УДК 620.179.16: 620.179.17 DOI: https://doi.org/10.37434/tdnk2025.01.04

ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ІЗ КОМБІНОВАНИМ НАМАГНІЧУВАННЯМ

Г.М. Сучков, С.Ю. Плєснецов, М.Е. Кальницький, Ю.Ю. Кошкаров, І.М. Олексенко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.
E-mail: suchkov@gmail.com

Застосування в промисловості методів і засобів збудження ультразвукових імпульсів поперечних хвиль за допомогою електромагнітно-акустичних перетворювачів знаходить все більше застосування. Проте перетворювачі на основі постійних потужних магнітів мають недоліки, які полягають у сильному їх притяганні до феромагнітних виробів і в налипанні феромагнітних часток, що призводить до спотворення результатів неруйнівного контролю та зниження чутливості. З часом поступово такі магніти втрачають свої магнітні властивості. Відомі перетворювачі з імпульсним намагнічуванням можуть працювати з незначними частотами зондування з-за нагрівання. Запропоновано використати одночасно постійні магніти з відносно невеликою індукцією магнітного поля і додаткове імпульсне намагнічування. Таке технічне рішення підвищує чутливість контролю та значно знижує притягання перетворювача до феромагнітного виробу, а також дає можливість суттєво збільшити частоту зондування об'єкта контролю. Бібліогр. 16, рис. 5.

Ключові слова: феромагнітний виріб, неруйнівний контроль, ультразвукові імпульси, електромагнітно-акустичний перетворювач, магнітне поле, імпульсне намагнічування

Вступ. Для неруйнівного контролю металовиробів, найчастіше феромагнітних, часто використовують імпульси ультразвукових хвиль [1]. При традиційному контролі з використанням контактної рідини з поверхні об'єктів необхідно видаляти іржу, фарбу, бруд тощо [1–3], що призводить до значних матеріальних втрат. Проблему дозволяє вирішити використання електромагнітно-акустичного (ЕМА) способу збудження та прийому ультразвукових імпульсів [2, 4–6], для якого нема потреби у спеціальному зачищенні поверхні металовиробів, таких як труби, листи, заготовки тощо.

Відомо, що чутливість ЕМА способу збудження та прийому ультразвукових імпульсів квадратично залежить від величини індукції магнітного поля [4–5]. Тому багато фахівців розроблюють ЕМА перетворювачі (ЕМАП) із джерелами магнітного поля великої потужності [7]. Проте виникає протиріччя. З однієї сторони, чутливість ЕМАП зростає, а з іншої – суттєво збільшується сила притягання ЕМАП до об'єкта контролю (ОК), виготовленого з феромагнітного матеріалу. Окрім того, на ЕМАП налипають відлущені феромагнітні частки, наприклад окалина, що призводить до формування потужних завад [8]. Для виключення вказаних недоліків багато дослідників пропонують використовувати імпульсні джерела магнітного поля [9–16], які мають можливість отримати потужне магнітне поле при струмах живлення імпульсних магнітів 2...3 кА. Але котушки імпульсного джерела швидко нагріваються [9], що не дає можливості виконувати дефектоскопію та товщинометрію ОК із необхідною частотою зондування металовиробу.

У даній роботі наведено результати вдосконалення ЕМАП шляхом використання постійного магніту невеликої потужності та імпульсного намагнічування при живленні котушок джерела магнітного поля силою струму меншою, ніж 2 кА. Такий підхід дозволяє значно зменшити вищевказані недоліки відомих ЕМАП.

Мета досліджень – порівняльний аналіз чутливості ЕМАП із комбінованим намагнічуванням.

ЕМАП із комбінованим намагнічуванням і методика його дослідження. Розглянемо як приклад суміщений ЕМАП для збудження та прийому імпульсів ультразвукових зсувних хвиль у феромагнітному металовиробі нормально до його поверхні. Основу ЕМАП, що пропонується, складає джерело магнітного поля (ДМП), яке можливо відобразити так, як це наведено на рис. 1. У найпростішому варіанті це постійний магніт та котушка імпульсного намагнічування.

