

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ШАРУ ПІДСИЛЕНОГО ВУГЛЕЦЕВИМ ВОЛОКНОМ ПЛАСТИКУ НА МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЯХ

В.М. Учанін<sup>1</sup>, О.Г. Алещенко<sup>1</sup>, А. Савін<sup>2</sup>, В.Я. Дереча<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 79060, м. Львів, вул. Наукова 5. E-mail: [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

<sup>2</sup>Nondestructive Testing Department, National Institute of Research and Development for Technical Physics, Iasi, Romania.

E-mail: [asavin@phys-iasi.ro](mailto:asavin@phys-iasi.ro)

<sup>3</sup>ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Мрії 1.

Досліджено можливість безконтактного вимірювання шару підсиленого вуглецевим волокном пластику (ПВВП) на конструкціях із немагнітного алюмінієвого сплаву та феромагнітної сталі вихрострумним методом. Дослідження проводилося за допомогою плоских зразків із алюмінієвого сплаву Д16Т і феромагнітної сталі Ст20, на які щільно наклали набір пластин завтовшки 1 мм із ПВВП, кількістю яких моделювали різну товщину шару ПВВП. Досліджували вихрострумні перетворювачі (ВСП) параметричного типу у вигляді обмоток з 300 і 600 витків на феритовому осерді діаметром 8 мм (відносна магнітна проникність – 600). Вихідну напругу ВСП досліджували у резонансному режимі на робочих частотах 5; 8,5 і 20 кГц. Отримані залежності напруги на резонансному контурі від товщини ПВВП стали основою для створення приладу для безконтактного вимірювання товщини ПВВП на виробках із алюмінієвих сплавів у діапазоні товщин до 12 мм і феромагнітної сталі у діапазоні товщин до 15 мм. Можливість вимірювання шару ПВВП на металевих конструкціях є актуальною для неруйнівного контролю їх якості під час виробництва, а також для моніторингу цілісності таких шаруватих конструкцій під час експлуатації. Експлуатаційний моніторинг передбачає попереднє визначення товщини шару ПВВП у реперних точках з метою подальшого використання в якості референсних значень. Збільшення результатів вимірювання товщини шару ПВВП у процесі моніторингу в реперних точках відносно референсних значень буде свідчити про утворення розшарувань на межі «метал–ПВВП» або між окремими шарами ПВВП під час експлуатації. Бібліогр. 17, рис. 4.

*Ключові слова: підсилений вуглецевим волокном пластик, алюмінієвий сплав, феромагнітна сталь, вихрострумний перетворювач, вимірювання товщини, резонансний режим, робоча частота*

**Вступ.** Композиційні матеріали (КМ) знаходять широке застосування для створення сучасних конструкцій, зокрема в авіаційній і космічній промисловості, суднобудуванні, автомобілебудуванні, що дозволяє суттєво зменшити вагу конструкцій без втрати несучої здатності й надійності та скоротити витрати палива [1, 2]. КМ почали розроблятися у 50-х роках минулого століття для заміни металевих конструкційних сплавів. Основна мета полягала у поєднанні двох і більше складових з різними фізичними властивостями для досягнення характеристик, які не властиві кожному матеріалу окремо. Слід зазначити, що об'єм використання деталей із КМ в авіаційній та космічній галузі постійно зростає. Зокрема, на ДП «Антонов» КМ використано в конструкціях літаків АН-26, АН-28, АН-32, АН-70, АН-71, АН-72, АН-74, АН-124 і АН-225 [3]. Відомі лідери літакобудування Boeing, Airbus та Saab АВ створюють літаки, кількість КМ різного типу в яких за вагою досягає 60 %. Окреме місце займають волокнисті КМ, в яких використовують

