

НАКЛАДНІ ВИХРОСТРУМОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОДВІЙНОГО ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ЗАСІБ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В.М. Учанін

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

Представлено принципово новий тип накладних вихрострумів перетворювачів подвійного диференціювання, які характеризуються підвищеною чутливістю до поверхневих і підповерхневих дефектів різного типу. Розроблено сімейство вихрострумів перетворювачів подвійного диференціювання різного діаметру з різною просторовою роздільною здатністю. У роботі проаналізовано основні особливості вихрострумів перетворювачів подвійного диференціювання та наведено нові інноваційні технології контролю, які дозволяють вирішити найскладніші проблеми неруйнівного контролю. Розроблені вихрострумові перетворювачі досліджено та випробувано як ефективний засіб неруйнівного контролю багат шарових авіаційних конструкцій, у яких необхідно виявляти внутрішні дефекти. Вони забезпечують, зокрема, виявлення тріщин у другому шарі багат шарових авіаційних конструкцій або тріщин на зворотній поверхні обшивки авіаційних конструкцій; виявлення підповерхневих дефектів у зоні зварного шва з шорсткою поверхнею; виявлення тріщин через ремонтні латки, виготовлені з алюмінієвого сплаву або вуглецевого композиту; виявлення підповерхневих тріщин біля заклепкових отворів тощо. Ці технології створюють унікальні можливості для своєчасного виявлення небезпечних пошкоджень без розбирання конструкції об'єкта контролю або видалення захисного покриття. Розроблені вихрострумові перетворювачі є ефективними для виявлення тріщин у феромагнітних сталевих виробках, таких як поковки, лопатки та вали газових турбін, рейки, колеса або осі залізничного рухомого складу, литво з грубо обробленою поверхнею тощо. Крім того, висока чутливість до дефектів може бути досягнута навіть під час контролю через повітряний зазор або діелектричний покрив. Це дозволяє успішно використовувати їх у багатьох автоматизованих системах контролю. Бібліогр. 17, рис. 15.

Ключові слова: неруйнівний контроль, вихрострумів перетворювач подвійного диференціювання, багат шарова конструкція літака, підповерхневий дефект, ремонтні латки, заклепковий отвір

Вступ. Вихрострумів (ВС) метод неруйнівного контролю (НК) є одним із найпоширеніших для виявлення поверхневих і приповерхневих дефектів та визначення характеристик електропровідних матеріалів [1–9]. На початку свого розвитку ВС метод застосовували переважно для виявлення поверхневих дефектів через високі робочі частоти, які використовувалися в перших ВС дефектоскопах, що призводило до концентрації змінного струму у зовнішніх шарах електропровідного матеріалу внаслідок скін-ефекту [10, 11]. Згодом почали використовувати нижчі робочі частоти, що розширило сферу застосування ВС методу та дозволило виявляти приховані підповерхневі дефекти, у тому числі в багат шарових конструкціях літаків. Вихрострумові перетворювачі (ВСП), які зазвичай застосовуються в практиці ВС контролю, поділяють на два основних типи – абсолютні та диференційні [3–5, 8]. Кілька десятиліть тому у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України з метою покращення селективності ВС контролю було створено принципово новий тип накладних ВСП, які названо ВСП подвійного диференціювання [8, 12, 13]. Досвід їх використання показав, що ці ВСП мо-

жуть вирішувати задачі, які складно (а іноді неможливо) вирішити традиційними ВСП абсолютного або диференційного типу. Запропоновані ВСП подвійного диференціювання характеризуються підвищеною чутливістю до поверхневих і підповерхневих дефектів різного типу, що виникають під час виготовлення виробу або ініційовані явищами втоми чи корозії в експлуатованих конструкціях. Розроблено сімейство ВСП подвійного диференціювання різного діаметру з різною просторовою роздільною здатністю, склад якого постійно розширюється [8]. Розроблені ВСП досліджено та випробувано як ефективний засіб НК типових авіаційних багат шарових конструкцій (АК), у яких необхідно виявляти внутрішні дефекти. Вони забезпечують, зокрема, виявлення тріщин у другому шарі багат шарових АК або тріщин на зворотній поверхні обшивки АК зі зменшенням впливу краю підсилювального поясу; виявлення підповерхневих дефектів у зоні зварного шва з шорсткою поверхнею; виявлення тріщин через ремонтні латки, виготовлені з алюмінієвого сплаву або вуглецевого композиту; виявлення підповерхневих тріщин біля заклепкових отворів тощо. Ці технології створюють унікальні можливості

В.М. Учанін – <http://orcid.org/0000-0001-9664-2101>
© В.М. Учанін, 2022

для своєчасного виявлення небезпечних пошкоджень без розбирання конструкції об'єкта контролю (ОК) або видалення захисного покриття [8, 12, 13]. Крім того, розроблені ВСП є ефективними для виявлення тріщин у феромагнітних сталевих виробках, таких як поковки, лопатки та вали газових турбін, рейки, колеса або осі залізничного рухомого складу, литво з грубо обробленою поверхнею тощо [8]. ВСП подвійного диференціювання, наприклад, використано в механізованій 8-канальній установці для виявлення тріщин у зварних швах із феромагнітних сталей через діелектричний захисний покриття завтовшки 4 мм, розробленій німецькою фірмою Test Maschinen Technik GmbH. При цьому висока чутливість до дефектів може бути досягнута навіть під час контролю через повітряний зазор або діелектричний покриття завтовшки до 10 мм. Через цю особливість ВСП подвійного диференціювання успішно використовуються в багатьох автоматизованих системах НК, наприклад, у 64-канальній системі ВС контролю для виявлення дефектів алюмінієвих смужок, розробленій в Інституті НК Фраунгофера (Саарбрюкен, Німеччина), багатоканальних системах НК колісних пар і залізничних осей, розроблених в Українському інституті неруйнівного контролю (Київ) тощо [8].

У цій статті проаналізовано основні особливості ВСП подвійного диференціювання та наведено нові інноваційні технології ВС НК, які дозволяють вирішити найскладніші проблеми НК.

Конструкція ВСП подвійного диференціювання та основні особливості формування сигналів від дефектів. ВСП подвійного диференціювання складаються з двох генераторних обмоток 1 і двох вимірювальних обмоток 2, встановлених на феритових осердях та розташованих по кутах чотирикутника (рис. 1, а) [8]. Дві генераторні обмотки 1 з'єднані послідовно та орієнтовані для створення однакових і протилежних первинних електромагнітних полів. Розроблені ВСП змонтовані в корпус із алюмінієвого сплаву для зменшення електронних завад і забезпечено роз'ємами різного типу для роботи з дефектоскопами провідних виробників засобів ВС контролю (рис. 1, б).