Очевидно, що елементи ДМП повинні відповідати низці вимог: матеріал постійного магніту повинен бути стійким до нагрівання та мати низьку електропровідність; розміри постійного магніту повинні забезпечувати переважну орієнтацію вектора індукції магнітного поля нормально до поверхні ОК (перетин полюса магніту повинен знаходитися в інтервалі 30×30...50×50 мм^2, висота 50...60 мм [9]) і заданою робочою зоною дії магніту, що перекриває робочу зону високочастотної

Сучков Г.М. – https://orcid.org/0000-0002-1805-0466, Плєснецов С.Ю. – https://orcid.org/0000-0001-8428-5426,
Кошкаров Ю.Ю. – https://orcid.org/0000-0003-1430-0154, Олексенко І.М. – https://orcid.org/0009-0007-9302-1300
© Г.М. Сучков, С.Ю. Плєснецов, М.Е. Кальницький, Ю.Ю Кошкаров, І.М. Олексенко, 2025

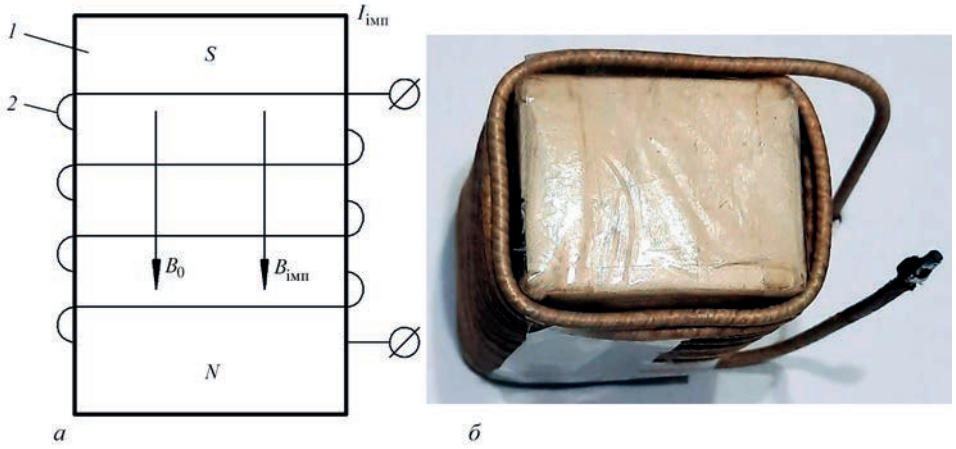

Рис. 1. Спрощене зображення джерела магнітного поля, вектор індукції якого орієнтується нормально до поверхні феромагнітного металовиробу: конструкція ДМП (*а*) та його зображення (*б*); *1* – постійний магніт; *2* – котушка імпульсного намагнічування; B_0 – величина індукції магнітного поля, що створена у котушці імпульсного намагнічування; $B_{імп}$ – величина індукції імпульсного магнітного поля

котушки індуктивності [4]; котушка імпульсного намагнічування повинна мати мінімальну індуктивність, що необхідно для формування короткого імпульсу намагнічування.

Спрощений макет суміщеного ЕМАП на базі джерела магнітного поля з комбінованим намагнічуванням може бути виконано наступним чином (рис. 2). Стрілками в об'ємі феромагнітного електропровідного металовиробу показані напрямки поширення ультразвукових імпульсів.