різні матриці у поєднанні з волокнистим наповнювачем. Це можуть бути склопластики, які можна вважати діелектриками, оскільки вони складаються із скловолокна та матриці на основі епоксидної смоли. Широко розповсюдженим КМ є підсилений вуглецевим волокном пластик (ПВВП), який складається з вуглецевих волокон і полімерної матриці (Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite) [4–6]. Вони можуть бути багатшаровими з різною орієнтацією (наприклад, 0°, 45°, 90°) вуглецевих волокон у різних шарах. ПВВП є чи не ідеальним матеріалом для створення літаків, оскільки їх міцність порівнюють зі сталлю за питомою вагою приблизно удвічі меншою, ніж у алюмінієвих авіаційних сплавів. Властивості такої багатшарової структури поєднують високу міцність вуглецевих волокон з пружністю матричного наповнювача. Загалом ПВВП мають унікальні властивості, до яких, крім вищезгаданих, можна додати низький коефіцієнт термічного розширення, високу демпфувальну здатність та корозійну стій-

Учанін В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>, Савін А. – <https://orcid.org/0000-0001-9863-3110>,

Дереча В.Я. – <https://orcid.org/0000-0003-1773-912X>

© В.М. Учанін, О.Г. Алещенко, А. Савін, В.Я. Дереча, 2025

кість [7]. ПВВП мають також високу стійкість до циклічних навантажень, але краще працюють за одновимірних навантажень. Це, крім усього іншого, спонукає до поєднання ПВВП з традиційними металами [8], оскільки конструкції літаків піддаються складнішим тривимірним навантаженням.

З поширенням КМ зростає необхідність створення нових технологій неруйнівного контролю (НК), оскільки існуючі методи та засоби НК не завжди дозволяють вирішити відповідний комплекс нових задач [9, 10]. Проблеми НК виникають через різноманітність пошкоджень і дефектів, які властиві тільки КМ і суттєво відрізняються від тих, що характерні для традиційних матеріалів. До таких характерних дефектів ПВВП можна віднести погану адгезію між компонентами, що призводить до розшарувань різного типу, порушення орієнтації волокон у різних шарах тощо.

Загалом ПВВП можна віднести до гетерогенних структур, що складаються щонайменше з двох однорідних складових (вуглецеве волокно та полімерна матриця), які мають виражені поверхні розділу та суттєво відрізняються за електрофізичними властивостями. Стосовно вихрострумowego методу важливо, що полімерна матриця є діелектриком, а вуглецеве волокно має достатньо високу питому електричну провідність (ПЕП). Крім того, волокниста структура ПВВП створює різну ПЕП у різних напрямках, тобто існує щонайменше одновісна анізотропія ПЕП, яка у різних шарах може відрізнитися через різний напрямок вуглецевих волокон. Тут доречно використовувати запропонований нами підхід, який полягає у введенні для гетерогенних матеріалів поняття ефективного середовища, теорія властивостей яких знаходиться на стадії створення. Для ПВВП можна використати наближення ефективного середовища, коли гетерогенний матеріал (ПВВП) будемо умовно вважати гомогенним (однорідним) з ефективною ПЕП, яка залежить від кількісного складу компонентів. Можна припустити, що ефективна ПЕП, враховуючи різну ПЕП і анізотропію ПЕП компонентів ПВВП, буде суттєво більшою, ніж у полімерної матриці, але меншою, ніж у вуглецевого волокна. Наближення ефективного середовища використовувалося нами для дослідження можливості визначення вмісту міді в мідних рудах, де гетерогенність матеріалу обумовлена низькою ПЕП діориту (вміщуюча порода) і халькогеніту (мідного колчедану), який має суттєво вищу ПЕП [11]. Поняття ефективною ПЕП використано нами також для аналізу впливу анізотропії ПЕП на сигнал вихрострумowego перетворювача (ВСП) з круговими обмотка-

ми [12]. Підхід ефективного середовища і термін «ефективна коерцитивна сила» використано й для дослідження параметрів петлі магнітного гістерезису шаруватих об'єктів, що складаються з шарів з різними магнітними характеристиками [13].

