0,17	100,6	10,2	0,28	48,9	499
РК 75-2-13	0,20	97,9	10,8	0,34	58,5	632
РК 75-2-13А	0,18	99,0	10,6	0,31	63,5	673
Екранована вита пара МГТФ-0,14	0,41	110,0	12,0	0,79	95,3	1144
Екранована вита пара МГШВ-0,2	0,11	165,0	26,0	0,44	101,7	2644
Екранований дріт МГШВЭ-0,2	0,14	257,0	7,5	0,90	54,8	411

Аналіз табл. 2 дозволяє зробити наступні висновки:

1. За відсутності жорстких вимог щодо довжини кабелю можна використовувати всі марки радіочастотних кабелів з погонною ємністю до 100 пФ і задовільною добротністю.

2. За електричними параметрами найпридатнішим виглядає кабель марки РК 75-2-11. Але його використання обмежено через велику механічну жорсткість, яка суттєво зростає за низьких температур.

3. Екрановані пари дротів марок МГТФ-0,14, МГШВ-0,2 та МГШВЭ-0,2 за сукупністю електричних параметрів також є малопридатними для використання.

4. Кабелі марок РК 75-2-13 і РК 75-2-13А є оптимальними для виготовлення довших (близько 1,5 м) кабелів, що пов'язано з низькими значеннями погонної ємності.

5. Кабелі марок РК 50-1,5-11 і РК 50-2-11 мають порівняно більшу ємність, меншу добротність, хвильовий та еквівалентний опір. Тому вони можуть бути використані у випадках, коли допустима відносно мала (близько 1 м) довжина кабелю.

4. Експериментальні випробування параметричних ВСП: аналіз чутливості і можливості розділення впливу дефекту та зміни зазору. Презентований вище ВСП досліджували за допомогою

ВД типу EDDYCON C у резонансному режимі. ВСП випробували з використанням стандартних зразків (СЗ) типу СОП 5 із алюмінієвого, титанового сплаву та із феромагнітної сталі відповідно (рис. 10). На поверхню СЗ електроерозійним методом нанесено короткі пази довжиною 2 мм і розкриттям до 0,1 мм. На поверхні СЗ із алюмінієвого сплаву нанесені пази глибиною 0,2 і 0,5 мм, а на СЗ із титанового сплаву та сталі виконані пази глибиною 0,5 і 1,5 мм. Крім пазів на плоскій частині СЗ (на рис. 10 дефекти 1, 2) нанесено пази на циліндричних випуклій (на рис. 10 дефекти 3, 4) та увігнутій (на рис. 10 дефекти 5, 6) ділянках радіусом 6 мм. Крім того, в крайовій зоні СЗ нанесено 2 дефекти довжиною 0,5 і 1,0 мм (на рис. 10 дефекти 7, 8). Такі СЗ дозволяють оцінювати чутливість ВСП за глибиною та довжиною дефекту у феромагнітних сталях і неферомагнітних матеріалах з різною ПЕП для плоских і криволінійних поверхонь. Бездефектну область цих СЗ було також використано для реєстрації сигналу ВСП від зміни зазору. Забігаючи наперед, зазначимо, що базовий ВСП дозволив надійно виявити усі дефекти в зазначених СЗ, включаючи дефекти на випуклій і увігнутій поверхнях та в зоні краю.

Результати випробувань параметричного ВСП з метою виявлення коротких тріщин на СЗ із алюмінієвого сплаву (рис. 11) показали достатню чутливість до дефектів завдовжки 2 мм і завглибшки більше 0,2 мм з хорошим розділенням сигналу від зазору та дефекту на робочій частоті 1,0 МГц. Для цього також використано методичний прийом, коли чутливість по вертикалі більша за чутливість по горизонталі (на 24 дБ на рис. 11, а і на 18 дБ на рис. 11, б).