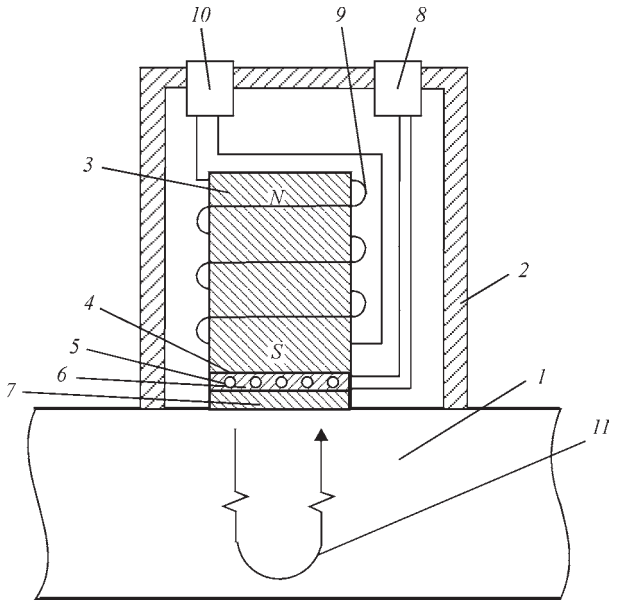

Рис. 2. Спрощена конструкція ЕМАП із постійним та імпульсним намагнічуванням: *1* – феромагнітний електропровідний металовиріб; *2* – корпус; *3* – постійний магніт; *4* – полюс постійного магніту *3*; *5* – плоска високочастотна котушка індуктивності; *6* – діелектрична основа; *7* – захисний протектор; *8* – електричний з'єднувач для живлення високочастотної котушки індуктивності *5*; *9* – котушка імпульсного намагнічування; *10* – електричний з'єднувач для живлення котушки імпульсного намагнічування *9*; *11* – імпульси ультразвукових хвиль в ОК

Для виконання досліджень було виготовлено макет (спрощений блок), схему якого наведено на рис. 3. Джерело магнітного поля складається з постійного магніту *1* на основі металокераміки NeFeB, на якому намотана котушка *2* намагнічування (див. рис. 1). Котушка живиться від блоку *3* імпульсами струму намагнічування. Високочастотна котушка *4* індуктивності живиться високочастотними імпульсами струму від блоку *5*. Збуджені у виробі *6* ультразвукові імпульси *7* відбиваються з об'єму металу та приймаються високочастотною котушкою *4*. Прийняті з виробу *6* ультразвукові імпульси *7* посилюються блоком *8*, з якого вони надходять на блок *9*, де обробляються та візуалізуються. Управління та синхронізацію роботи елементів стенду виконує блок *10*. $B_{імп} + B_0$ – напрямок вектора індукції результуючого магнітного поля.

При дослідженнях розміри постійного магніту складали 30×40×60 мм. Матеріал магніту виготовлений на основі NeFeB. Котушка імпульсного магніту мала 21 виток дроту діаметром 2,4 мм. Відстань від полюса джерела магнітного поля до поверхні ОК зі сталі ст.45 завтовшки 39 мм скла-