Останнім часом виникла проблема вимірювання товщини шару ПВВП на металевих конструкціях, яка важлива не тільки для НК подібних шаруватих конструкцій під час виробництва. Перспективним завданням є проведення моніторингу цілісності ПВВП під час експлуатації конструкцій, яке пов'язане з можливим утворенням розшарування як на межі ПВВП з металевою основою, так і всередині ПВВП. Відомі методи вимірювання товщини ПВВП не дозволяють розв'язати цю задачу. На перший погляд, задача виглядає подібною до задачі вимірювання товщини діелектричних покриттів. Але відомі вихроструміві товщині діелектричних покриттів непридатні для вимірювання товщини ПВВП через його порівняно велику ПЕП і, відповідно, швидке загасання вихрових струмів на використаних робочих частотах [14, 15]. Ідея вирішення задачі вимірювання шару ПВВП на металевій основі полягає у зменшенні робочої частоти, коли ПВВП стає «прозорим» і його ПЕП не буде суттєво впливати на глибину проникання вихрових струмів.

**Мета роботи** – дослідження можливості вимірювання товщини ПВВП на конструкціях і виробках із алюмінієвого сплаву та феромагнітної сталі на основі використання ВСП параметричного типу в резонансному режимі; визначення оптимальні робочі частоти та діапазону вимірювання, необхідних для створення відповідного приладу.

**Параметри досліджуваного ВСП, методика дослідження, дослідницькі зразки.** Для дослідження використано резонансний режим вихрострумowego контролю, який передбачає включення ВСП у послідовний або паралельний коливальний контур зі збудженням від зовнішнього генератора [15–17]. Важливо, що це дозволяє виділити інформаційну складову зміни імпедансу ВСП з відлаштуванням від впливу неконтрольованого параметра  $P_3$ , що розглянемо на прикладі включення ВСП у послідовний коливальний контур, варіант якого наведено на рис. 1. Ємність та опір резонансного контура вибирають такою, щоб вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  не залежала від змін неконтрольованого параметра  $P_3$ .

Діаграму повного імпедансу робочого контура під час встановлення ВСП на немагнітний об'єкт контролю (ОК) з певним початковим значеннями

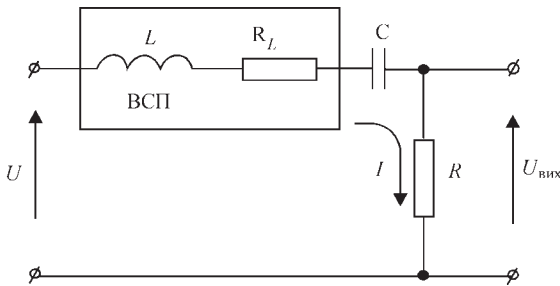


Рис. 1. Схема включення ВСП параметричного типу в послідовний коливальний контур

параметрів імпедансу ВСП (точка  $P_0$ ) наведено на рис. 2.

На діаграмі (рис. 2) показано внесок кожної зі складових у формування вектора повного імпедансу послідовного контура (точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $P_0$ ). Значення опору резистора  $R$  та ємності конденсатора  $C$  і, відповідно, його реактивного опору вибирають такими, щоб вектор повного імпедансу  $Z_0$  утворював прямий кут з дотичною  $TT'$  до лінії впливу неконтрольованого параметра  $P_3$  у точці  $P_0$ . У цьому випадку зміна параметра  $P_3$  у певних межах (точка  $D$ ) практично не викликає зміни модуля імпедансу контура. У той же час зміна контрольованого параметра  $P_K$  (перехід у точку  $E$ ) суттєво впливає на його модуль. За умови постійної амплітуди вхідної напруги та параметрів елементів контура, амплітуда вихідної напруги визначається тільки модулем імпедансу контура. Тому вона буде мало змінюватися за змін неконтрольованого параметра  $P_3$ , але одночасно буде суттєво залежати від контрольованого параметра  $P_K$ . Аналогічні можливості щодо