Побудова ВСП подвійного диференціювання (рис. 1, а) створює важливі особливості у розподілі первинного електромагнітного поля та вторинного поля, створеного вихровими струмами, індукованими в ОК (рис. 2). Зокрема, у зоні між обмотками збудження створюється характерна нейтральна площина, у якій вертикальна складова сумарного електромагнітного поля дорівнює нулю (на рис. 2, а показано пунктиром) [8]. Вимірювальні обмотки ВСП встановлено в нейтральній площині та орієнтовано чутливими до вертикальної складової електромагнітного поля, яка дорівнює нулю для ізотропних і бездефектних матеріалів ОК. Важливо, що вихрові струми, створювані обома обмотками збудження, мають однаковий напрямок і таким чином у нейтральній площині додаються (рис. 2, б), що сприяє збільшенню чутливо-

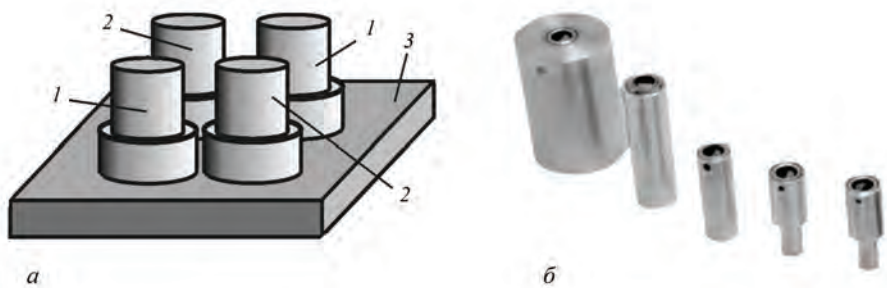


Рис. 1. Побудова ВСП подвійного диференціювання (а): 1 – обмотки збудження; 2 – вимірювальні обмотки; 3 – ОК; ВСП подвійного диференціювання різного розміру і роздільної здатності (б)

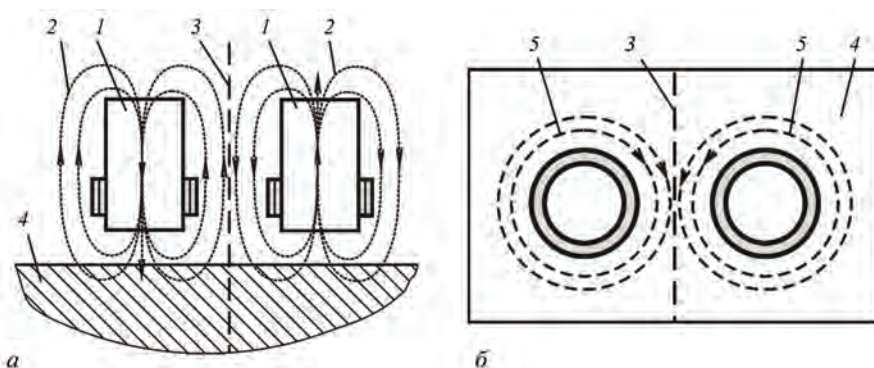


Рис. 2. Первинне електромагнітне поле, створене обмотками збудження (а) і відповідні вихрові струми (б): 1 – феритові осердя; 2 – первинне електромагнітне поле; 3 – нейтральна площина; 4 – ОК; 5 – вихрові струми

сті ВС контролю. За рахунок зустрічного з'єднання вимірювальних обмоток реалізується подвійно диференціальний відгук вихідного сигналу ВСП.

Конструкція ВСП подвійного диференціювання забезпечує глибоке проникнення вихрових струмів вглиб матеріалу ОК, оскільки загасання вихрових струмів можна зменшити або шляхом вибору великого діаметра обмоток ВСП коаксіального типу, або використанням обмоток збудження та вимірювальних обмоток малого діаметра, розташованих на певній відстані одна від одної (рис. 1). Через відносно невеликий діаметр обмоток отримано також високу просторову роздільну здатність, що важливо для виявлення локальних дефектів. Характерною особливістю таких ВСП порівняно зі звичайними є: висока чутливість до подовжених (типу тріщина) та до локальних (таких як коротка тріщина, корозійний пітинг або пора) дефектів; висока чутливість до поверхневих і підповерхневих дефектів, у тому числі під час контролю через немагнітну обшивку, шар захисного покриття або проміжок між ВСП і поверхнею ОК; велика глибина контролю для низькочастотних ВСП; низький рівень завад, у тому числі обумовлених впливом зміни зазору. Розроблено низку ВСП подвійного диференціювання діаметром 4...33 мм, що характеризуються різним розміром обмоток, діапазоном робочих частот і просторовою роздільною здатністю (рис. 1, б). ВСП подвійного диференціювання адаптовано до сучасних універсальних ВС дефектоскопів. Вони забезпечують контроль на різних робочих частотах у діапазоні 50 Гц...12 МГц.

Особливістю ВСП подвійного диференціювання є залежність їх чутливості від орієнтації тріщини. Оптимальну орієнтацію цих ВСП відносно напрямку тріщини показано на рис. 3, а, де лінія, що з'єднує центри обмоток збудження, орієнтована під кутом 45° відносно напрямку тріщини. Спеціальна позначка на корпусі ВСП допомагає вибрати оптимальну орієнтацію. При цьому сигнал від тріщини має «квазіабсолютний» характер (рис. 3, б), подібний до сигналу абсолютного ВСП, який характеризується максимальною амплітудою під час знаходження ВСП безпосередньо над тріщиною.

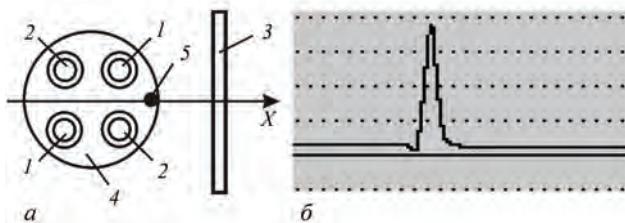


Рис. 3. Оптимальна орієнтація ВСП подвійного диференціювання відносно напрямку тріщини (а): 1 і 2 – обмотки збудження та вимірювальні обмотки відповідно; 3 – тріщина; 4 – корпус; 5 – спеціальна позначка; «квазіабсолютний» сигнал від тріщини (б)

Реальні сигнали низькочастотного ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201, створювані підповерхневим дефектом у комплексній площині імпедансу ВС дефектоскопа типу ELOTTEST В1 німецької фірми Rohmann GmbH, представлені на рис. 4. Для виявлення підповерхневих дефектів типу тріщин, що залягають на глибині 1 та 3 мм, використовували низьку робочу частоту 2 кГц. Чутливість ВС дефектоскопа до дефекту, що залягає на глибині 3 мм, вибрано на 10 дБ більшою, ніж для дефекту з глибиною залягання 1 мм. Тут глибина залягання дефекту відповідає відстані між верхнім краєм підповерхневого дефекту та поверхнею ОК. Також для порівняння наведено сигнал від зазору («lift-off») на рис. 4) як основного джерела завад. Сигнали від зазору орієнтовано в комплексній площині горизонтально відповідно до стандартної процедури ВС контролю.