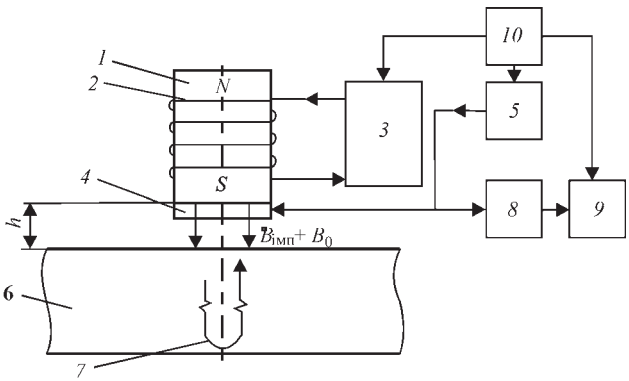

Рис. 3. Стенд для досліджень можливостей ЕМАП із комбінованим намагнічуванням

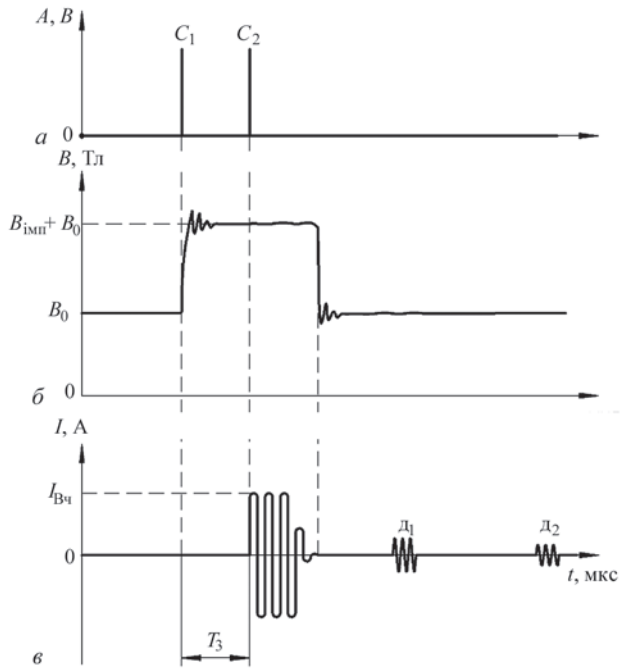

Рис. 4. Функціональна схема роботи стенду з комбінованим намагнічуванням ОК одним циклом зондування ультразвуковими імпульсами

дала 10,6 мм. Піковий струм у котушці намагнічування досягав 270 А. Затримка високочастотного пакетного імпульсу відносно початку імпульсу намагнічування перевищує 50 мкс. Тривалість пакетного високочастотного імпульсу дорівнювала трьом періодам частоти заповнення 2,3 МГц.

На рис. 4 наведено функціональну схему роботи стенду з комбінованим намагнічуванням.

Стенд працює наступним чином. ЕМАП розміщується над поверхнею ОК *6*, так що відстань від полюса постійного магніту *1* до металовиробу *6* складає h (як правило, кілька міліметрів). У поверхневому шарі ОК формується постійне магнітне поле B_0. Блок *10* управління та синхронізації подає на блок *3* синхронізуючий імпульс C_1 (рис. 4, *а*). Блок *3* збуджує в котушці *2* намагнічування імпульс струму часовою тривалістю в кілька десятків мікросекунд, який збуджує в поверхневому шарі ОК індукцію $B_{імп}$. Магнітні поля, створені котушкою *2* намагнічування та магнітом *1*, співпадають за напрямком і складаються з $B_{імп} + B_0$ (рис. 4, *б*). Далі блок *10* управління та синхронізації подає на блок *5* синхронізуючий імпульс C_2 (рис. 4, *а*) із затримкою $T_з$, який збуджує у високочастотній котушці *4* індуктивності пакетний імпульс високочастотного струму. У результаті в поверхневому шарі ОК *6* у зоні дії $B_{імп} + B_0$ збуджується високочастотний вихровий струм $I_{вч}$ (рис. 4, *в*). Взаємодія магнітного поля $B_{імп} + B_0$ і вихрового струму $I_{вч}$ у поверхневому шарі ОК *6* за рахунок електромагнітно-акустичного перетворення призводить до збудження ультразвукових пакетних імпульсів у металовиробі (рис. 3 поз. 7). Відбиті з ОК *6* ультразвукові імпульси, наприклад донні сигнали $Д_1$ і $Д_2$, приймаються високочастотною котушкою індуктивності *4* за рахунок зворотного електромагнітно-акустичного перетворення. Прийняті та перетворені котушкою *4* електричні імпульси, що несуть інформацію про якість металовиробу *6*, посилюються блоком з низьким шумом *8* (рис. 3), з якого вони надходять на блок *9*, де обробляються та візуалізуються.

У результаті за рахунок додаткового магнітного поля $B_{імп}$ потужність збудженого ультразвукового імпульсу суттєво збільшується і, відповідно, чутливість ультразвукового контролю підвищується, оскільки збільшується відношення амплітуди корисного сигналу по відношенню до амплітуди шуму. Такий висновок підтверджується результатами експериментальних досліджень (рис. 5), виконаних із використанням стенду (рис. 3).