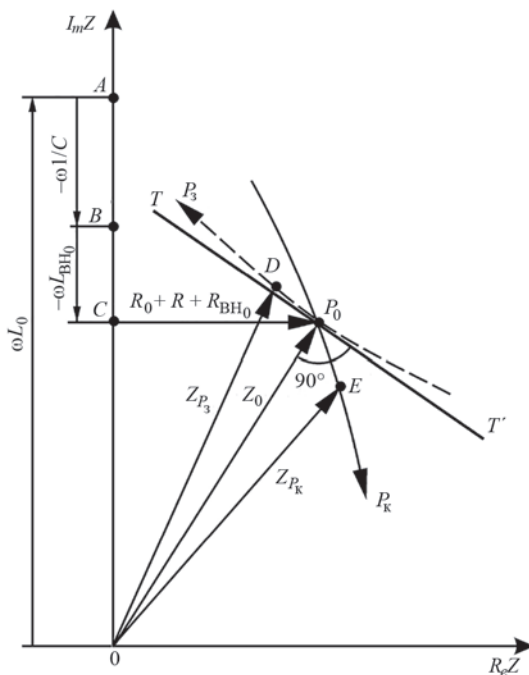


Рис. 2. Впливи контрольованого  $P_K$  та неконтрольованого  $P_3$  параметрів на діаграмі комплексних опорів ВСП

відлаштування від неконтрольованого параметра можна отримати також при включенні ВСП у паралельний коливальний контур.

Для дослідження виготовлено два ВСП параметричного типу: один з обмоткою з 300 витків, намотаних дротом діаметром 0,09 мм, інший – з обмоткою з 600 витків. В обох ВСП обмотки встановлено на кінці феритового осердя діаметром 8 мм завдовжки 40 мм. Відносна магнітна проникність матеріалу осердя – 600. Зовнішні діаметри обмоток ВСП – 9,5 і 11 мм відповідно, довжина обмоток – 8 мм. Індуктивності ВСП при розташуванні їх у «повітрі» (на відстані від електропровідного матеріалу) складали 5,2 мГн (ВСП з 300 витків) і 15 мГн (ВСП з 600 витків).

Дослідження проводили за допомогою плоского прямокутного зразка завтовшки 3 мм розмірами 10×10 мм із алюмінієвого сплаву Д16Т та аналогічного зразка з вуглецевої сталі Ст20 завтовшки 2 мм. Під час досліджень на металеві зразки щільно накладали набір плоских пластин із ПВВП, які надані ДП «АНТОНОВ». Товщина кожної пластини – 1 мм. Різну товщину шару ПВВП імітували різною кількістю пластин (від 1 до 15). Дослідження змін вихідної напруги резонансного контура із шаром ПВВП на алюмінієвому сплаві проводили на робочих частотах 5; 8,5 і 20 кГц. Вплив товщини шару ПВВП на феромагнітній сталі Ст20 досліджували на робочій частоті 5 кГц.

**Аналіз отриманих результатів.** На рис. 3, а наведено залежність вихідної напруги  $U$  на резонансному контурі від товщини  $h_c$  шару ПВВП на металевому зразку із алюмінієвого сплаву на робочих частотах 5; 8,5 і 20 кГц. На рис. 3, б наведено залежність чутливості  $S_{hc}$  вихідної напруги від товщини  $h_c$  шару ПВВП, яку оцінювали як різницю амплітуд вихідної напруги за збільшення товщини шару ПВВП на 1 мм у різних частинах діапазону.

Наведені результати (рис. 3) демонструють принципову можливість вимірювання товщини шару ПВВП у діапазоні до 12 мм на конструкціях із алюмінієвих сплавів вихрострумовим методом на вибраних робочих частотах. Амплітуди вихідної напруги зростають зі збільшенням товщини  $h_c$  на досліджуваних робочих частотах, асимптотично наближуючись до значень вихідної напруги під час розміщення ВСП у «повітрі», які мають значення 3,27; 6,95 і 8,1 В для робочих частот 5; 8,5 і 20 кГц відповідно. Видно, що швидкість зростання обернено пропорційна значенню товщини  $h_c$  ПВВП, що підтверджується відповідними залежностями чутливості  $S_{hc}$  на рис. 3, б, форму яких можна вважати близькими до експоненти. При