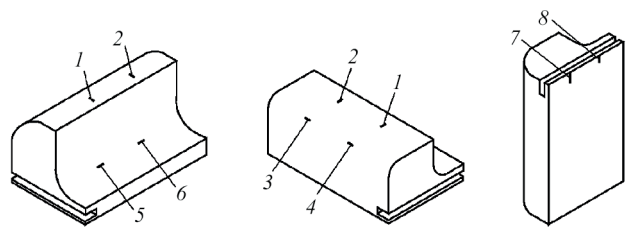


Рис. 10. Зовнішній вигляд СЗ з дефектами типу СОП 5

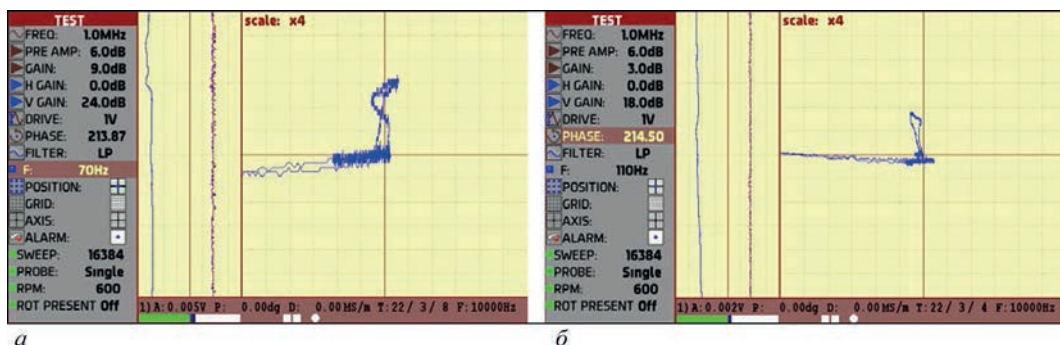


Рис. 11. Сигнали параметричного ВСП від дефекту типу тріщина завдовжки 2 мм і завглибшки 0,2 мм (а) і 0,5 мм (б) в СЗ із алюмінієвого сплаву та від зміни зазору (а, б) на робочій частоті 1,0 МГц

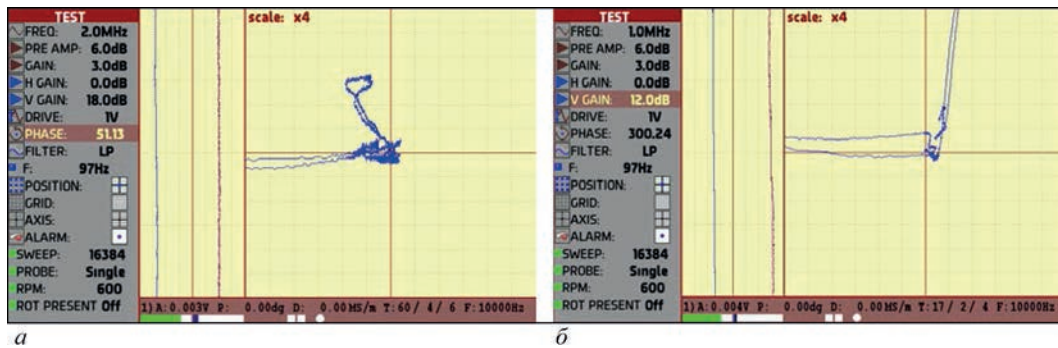


Рис. 12. Сигнали параметричного ВСП від дефекту типу тріщина завдовжки 2 мм і завглибшки 1,5 мм та від зміни зазору в СЗ з титанового сплаву (а) і феромагнітної сталі (б)

Для випробувань параметричних ВСП на СЗ з титанового сплаву робочу частоту було збільшено до 2 МГц через їх суттєво меншу ПЕП. Результати випробувань на СЗ із титанового сплаву наведено на рис. 12, а. На рис. 12, б наведено результати випробування СЗ із феромагнітної сталі на робочій частоті 1 МГц. Тут чутливість по вертикалі також більша за чутливість по горизонталі (на 18 дБ на рис. 12, а і на 12 дБ на рис. 11, б).