Наведені результати показують досить високу чутливість до підповерхневих дефектів із високим ступенем заглушення впливу зміни зазору. Навіть для дефекту, що лежить на глибині 3 мм, відношення амплітуди сигналу від дефекту до амплітуди сигналу відриву суттєво перевищує 6 дБ. Крім того, сигнали відрізняються за фазою (напрямок сигналів у комплексній площині), що надає додаткові можливості для розділення корисних сигналів, створених дефектами та впливом зазору.

Для локальних дефектів, таких як пори або корозійні виразки, ВСП подвійного диференціювання створюють специфічний просторовий чотириточковий розподіл сигналу з двома позитивними та двома негативними піками. На рис. 5 подано характерні експериментальні розподіли чутливості, отримані за допомогою ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201 під час порядкового сканування зони локального дефекту, імітованого свердлінням діаметром 1 мм [8].

Виявлення втомних тріщин у другому шарі двошарових АК в зоні заклепок. Розглянемо проблему виявлення втомних тріщин, що виникли під час експлуатації АК між заклепками у другому шарі двошарових з'єднань стрингер–обшивки. Такі з'єднання характерні для більшості АК.

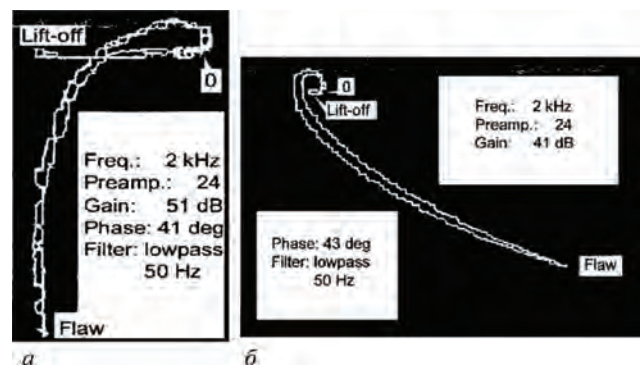


Рис. 4. Сигнали ВСП подвійного диференціювання від підповерхневих тріщин з глибинами залягання 1 (а) і 3 мм (б)

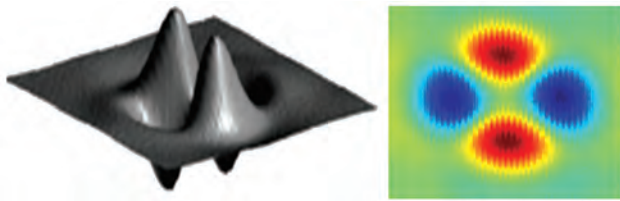


Рис. 5. Чотириточковий просторовий розподіл сигналу з двома позитивними та двома негативними піками для локальних дефектів

У досліджуваному зразку необхідно було виявити тріщини між заклепками через верхню обшивку завтовшки 1,4 мм. Відстань між краями заклепок із потайною головкою становила лише 8 мм. Таким чином, під час сканування зони між заклепками спостерігався помилковий сигнал за відсутності дефекту, пов'язаний із впливом заклепкового отвору. Зразок для налаштування ВС дефектоскопа наведено на рис. 6. Під час випробувань використовували дві траєкторії сканування: траєкторія 5 дозволяє спостерігати сигнали за відсутності дефекту, а траєкторія 6 імітує сканування через тріщину, розташовану в другому шарі АК [12].

Основною проблемою під час ВС контролю таких конструкцій є високий рівень завад, пов'язаних із впливом заклепки. Тому методика контролю повинна відокремлювати сигнали від дефекту у другому шарі від сигналу завад, створюваних заклепками. Селективну інтерпретацію сигналів можна забезпечити шляхом аналізу характерних для дефекту ознак у комплексній площині на екрані дефектоскопа. Розроблена методика передбачає використання ВСП типу МДФ 0602 діаметром 6 мм, яким сканують зону між заклепками (пунктирні лінії на рис. 6, а). Попередньо компенсували сигнал небалансу після встановлення ВСП у точці 4, яка розташована на відстані 10...12 мм

від лінії, що з'єднує заклепки 2. Сигнали реєстрували за допомогою ВС плати типу EDDYMAX на робочій частоті 6 кГц. Сигнали від тріщини у другому шарі наведено на рис. 6, б, а сигнал під час сканування бездефектної зони між заклепками – на рис. 6, в.

З отриманих результатів видно, що сигнали ВСП під час сканування бездефектної зони (рис. 6, в) рухаються від точки балансу («0» на рис. 6) у напрямку нижньої частини комплексної площини. І навпаки, сигнал від дефекту має інший висхідний напрямок у другий квадрант комплексної площини (рис. 6, б). Ці результати вказують на можливість селективного ВС контролю, за якого корисні сигнали від дефектів легко розрізняють від сигналів, створених заклепковими отворами за відсутності дефектів.

Виявлення втомних тріщин, що зародилася на зворотній поверхні АК в зоні краю підсилювального поясу. Інший характерний приклад ефективного ВС контролю АК стосується проблеми виявлення внутрішніх втомних тріщин в обшивці фюзеляжу літака Boeing 737 в місцях з'єднань внапуск з додатковим підсилювальним поясом (ПП) (рис. 7, а). ПП 3 завтовшки 0,9 мм розташований між обшивками 1 і 2 з алюмінієвого сплаву завтовшки 0,9 мм (рис. 7, а). Запропонована методика ВС контролю спрямована на виявлення втомних тріщин завглибшки 0,45 мм (50 % товщини обшивки), які зароджуються на внутрішній поверхні верхньої обшивки 1 вздовж краю ПП 3 з доступом тільки з зовнішньої сторони фюзеляжу (рис. 7, в). Проблема полягає у необхідності відокремлення сигналів від тріщин, розташованих на внутрішній поверхні верхньої обшивки, від достатньо сильних помилкових сигналів, обумовлені