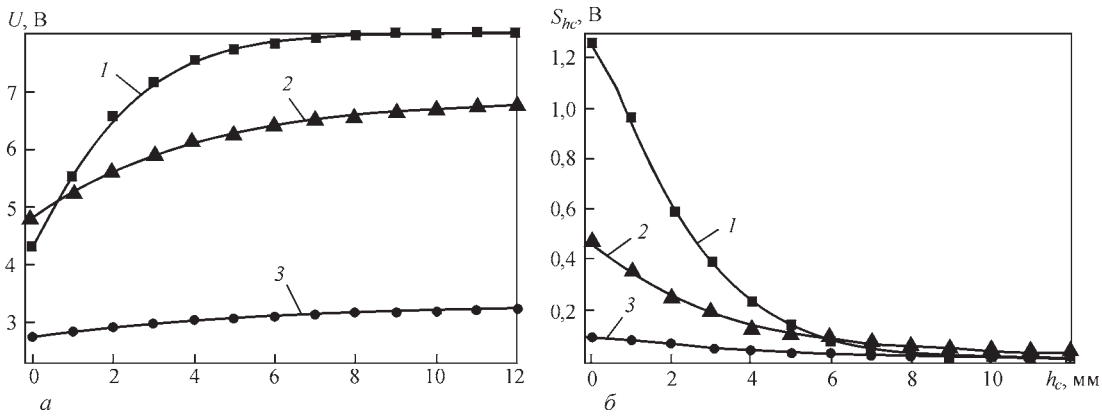


Рис. 3. Залежність вихідної напруги  $U$  і відповідні залежності чутливості  $S_{hc}$  від товщини  $h_c$  шару ПВВП для зразка із алюмінієвого сплаву на робочих частотах: 1 – 20 кГц, 2 – 8,5 кГц, 3 – 5 кГц

цьому на робочій частоті 20 кГц отримано максимальні зміни вихідної напруги (від 4,29 до 8,04 В) при збільшенні товщини ПВВП від нульового значення до 12 мм. Для менших робочих частот відповідні зміни напруги є суттєво меншими: від 2,74 до 3,27 В на частоті 5 кГц і від 4,78 до 6,78 В на частоті 8,5 кГц. Таким чином, робочу частоту 20 кГц можна вважати оптимальною для вимірювання товщини ПВВП на конструкціях із алюмінієвих сплавів, тим більше, що й чутливість на цій робочій частоті є найбільшою, особливо на початковій ділянці в діапазоні змін товщини ПВВП.

На рис. 4, а наведено залежність вихідної напруги  $U$  на резонансному контурі від товщини  $h_c$  шару ПВВП на зразку зі сталі Ст20 на робочій частоті 5 кГц, а на рис. 4, б – відповідну залежність чутливості  $S_{hc}$  вихідної напруги від товщини  $h_c$  шару ПВВП на сталі Ст20.

Наведені на рис. 4 результати також демонструють можливість вимірювання товщини шару ПВВП на конструкціях із феромагнітної сталі на робочій частоті 5 кГц. Тут можливий діапазон вимірювання товщини ПВВП досягає 15 мм, що можна пояснити сильнішим впливом феромагнітної сталі на індуктивність ВСП. Видно, що за-

лежності на рис. 3, а і рис. 4, а є симетричними відносно горизонтальної осі. Але, на відміну від попередніх залежностей для немагнітного алюмінієвого сплаву, тут амплітуда вихідної напруги зі збільшенням товщини  $h_c$  зменшується за законом, близьким до експоненціального, асимптотично наближаючись до значення 3,25 В, що відповідає вихідній напрузі під час розміщення ВСП у «повітрі». Це легко пояснюється протилежним впливом немагнітного та феромагнітного металу на зміну індуктивності ВСП. За наближення ВСП до немагнітного металу його індуктивність зменшується і, навпаки, індуктивність ВСП збільшується при взаємодії з феромагнітним об'єктом. Швидкість зменшення вихідної напруги обернено пропорційна значенню товщини  $h_c$  ПВВП у всьому діапазоні товщин, що підтверджується відповідними кривими чутливості  $S_{hc}$  на рис. 4, б. Нагадаємо, що ця властивість пропорційності між швидкістю зміни величини та самою величиною є характерною для експоненціальної залежності. Очевидно, що таку нелінійність отриманих на рис. 3, а, б залежностей необхідно врахувати під час розроблення резонансного приладу для вимірювання товщини шару