Результати, подані на рис. 12, а, б показують, що ВСП забезпечує виявлення тріщин завдовжки більше 2,0 мм в титанових сплавах і феромагнітних сталях з можливістю ефективного відлаштування від впливу зміни зазору. Необхідно зазначити, що менша чутливість по глибині для дефектів у титанових сплавах порівняно з чутливістю до дефектів в алюмінієвих сплавах відома та пояснюється їх суттєво нижчою ПЕП. Для феромагнітних сталей чутливість по глибині часто обмежується суттєво більшим рівнем завад, для зменшення якого необхідні або додаткове підмагнічування, або використання селективніших ВСП [21].

### Висновки

1. Узагальнено результати досліджень і розробок, пов'язаних з оптимізацією конструкції параметричних ВСП для виявлення поверхневих дефектів.
2. Обґрунтовано вибір діаметру ВСП залежно від найменшої довжини тріщин, які необхідно виявляти. Показано, що для виявлення тріщин завдовжки більше 2 мм оптимальним є використання ВСП з обмотками, встановленими на ФО діаметром 1,2 мм. Для виявлення коротких тріщин завдовжки більше 1 мм розроблено ВСП з обмоткою, розташованою на ФО діаметром 0,75 мм.
3. Проаналізовано вплив параметрів ФО (довжини, магнітної проникності та відступу обмотки від кінця ФО) на ефективність параметричних ВСП з метою їх оптимізації.
4. Проаналізовано умови розділення впливу дефекту та зазору шляхом інтерпретації сигналів в комплексній площині та показано можливість їх

розділення для усіх немагнітних конструкційних сплавів.

5. Представлено конструкцію параметричного ВСП, яка дозволяє збільшити їх добротність більше ніж у 2 рази та розглянуто питання оптимального вибору з'єднувального кабелю для підключення ВСП до ВД.

5. Проведено випробування базового параметричного ВСП, які підтвердили його високу чутливість до коротких тріщин завдовжки більше 2 мм з надійним розділенням впливу дефекту і зазору.

### Список літератури

1. Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic flaw detection*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. (1992) *Не разрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль*. Москва, Высшая школа. Gerasimov, V.G., Pokrovsky, A.D., Sukhorukov, V.V. (1992) *Non-destructive testing. In: 5 books. Book 3: Electromagnetic testing*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
3. Libby, H.L. (1971) *Introduction to Electromagnetic Non-destructive Test Methods*. New-York, etc: Wiley-Interscience.
4. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, **11**, 2525–2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
5. AbdAlla, A.N., Faraj, M.A., Samsuri, F. et al. (2019) Challenges in improving the performance of eddy current testing: Review. *Meas. Control*, **52**, 46–64. <https://doi.org/10.1177/0020294018801382>.
6. Rao, B.P.C. (2011) Eddy Current Testing: *Basics. J. of Non-Destructive Testing & Evaluation*, **10**(3), 7–16.
7. Hagemaijer, D.J. (1991) Application of crack detection to aircraft structures. In *«Fatigue crack measurement: techniques and applications»* (Eds K.J. Marsh, R.A. Smith and R.O. Ritchie). Warley (UK): EMAS, 419–455.
8. Uchanin, V. (2021) Enhanced eddy current techniques for detection of surface-breaking cracks in aircraft structures. *Transactions on Aerospace research*, **1**(262), 1–14. <https://doi.org/10.2478/tar-2021-0001.e>, ISSN 2445-2835.
9. Uchanin, V. (2007) Specific features of the space distribution of the signal of an eddy-current converter caused by cracks of different lengths. *Materials Science*, **43**(4), 591–595. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0068-2>
10. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. (1967) *Накладные и экранные датчики*. Новосибирск, Наука. Sobolev, V.S. Shkarlet, Yu.M. (1967) *Put-on and screen sensors*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
11. Дякин В.В., Сандовский В.А. (1981) *Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей*. Москва, Наука.