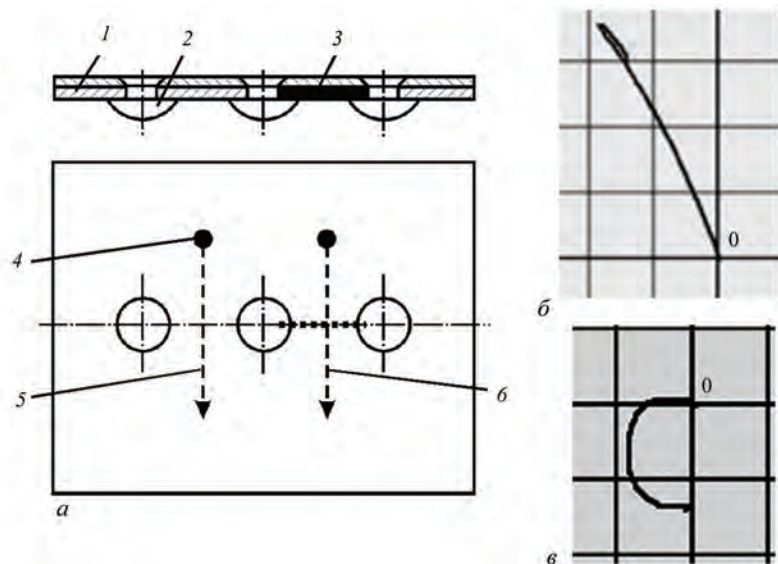


Рис. 6. Зразок для моделювання двошарової АК з заклепками (а): 1 – двошарова конструкція; 2 – заклепки; 3 – тріщина; 4 – точка балансування; 5 та 6 – траєкторії сканування в бездефектній та дефектній зонах відповідно; сигнал ВСП у комплексній площині від тріщини у другому шарі (б); сигнал, обумовлений впливом отворів бездефектних заклепок (в)

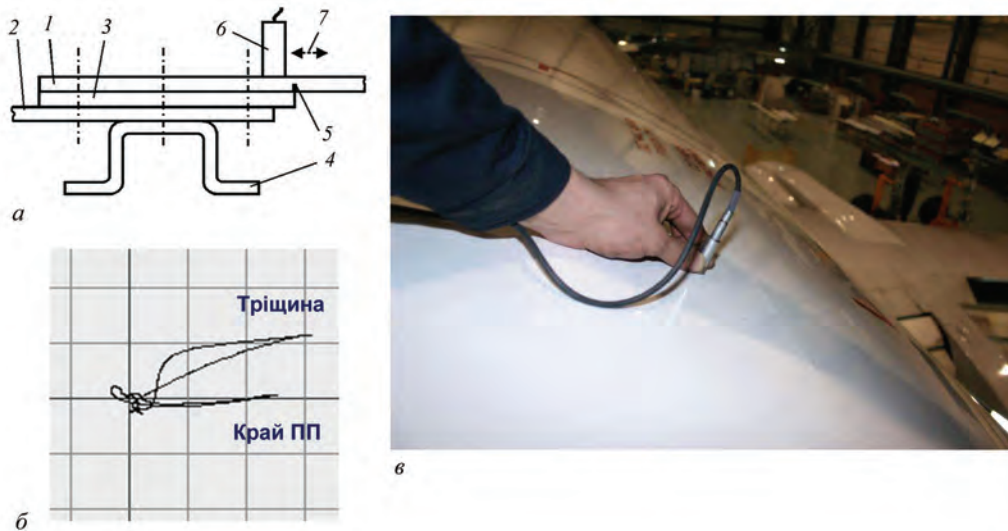


Рис. 7. Багатошарова конструкція літака Боїнг 737 з підсилювальним поясом (а); 1, 2 – обшивки; 3 – ПП; 4 – стрингер; 5 – тріщина; 6 – ВСП; 7 – траєкторія сканування; сигнал від тріщини (б); проведення контролю обшивки літака Боїнг 737 за допомогою ВСП типу МДФ 1201 (в)

них впливом краю ПП, які утворюються через використання низьких робочих частот.

Запропонована методика НК базується на використанні низькочастотного ВСП типу МДФ 1201 на робочій частоті 26 кГц. Сигнали ВСП реєстрували у комплексній площині, яку обертали таким чином, щоб сигнал від краю ПП скерувати горизонтально (рис. 7, б) [12]. Видно (рис. 7, б), що сигнал від тріщини, що залягає на глибині 0,45 мм, відхиляється від горизонталі на кут $\sim 30^\circ$. Цієї різниці достатньо для повного розділення сигналів від тріщини і краю ПП. Тим більше, кут між цими сигналами можна легко збільшити вибором більшого (наприклад на 12 дБ) підсилення по вертикальній осі порівняно з підсиленням по горизонтальній осі. Дану методику впроваджено для експлуатаційного НК літака Boeing 737 в компанії «Міжнародні Авіалінії України» (рис. 7, в).

Виявлення втомних тріщин АК через ремонтні латки. Ремонтні латки, наклеєні на пошкоджені конструкції літака, широко застосовуються як економічно ефективний метод збільшення терміну служби. Методи ремонту з метою посилення пошкодженої АК передбачають використання різних матеріалів, таких як алюмінієвий сплав або пластик, армований вуглецевим волокном, тощо. Такі конструкції підлягають додатковому НК з метою виявлення втомних тріщин, які можуть виникнути у відремонтованій АК під латкою. ВСП подвійного диференціювання успішно використано для виявлення тріщин через латку з алюмінієвого сплаву, наклеєну на пошкоджене крило літака Ту-154. Після усунення тріщини було сформовано закруглене заглиблення для зниження концентрації механічних напружень. Очікувалося, що тріщина може виникнути у нижній частині заглиблення через послаблення

обшивки. Через такі очікування передбачався демонтаж латки через кожні 300 посадок літака для виявлення можливих тріщин на дні заглиблення методами традиційного ВС контролю. Методика ВС контролю, побудована на використанні низькочастотних ВСП подвійного диференціювання, забезпечила виявлення тріщин в обшивці крила через латку з алюмінієвого сплаву завтовшки 2 мм без її демонтажу.

Сучасні технології ремонту АК використовують латки із композиційних вуглецевих матеріалів [14, 15]. Найчастіше ремонтні латки з вуглепластику наклеюють на пошкоджений елемент АК з алюмінієвого сплаву. Для дослідження чутливості ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201 виготовили зразок із алюмінієвого сплаву з двома електроерозійними прорізами завглибшки 0,5 і 1 мм, який накривали листом вуглепластику завтовшки 4,5 мм. Будь-які звичайні ВСП не мають достатньої чутливості для виявлення таких дефектів через шар вуглепластику. Сигнали, створені дефектами під латками, реєстрували на робочій частоті 30 кГц за допомогою ВС плати типу EDDYMAX у комплексній площині та в режимі часової розгортки (рис. 8) [12].

Наведені на рис. 8 результати демонструють достатньо високий рівень сигналів від тріщини завглибшки 0,5 мм під час контролю через латку з вуглепластику завтовшки 4,5 мм, що достатньо для ефективного експлуатаційного НК. При цьому амплітуда сигналу корелює з глибиною виявлених дефектів, що можна використати для їх кількісного оцінювання.