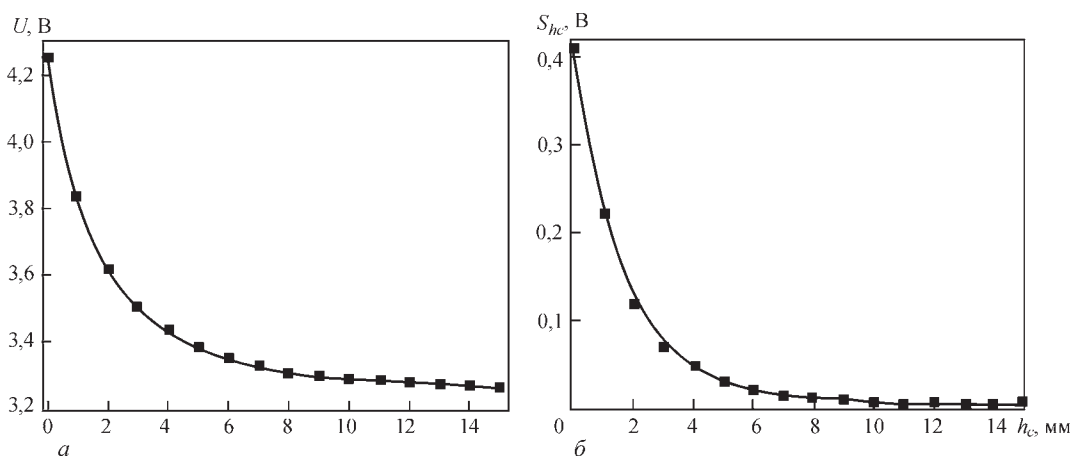


Рис. 4. Залежність вихідної напруги  $U$  (а) і відповідні залежності чутливості  $S_{hc}$  (б) від товщини  $h_c$  шару ПВВП для зразка із феромагнітної сталі Ст20 на робочій частоті 5 кГц

ПВВП на металевих конструкціях шляхом введення блоку лінеаризації.

## Висновки

Вихрострумовий метод забезпечує можливість безконтактного вимірювання товщини шару ПВВП на металевих конструкціях із немагнітних алюмінієвих сплавів у діапазоні товщин до 12 мм і феромагнітних сталей у діапазоні товщин до 15 мм. Отримані залежності напруги на резонансному контурі від товщини ПВВП буде використано для розроблення експериментального зразка приладу для безконтактного вимірювання товщини шару ПВВП на металевих конструкціях.

Вимірювання шару ПВВП на металевих конструкціях актуальне не тільки для НК якості шаруватих конструкцій типу «метал–ПВВП» під час виробництва. Авторами запропоновано підхід щодо використання розробленого методу для моніторингу цілісності шаруватих конструкцій «метал–ПВВП» під час їх експлуатації, який передбачає попереднє визначення товщини шару ПВВП у реперних точках для використання в якості референсних значень. Збільшення результатів вимірювання товщини шару ПВВП у процесі експлуатаційного моніторингу в реперних точках відносно наперед визначених референсних значень буде свідчити про утворення розшарувань на межі «метал–ПВВП» або між окремими шарами ПВВП.

## Список літератури

1. Pezzuti, E., Donnici, G. (2014) Structural composites for aircraft design. *ARPN J. of Engineering and Applied Sciences*, 9(10), 1889–1898.
2. Кондратьев А.В., Коваленко В.А. (2011) Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов (Сборник научных трудов)*. Харків, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», 3(67), 7–18.
3. Кива Д. (2014) Этапы становления и начала развернутого применения полимерных композиционных материалов в конструкциях пассажирских и транспортных самолетов (1970–1995 гг.). *Авиационно-космическая техника и технология*, 6, 5–16.
4. Ozkan, D., Gok, M.S., Karaoglanli, A.C. (2020) Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Adv. Struct. Mater.*, 124, 235–253. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4_20)
5. Othman, R., Ismail, N.I., Pahmi, M.A.A.H. et al. (2018) Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: A review. *J. Mech. Manuf.*, 1, 144–154.
6. Wisnom, M.R. (1992) On the high compressive strains achieved in bending tests on unidirectional carbon-fibre/epoxy. *Composites Science and Technology*, 43(3), 229–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(92\)90093-1](https://doi.org/10.1016/0266-3538(92)90093-1)
7. (2011) *Machining technology for composite materials: principles and practice*. H. Hocheng ed. Elsevier Science.
8. Pramanik, A., Basak, A., Dong, Y. et al. (2017) Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 1–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007>