- Dyakin, V.V., Sandovsky, V.A. (1981) *Theory and calculation of overhead eddy current converters*. Moscow, Nauka [in Russian].
12. Sabbagh, H.A., Sabbagh, L.D., Bowler, J.R. (1988) A Model of Ferrite-core Probes over Composite Workpieces, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 7A. New York, Plenum Press, 479–486.
  13. Sabbagh, L.D., Hedengren, K.H., Hurley, D.C. (1991) Interaction of Flaw with a Ferrite-core Eddy Current Probe: Comparison Between Model and Experiment, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 10A. New York, Plenum Press, 883–888.
  14. Беда П.И. (1970) Исследование сигнала накладного датчика в зависимости от изменения размеров и расположения дефектов типа трещин. *Дефектоскопия*, 1, 62–68.  
Beda, P.I. (1970) Examination of signal of overhead sensor depending on change of sizes and location of crack type defects. *Defektoskopiya*, 1, 62–68 [in Russian].
  15. (2000) EN 13860-2 *Non-destructive testing – Eddy current examination – Equipment characteristics and verification – Part 2: Probe characteristics and verification*, European Committee for standardization.
  16. Capobianco, T.E., Splett, J.D., Iyer, H.K. (1990) Eddy Current Probe Sensitivity as a Function of Coil Construction Parameters. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2, 169–186.
  17. Capobianco, T.E. (1987) Field mapping and performance characterization of commercial eddy current probes. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 6 A, New York, Plenum Press, 687–694.
  18. Uchanin, V. (2012) Invariant efficiency parameter of eddy-current probes for nondestructive testing. *Materials Science*, 48(3), 408–413. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9520-z>.
  19. Dunbar, W.S. (1985) The volume integral method of eddy current modeling, *J. Nondestruct. Eval.*, 5(1), 9–14.
  20. (1996) *User's Guide for VIC-3D: An Eddy current NDE Code. Version 2.4*. USA, Bloomington, Sabbagh Associates, Inc.
  21. Uchanin, V., Nardoni, G. (2020) *Eddy Current Detection of Cracks in Ferromagnetic Steel Structures*, in «*The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*». Ed. Richard M. Wilcox, Nova Science Publishers, NY, USA, 193–221.

## OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF EDDY CURRENT PROBE OF PARAMETRIC TYPE TO DETECT SURFACE CRACKS

V.M. Uchanin

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

The paper summarizes the results of research concerned with the optimization of the eddy current probe of the parametric type used for surface defects detection. It is shown that the choice of eddy current probe diameter significantly depends on the smallest length of cracks needed to be detected. In particular, it was determined that to detect a crack longer than 2 mm, it is optimal to use an eddy current probe with windings mounted on the 1.2 mm diameter ferrite core. To detect shorter cracks longer than 1 mm, it is necessary to use an eddy current probe with windings on the 0.75 mm diameter ferrite core. The influence of ferrite core parameters (length, magnetic permeability, and offset of winding from the ferrite core end) on the efficiency of parametric type eddy current probes is analyzed. The results obtained should be used for eddy current probe optimization. The conditions of separation of defect and lift-off influence are analyzed by interpretation of signals in the complex plane, and the possibility of their separation for the developed eddy current probes for all nonmagnetic structural alloys is shown. The design of a parametric type eddy current probe makes it possible to increase their quality factor more than twice. The optimal choice of the cable for connection of an eddy current probe and flaw detector is considered. The optimized parametric eddy current probes were tested. The high sensitivity of the developed probe to short cracks longer than 2 mm with reliable separation of the defect and lift-off influence was shown. Ref. 21, Tabl. 2, Fig. 12.

*Keywords: eddy current non-destructive testing, surface crack, eddy current probe, ferrite core*

Надійшла до редакції 18.03.2022

### XI МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

## Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах

12–16 вересня 2022 р., Одеса, готель «Аркадія»

Голова програмного комітету академік І.В. Кривцун



**Національна академія наук України  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»**

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 серпня 2022 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць десяти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/mmw>

#### Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.08.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 05.09.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 12.09.2022 р.

#### Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
вул. Казимира Малевича 11,  
м. Київ, 03150, Україна  
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
<http://pwi-scientists.com/ukr/mmi2022>