Обертова методика виявлення втомних тріщин багатошарових АК під головкою заклепки. Раніше було показано, що найвищу чутливість до тріщин, що починаються від заклепкових

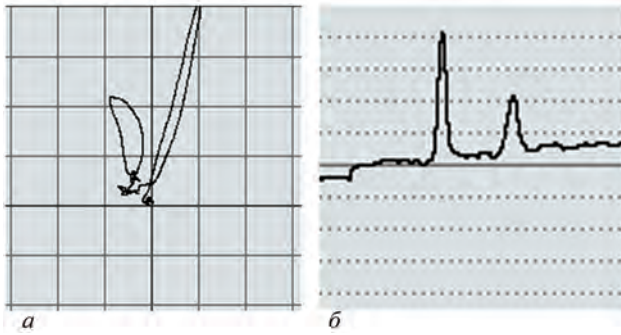


Рис. 8. Сигнали від тріщин завглибшки 0,5 і 1 мм під час контролю через латку із вуглепластика завтовшки 4,5 мм у комплексній площині (а) та в режимі часової розгортки (б)

отворів, має обертовий спосіб, за якого ВСП встановлюють на головку заклепки та обертають навколо її осі [8]. Схему реалізації такої методики за допомогою ВСП подвійного диференціювання наведено на рис. 9. Для встановлення і центрування ВСП в його корпусі виконано спеціальний отвір. Для потайних заклепок для центрування використовують діелектричну накладку. Точність центрування ВСП відносно заклепки під час його обертання важлива, так як впливає на рівень завад.

Обертовий ВСП випробували на робочій частоті 2 кГц. Для дослідження використали зразки з отвором діаметром 6 мм, на бічній поверхні яких нанесено електроерозійні прорізи завширшки 0,1 мм та завдовжки 1...6 мм. Зразок накривали бездефектною обшивкою завтовшки 2 мм з отвором діаметром 6 мм і з'єднували заклепкою для імітації реальної АК (рис. 9, а, б). Сигнали ВСП від

дефектів досліджували у комплексній площині ВС плати типу EDDYMAX. ВСП спочатку встановлювали на бездефектний зразок, що імітує АК без дефекту, і проводили компенсацію небалансу [13]. Після цього проводили реєстрацію сигналів від дефектів шляхом обертання ВСП. Усі дефекти були виявлені з високим співвідношенням сигнал/завада. На рис. 9, в для прикладу наведено сигнал у комплексній площині, отриманий від найменшого дефекту завдовжки 1 мм. Сигнали завад, створені під час обертання ВСП навколо заклепки у бездефектному зразку, наведено на рис. 9, з. Ці результати показують, що сигнал від найкоротшої тріщини завдовжки 1 мм більш ніж на 6 дБ перевищує рівень сигналу від можливих завад. Це переконливо показує, що запропонований обертовий ВСП може виявляти тріщини завдовжки лише 1 мм під заклепкою та верхньою обшивкою завтовшки 2 мм. Для багатьох АК це означає, що втомні тріщини будуть виявлені до того, як вони вийдуть за межі головки заклепки, коли втомна тріщина досягне критичного розміру і станеться лавиноподібне руйнування АК.

Методика ковзного контролю для виявлення втомних тріщин у багатопарових АК. Нова високопродуктивна методика виявлення поперечних (відносно ряду заклепок) тріщин, що виникли в зоні заклепок АК під час експлуатації, також базується на застосуванні ВСП подвійного диференціювання (Учанін В. Вихрострумний спосіб виявлення дефектів в зоні заклепок у внутрішніх шарах нероз'ємних авіаційних вузлів. Пат. Украї-

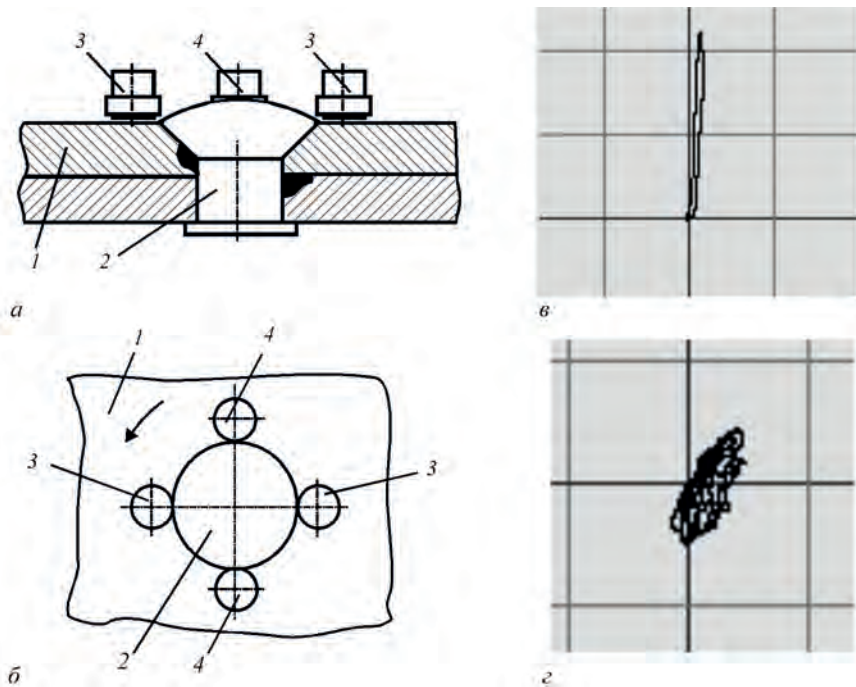


Рис. 9. Обертовий ВСП подвійного диференціювання, встановлений на заклепку двохшарової АК: поперечний переріз (а) і вид зверху (б): 1 – ОК; 2 – заклепка; 3 і 4 – генераторна і вимірювальна обмотки відповідно; сигнали ВСП у комплексній площині від тріщини завдовжки 1 мм, розташованою під головою заклепки і обшивкою завтовшки 2 мм (в); сигнали завад під час обертання ВСП навколо бездефектної заклепки (г)

ни 122624 України, Опубл. 10.12.20, Бюл. № 23). Для реалізації методики розроблено низькочастотний ВСП типу МДФ 1502 діаметром 15 мм. Згідно з запропонованою методикою ВСП сканує АК вздовж лінії, паралельної ряду заклепок, на деякій відстані, як показано на рис. 10.