9. Savin, A., Steigmann, R., Stanciu M.D., Moraras C.I., Dobrescu G. (2024) Evaluation of the mechanical characteristics of CFRP composites and modeling of the delamination phenomenon. *The Paton Welding J.*, 12, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.12.05>
10. Шарабура О.М., Муравський Л.І., Кудь О.Г. (2024) Виявлення круглих підповерхневих дефектів у шаруватих композиціях за допомогою оптико-акустичної системи неруйнівного контролю. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 18–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.04.03>
11. Учанін В.М. Рибачук В.Г. (2022). Дослідження можливості вихрострумового контролю слабопровідних гетерогенних середовищ. *Відбір та обробка інформації*, 50(126), 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2022.50.005>
12. Rybachuk, V.H., Uchanin, V.M., Kulynych, Y.P. (2022) Specific features of testing of anisotropic nonmagnetic materials by eddy-current probes with circular windings. *Materials Science*, 57, 452–458. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00565-2>
13. Rybachuk, V.G., Uchanin, V.M. (2023) A recurrent formula for determination of the effective coercive force in layered ferromagnetic materials. *Materials Science*, 58, 533–539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00695-1>
14. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. (1978) *Индукционная толщинометрия*. М., Энергия.
15. (1986) *Неразрушающий контроль металлов и изделий: Справочник* (ред. Г.С. Самойлович). М., Машиностроение.
16. Полулях К.С. (1980) *Резонансные методы измерений*. М., Энергия.
17. Арш Э.И. (1979) *Автогенераторные методы и средства измерений*. М., Машиностроение.

## References

1. Pezzuti, E., Donnici, G. (2014) Structural composites for aircraft design. *ARPN J. of Engineering and Applied Sci.*, 9(10), 1889–1898.
2. Kondratiev, A.V., Kovalenko, V.A. (2011) Review and analysis of world tendencies and problems of expansion of application of polymer composite materials in the units of rocket-space technology. In: *Collect. of Design and Production of Flying Vehicle Structures*. Kharkiv, KhAI, 3(67), 7–18 [in Russian].
3. Kiva, D. (2014) Stages of formation and beginning of the deployed application of polymer composite materials in passenger and transport aircraft structures (1970–1995). *Aviatsyonno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, 6, 5–16 [in Russian].
4. Ozkan, D., Gok, M.S., Karaoglanli, A.C. (2020) Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Adv. Struct. Mater.*, 124, 235–253. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4_20)
5. Othman, R., Ismail, N.I., Pahmi, M.A.A.H. et al. (2018) Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: A review. *J. Mech. Manuf.*, 1, 144–154.
6. Wisnom, M.R. (1992) On the high compressive strains achieved in bending tests on unidirectional carbon-fibre/epoxy. *Composites Sci. and Technol.*, 43(3), 229–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(92\)90093-1](https://doi.org/10.1016/0266-3538(92)90093-1)
7. (2011) *Machining technology for composite materials: Principles and practice*. Ed. by H. Hocheng. Elsevier Science.
8. Pramanik, A., Basak, A., Dong, Y. et al. (2017) Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review. *Composites: Pt A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 1–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007>
9. Savin, A., Steigmann, R., Stanciu, M.D., Moraras, C.I., Dobrescu, G. (2024) Evaluation of the mechanical characteristics of CFRP composites and modeling of the delamination phenomenon. *The Paton Welding J.*, 12, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.12.05>
10. Sharabura, O.M., Muravsky, L.I., O.G., Kuts, O.G. (2024) Detection of circular subsurface defects in laminated composites using optical-acoustic nondestructive testing system. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 4, 18–22 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.04.03>
11. Uchanin, V.M., Rybachuk, V.G. (2022) Possibility of eddy current testing of low-conductive heterogeneous media. *Vidbir ta Obrobka Informatsii*, 50(126), 5–12 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2022.50.005>