Можливість використання ВСП подвійного диференціювання для виявлення поперечних тріщин, розташованих у другому шарі завтовшки 3 мм поблизу заклепок (рис. 10), досліджено за допомогою ВС плати EDDYMAX. ВСП подвійного диференціювання дають можливість підвищити достовірність контролю, пов'язану з повним розділенням ВС сигналів від поперечних тріщин і бездефектних заклепок за різними напрямками сигналу у комплексній площині. Цю особливість ілюструє рис. 10, де наведено сигнали для тріщини завдовжки 6 мм у другому шарі у комплексній площині (рис. 10, б) та в режимі часової розгортки (рис. 10, в). Для порівняння на рис. 10, г і рис. 10, д наведено сигнали, отримані від бездефектних заклепкових отворів у комплексній площині та в режимі часової розгортки відповідно. Видно, що сигнали від бездефектних отворів мають досить велику амплітуду, так як знаходяться у верхній обшивці. Але ці результати показують можливість надійного розрізнення

сигналів, створених тріщинами у другому шарі АК та бездефектними отворами, за напрямком у комплексній площині або за знаком сигналів у режимі часової розгортки. Ця методика має нижчу чутливість до тріщин порівняно з обертовим способом. Через це вона може використовуватись у випадках менших вимог щодо граничної чутливості. Тим не менше, суттєво вища продуктивність ковзного ВС контролю порівняно з обертовим способом дає певні переваги для оперативного контролю в умовах експлуатації АК.

Виявлення тріщин в гальтельній зоні лопаток газових турбін. Для відпрацювання нової технології НК в гальтельній зоні лопатки було електроерозійним способом нанесено щілину (розкриття 0,2 мм) завдовжки 4 мм і завглибшки 0,2 мм.

Між робочою поверхнею ВСП і поверхнею лопатки через її кривизну завжди є проміжок ~ 1 мм (рис. 11, а), який обмежує можливості ВС контролю звичайними ВСП. Крім того, під час зигзагоподібного сканування цієї зони ВСП змінює положення відносно контрольованої поверхні, через що традиційні ВСП створюють високий рівень завад, які унеможливають проведення ВС контролю. Ці обмеження можна усунути використанням ВСП подвійного диференціювання типу МДФ

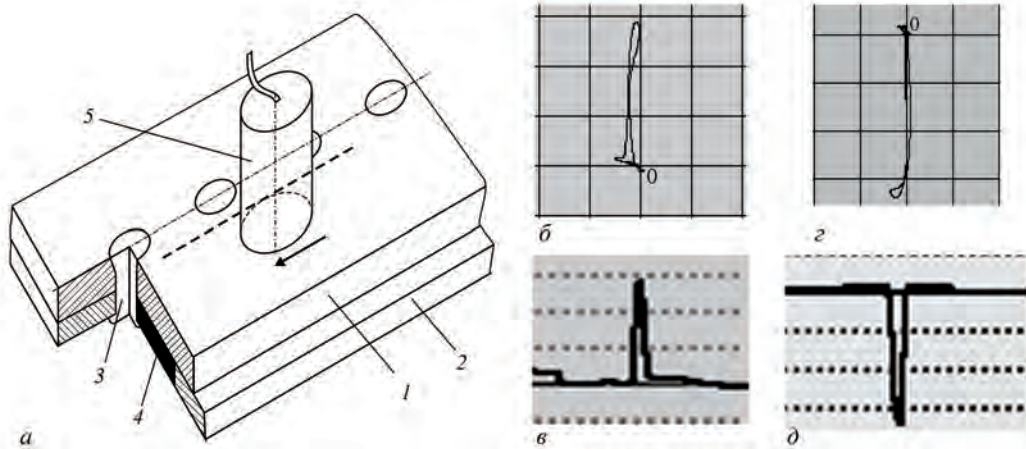


Рис. 10. Схема реалізації ковзної методики виявлення поперечних тріщин у зоні заклепок у другому шарі АК (а): 1 і 2 – перший і другий шари ОК відповідно; 3 – заклепка; 4 – поперечна тріщина; 5 – ВСП; сигнали ВС контролю у комплексній площині (б, г); режимі часової розгортки (в, д) від тріщини у другому шарі (б, в) та від бездефектних заклепкових отворів (г, д)

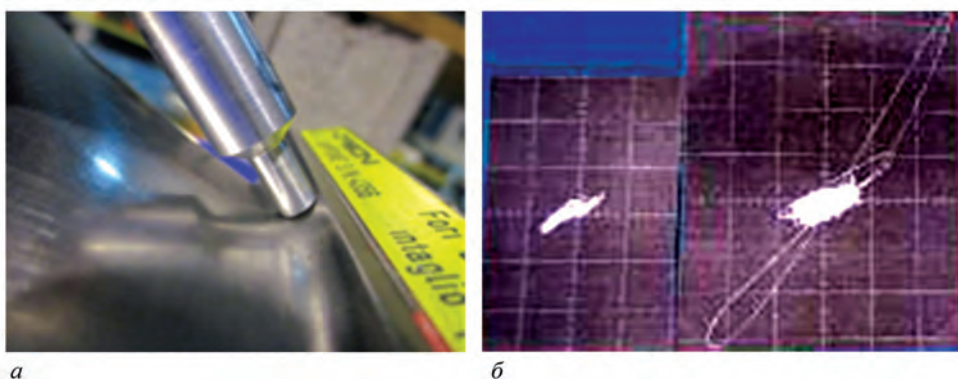


Рис. 11. ВСП, розташований у зоні гальтелі лопатки (а) та сигнали (б) зміни зазору під час сканування бездефектної зони для різної орієнтації ВСП (ліворуч) і сигнал від дефекту (праворуч)



Рис. 12. Експлуатаційний контроль лопаток газової турбіни за допомогою ВСП типу МДФ 0501

0501 на робочій частоті 800 кГц. Сигнали ВСП реєстрували за допомогою ВС дефектоскопа типу ELOTEST 300 (фірма Rohmann GmbH, Німеччина). Наведені на рис. 11, б результати також показують достатньо високий рівень сигналу ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 0501 порівняно з сигналами завад. Спеціальний ВСП подвійного диференціювання з робочим діаметром 5 мм і довгою рукояткою був розроблений для виявлення тріщин у зоні галтелей лопаток газових турбін під час періодичного експлуатаційного ВС контролю (рис. 12).

Виявлення тріщин в отворах газових турбін.

Для виявлення дефектів на бічній стінці отворів газової турбіни було розроблено спеціальну обертову головку з ВСП подвійного диференціювання на основі ротора ELOTEST SR-1 фірми Rohmann GmbH (рис. 13, а). Для відпрацювання методики контролю виготовлено стандартний зразок з отвором діаметром 39 мм, на бічну стінку якого нанесено чотири штучні дефекти типу тріщина завглибшки 0,2; 0,3; 0,5 та 1,0 мм.

На рис. 13, б, в наведено результати, отримані в обертовому режимі на робочій частоті 400 кГц,

із застосуванням стандартного зразка з дефектами без обробки сигналу та з використанням фільтра верхніх частот із частотою зрізу 20 Гц. В обох випадках досягнуто високу чутливість з заглушенням характерних завад, пов'язаних з неоднорідністю магнітних властивостей матеріалу ОК і зміною положення ВСП відносно поверхні під час сканування.

Багатоелементний ВСП для підвищення продуктивності контролю. Контроль великогабаритних конструкцій займає багато часу через малий розмір ВСП, необхідного для чутливої та надійної перевірки. У деяких випадках для підвищення продуктивності контролю використовують ВСП з видовженими зонами чутливості. Але такі ВСП не відповідають вимогам щодо чутливості, що обмежує їх використання. Найкращою продуктивністю можна досягти застосуванням мультиплексних систем контролю на основі матричних ВСП [16, 17]. Але такі системи мають високу вартість і необхідність налаштування для вузлів різних розмірів і форм. Нашою основною метою було створення нового ВСП, що характеризується високою чутливістю та просторовою

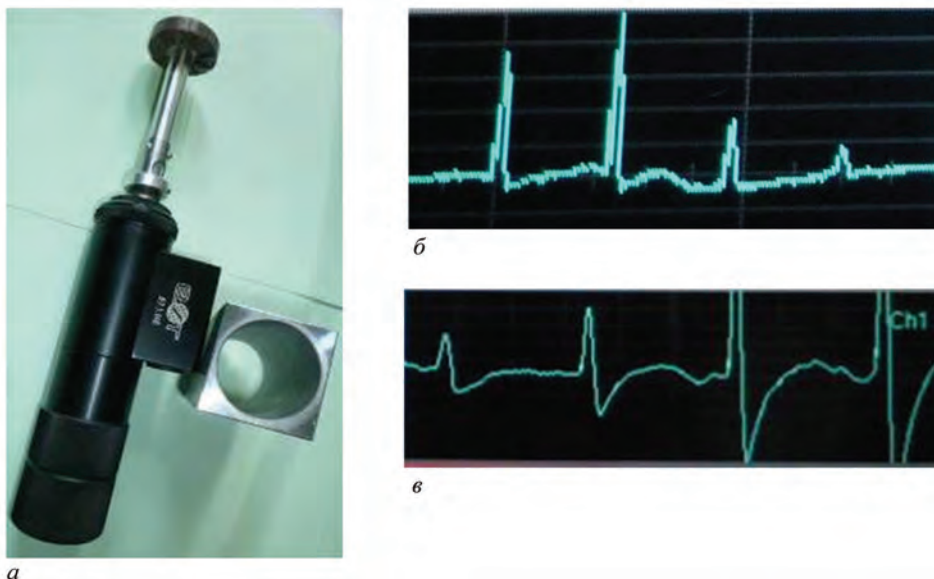


Рис. 13. Ротор ELOTEST SR-1 з ВСП подвійного диференціювання і стандартним зразком (а) та чотири сигнали від дефектів на бічній стінці отвору без обробки сигналу (б) і з використанням фільтру нижніх частот з частотою зрізу 20 Гц (в)

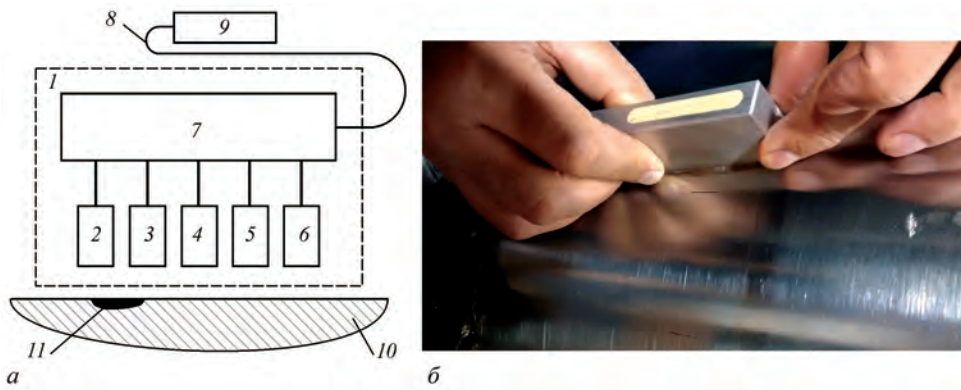


Рис. 14. Схема побудови багатоелементного ВСП для роботи з одноканальними дефектоскопами: 1 – ВСП типу EDDYLINE; 2–6 – комплект окремих ВСП; 7 – вузол комутації; 8 – з’єднувальний кабель; 9 – дефектоскоп; 10 – ОК; 11 – тріщина; п’ятиелементний ВСП типу EDDYLINE 5/12 під час контролю сталевих поковок (б)

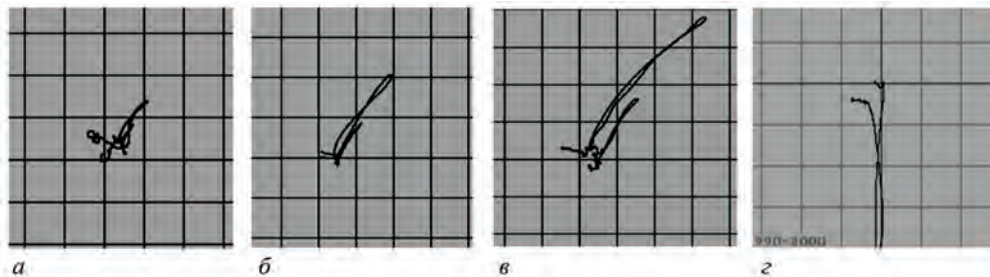


Рис. 15. Сигнали ВСП типу EDDYLINE 5/12 у комплексній площині для одного (а), двох (б) і трьох (в) окремих ВСП від тріщиноподібних дефектів завглибшки 0,1 і 0,2 мм; сигнал від зміни зазору (г)

роздільною здатністю в поєднанні з розширеною зоною контролю та можливістю роботи з порівняно недорогими одноканальними ВС дефектоскопами. Для підвищення продуктивності контролю розроблено п’ятиелементний ВСП типу EDDYLINE 5/12 (Учанін В., Іващенко К. Багатоелементний вихрострумівий перетворювач трансформаторного типу для одноканальних дефектоскопів. Позитивне рішення по заявці на винахід України № 202101949 від 13.04.21). Багатоелементний ВСП складається з п’яти окремих розташованих у ряд ВСП, з’єднаних за допомогою спеціального блоку комутації для підсумовування сигналів окремих ВСП (рис. 14). Усі окремі ВСП реалізовано за схемою подвійного диференціювання для кращого заглушення завад. Завдяки такому з’єднанню досягнуто зону високої чутливості завдовжки ~60 мм. У той же час забезпечено високу локальність контролю, оскільки кожен окремих ВСП працює з тією ж чутливістю, що й до їх включення за запропонованою схемою.