12. Rybachuk, V.H., Uchanin, V.M., Kulynych, Y.P. (2022) Specific features of testing of anisotropic nonmagnetic materials by eddy-current probes with circular windings. *Mater. Sci.*, **57**, 452–458 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00565-2>

13. Rybachuk, V.G., Uchanin, V.M. (2023) A recurrent formula for determination of the effective coercive force in layered ferromagnetic materials. *Mater. Sci.*, **58**, 533–539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00695-1>

14. Dorofeev, A.L., Nikitin, A.Y., Rubin, A.L. (1978) *Induction thickness measurement*. Moscow, Energiya [in Russian].

15. (1986) *Non-destructive testing of metals and products: Handbook*. Ed. by G.S. Samoilovich. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

16. Polulyakh, K.S. (1980) *Resonant measurement methods*. Moscow, Energiya [in Russian].

17. Arsh, E.I. (1979) *Autogenerator methods and measuring instruments*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

## RESEARCH OF THE EDDY-CURRENT RESONANCE METHOD FOR MEASURING THE THICKNESS OF THE CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC LAYER ON METALLIC STRUCTURES

V.N. Uchanin<sup>1</sup>, O.G. Aleschenko<sup>1</sup>, A. Savin<sup>2</sup>, V.Ja. Derecha<sup>3</sup>

<sup>1</sup>G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

<sup>2</sup>Nondestructive Testing Department, National Institute of Research and Development for Technical Physics, Iasi, Romania.

E-mail: [asavin@phys-iasi.ro](mailto:asavin@phys-iasi.ro)

<sup>3</sup>SE «ANTONOV». 1 Mrija Str., 03062, Kyiv, Ukraine

The possibility of non-contact measurement of a carbon fiber reinforced plastic (CFRP) layer on structures made of non-magnetic aluminum alloy and ferromagnetic steel by the eddy current method in resonance mode was investigated. The research was carried out using flat specimens made of aluminum alloy D16T and ferromagnetic steel St20, on which a set of 1 mm thick flat plates made of CFRP were tightly laid. Investigated parametric type eddy current probes (ECP) have windings with 300 and 600 turns installed on an 8 mm diameter ferrite core (magnetic permeability – 600). The ECP output voltages were investigated in the resonant mode at operating frequencies of 5, 8,5 and 20 kHz. The obtained dependences of the output voltage on the thickness of the CFRP layer became the basis for development of a device for non-contact measurement of the CFRP layer thickness on products and structures made of aluminum alloys in the range of thicknesses up to 12 mm and ferromagnetic steel in the range of thicknesses up to 15 mm. The ability to measure the CFRP layer on metal structures is relevant not only for non-destructive inspection of their quality during production, but also for monitoring the integrity of such layered structures during their operation. Operational monitoring envisages preliminary determination of the thickness of CFRP layer in the reference points with the purpose of their further use as reference values. An increase in the results of measuring the thickness of the CFRP layer in the reference points during monitoring relative to the reference values will indicate the formation of delamination at the «metal–CFRP» boundary or between individual CFRP layers in operation.

*Keywords: carbon fiber reinforced plastic, aluminum alloy, ferrous steel, eddy current probe, thickness measurement, resonant mode, operating frequency*

Отримано 07.04.25

Отримано у переглянутому вигляді 17.04.25

Прийнято 12.05.25

### ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.				
	місяць	два місяця	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-2374 (Print). ISSN 3041-234X (Online). Передплатний індекс 70031	–	300	–	900	1800
«Сучасна електromеталургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-238 (Print). ISSN 3041-2331 (Online). Передплатний індекс 70693	–	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2366 (Print). ISSN 3041-2358 (Online). Передплатний індекс 74475	–	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X (Print). ISSN 3041-2293 (Online). Передплатний індекс 21971.	600	1200	1800	3600	7200

\*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

\*\* Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електromеталургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр», «Меркурій» та у видавництвах. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

*Передплата на електронну версію журналів.* Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf. На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 рр.

#### Адреса видавництва

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90

E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua); [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)