Чутливість розробленого ВСП типу EDDYLINE 5/12 досліджували на зразку, виготовленому з феромагнітної сталі Ст 45, із штучними дефектами типу тріщина завширшки 0,1 мм і завдовжки 30 мм, виконаними електроерозійним методом. Виготовлені дефекти мають різну глибину в діапазоні 0,1...2 мм. На рис. 15, а наведено сигнали ВСП типу EDDYLINE 5/12 від найдрібніших щілин завглибшки 0,1 і 0,2 мм, коли зону дефекту сканували лише одним окремих ВСП, на робо-

чій частоті 200 кГц. У цей час інші чотири ВСП були розташовані поза зразком (у «повітрі»). На рис. 15, а наведено сигнали для тих самих дефектів, коли зону дефекту сканували двома окремих ВСП одночасно. На рис. 15, в показано сигнали дефектів, коли три окремі ВСП сканували зону видовженого дефекту одночасно. Видно (рис. 15, а–в), що сигнали кожного із додаткових окремих ВСП, які проходять над видовженою тріщиною, додаються, збільшуючи амплітуду сигналу відповідно до кількості таких ВСП, тобто ефект можливої взаємної компенсації їх сигналів відсутній. На рис. 15, г для порівняння показано сигнал зазору у комплексній площині, з якого видно, що сигнал зазору і сигнали від дефектів мають протилежний напрямок. Це демонструє можливість надійного розрізнення корисних сигналів, створених дефектами, і завад, створених змінами зазору ВСП під час сканування поверхні ОК.

Багатоелементний ВСП типу EDDYLINE 5/12 успішно використовують в комплекті з одноканальним дефектоскопом типу ELOTEST B300 для контролю поковок із феромагнітної і аустенітної сталі в умовах їх виробництва (рис. 14, б). Проведено також успішні випробування багатоелементних ВСП для ручного контролю валів газових турбін та штоків амортизаторів літаків.

Висновки

Представлено конструкцію запропонованих у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпен-

ка НАН України накладних вихрострумових перетворювачів подвійного диференціювання та проаналізовано особливості їх сигналів, створених дефектами різного типу. Наведено характерні приклади інноваційних методик ВС контролю, заснованих на використанні ВСП подвійного диференціювання, які дозволяють продемонструвати високу чутливість і селективність ВСП подвійного диференціювання до поверхневих і підповерхневих дефектів різного типу та велику глибину контролю, що особливо важливо для виявлення захованих дефектів у внутрішніх шарах багатшарових авіаційних конструкцій. Представлені ВСП можуть бути застосовані в промисловості для ефективного вирішення найскладніших проблем НК.

Список літератури/References

1. Libby, H.L. (1971) *Introduction to Electromagnetic Non-destructive Test Methods*. New-York, etc. Wiley-Interscience.
2. McMaster R.C., VcIntire P. (1986) *Nondestructive Testing Handbook*. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, Flux leakage and Microwave Nondestructive Testing). Second edition. USA, American Society for NDT.
3. 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].
4. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. (1967) *Накладные и экранные датчики*. Новосибирск, Наука, Сибирское отд-ние. Sobolev, V.S., Shkarlet, Yu.M. (1967) *Put-on and screen sensors*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
5. 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 put-on eddy-current transducers*. Moscow, Nauka [in Russian].
6. Sophian, A., Tian, G., Taylor, D., Rudlin, J. (2001) Electromagnetic and eddy current NDT: a review. *Insight*, 43(5), 1–5.
7. Kriezis, E.E., Tsiboukis, T.D., Panas, S.M., Tegopoulos, J. (1992) Eddy Currents: Theory and Applications. *Proc. of the IEEE*, 80(10), 1559–1589.
8. Учанін В.М. (2013) *Вихрострумові накладні перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, Сполум. Uchanin, V.M. (2013) *Eddy-current put-on double differentiation transducers*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
9. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11, 2525–2565. DOI: <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
10. Hagemaijer, D.K. (1985) Eddy-current standard depth of penetration. *Materials Evaluation*, 43(10), 1438–1454.
11. Mottl, Z. (1990) The Quantitative Relations Between True and Standard Depth of Penetration for Air-cored Probe Coils in Eddy-current Testing. *NDT International*, 23(1), 11–18.
12. Uchanin, V. (2022) Eddy current techniques for detecting hidden subsurface defects in multilayer aircraft structures. *Transactions on aerospace research*, 267(2), 69–79. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2022-0011>.
13. Uchanin, V. (2020) Detection of the fatigue cracks initiated near the rivet holes by eddy current inspection techniques. *Transactions on Aerospace Research*, 258(1), 47–58. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2020-0010>.
14. Bachir Bouiadjra, B., Benyahia, F., Albedah, A. et al. (2015) Comparison between composite and metallic patches for repairing aircraft structures of aluminum alloy 7075 T6. *Intern. Journ. of Fatigue*, 80, 128–135.
15. Bona, A. (2019) Theoretical and experimental review of applied mechanical tests for carbon composites with thermoplastic polymer matrix. *Transactions on aerospace research*, 4(257), 55–65. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2019-0023>.
16. Mook, G., Michel, F., Simonin, J. (2008) Electromagnetic imaging using probe arrays. *Proc. of 17th World Conf. on Nondestructive Testing, Shanghai*. www.ndt.net. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.173>.
17. Bureau, J.-F., Ward, R.C., Julien, A. (2012) Application of eddy current array technology to surface inspection. *Proc. of 18th World Conf. on Nondestructive Testing, Durban, South Africa*. www.ndt.net.

SURFACE EDDY CURRENT PROBES OF DOUBLE DIFFERENTIAL TYPE AS AN EFFECTIVE TOOL TO SOLVE NON-DESTRUCTIVE INSPECTION PROBLEMS

V.M. Uchanin

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

A new type of surface eddy current probes of double differential type, which are characterized by increased sensitivity to surface and subsurface defects of various types, is presented. A family of double-differentiation eddy current probes of different diameters with different spatial resolutions has been developed. The paper analyzes the main features of double-differentiation eddy current probes and presents new innovative inspection techniques which allow solving the most complex problems of non-destructive testing. In particular, the developed eddy current probes have been researched and tested as an effective tool of inspection of multi-layered aircraft structures, in which it is necessary to detect internal defects. They provide, in particular, the detection of cracks in the second layer of stratified aircraft structures or cracks on the back surface of the aircraft structures skin; detection of subsurface defects in the weld zone with a rough surface; detection of cracks through repair patches made of aluminum alloy or carbon composite; detection of subsurface cracks near rivet holes, etc. These techniques create unique opportunities for timely detection of dangerous damage without disassembling the inspected object or removing the protective coating. The developed eddy current probes are effective for detecting cracks in ferromagnetic steel products such as forgings, gas turbine blades and shafts, rails, wheels or axles of railway rolling stock, rough-surfaced castings, etc. In addition, high sensitivity to defects can be achieved even during the inspection through an air gap or dielectric coating. This allows them to be successfully used in many automated inspection systems. 17 Ref., 15 Fig.

Keywords: nondestructive testing, eddy current probe of double-differential type, stratified aircraft structure, subsurface defect, repair patches, rivet hole

Надійшла до редакції 23.12.2022