З аналізу даних, отриманих при експериментальних дослідженнях, встановлено, що збільшення амплітуди донних імпульсів за рахунок використання імпульсного намагнічування, досягло 40 %. Тобто чутливість контролю феромагнітних металовиробів підвищується. Окрім того, сила притя-

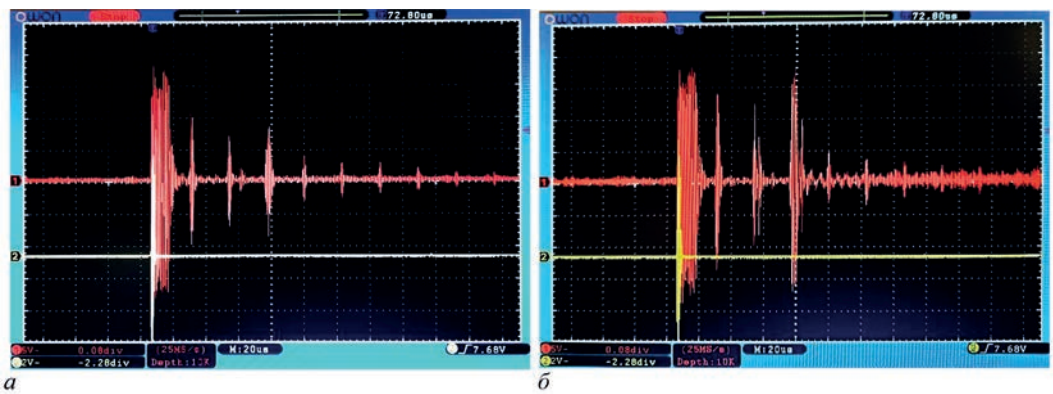

Рис. 5. Реалізації з послідовностями перевідбитих в ОК донних імпульсів, що отримані при відсутності імпульсного намагнічування (*а*) і при сумісній роботі постійного та імпульсного намагнічування (*б*)

гання магніту до ОК зменшилася, що поліпшило процес сканування оператором поверхні феромагнітного ОК портативним ЕМАП.

Висновки

Встановлено, що для підвищення чутливості контролю доцільно використовувати джерело магнітного поля з одночасним використання постійного та імпульсного магнітного поля.

Для забезпечення підвищення амплітуди корисного сигналу по відношенню до шумів необхідно затримувати дію високочастотного імпульсу по відношенню до початку імпульсу намагнічування не менше ніж на 50 мкс.

Використання додаткового імпульсного намагнічування дає можливість підвищити амплітуду донних імпульсів по відношенню до завад до 40 % при зазорах між поверхнею ОК і ДМП більше 10 мм.

При такому технічному рішенні сила притискання ЕМАП до феромагнітного ОК зменшується, що поліпшило процес сканування оператором поверхні феромагнітного ОК портативним ЕМАП.

Список літератури

1. Троїцький В.О. (2023) Борис Патон фундатор науки з дефектоскопії та моніторингу конструкцій. НК інформ, Київ, Інтерсервіс.
2. Український науково-дослідного інститут неруйнівного контролю [електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.autondt.com/.
3. Познякова М.Є. (2021) Ультразвуковий метод та засіб для виявлення внутрішніх дефектів залізничних осей: автореф. дис. .... канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 24 с.
4. Десятніченко О.В. (2015) Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями: дис. .... канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 172 с.
5. Плєснецов С.Ю. (2021) Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів: автореф. дис. .... докт. техн. наук: 05.11.13. Харків, 40 с.
6. Innerspec Website [electronic source]. URL: https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors.
7. Суворова М.Д. (2019) Розробка намагнічувальних джерел для ЕМА перетворювачів на основі потужних постійних магнітів. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворююча техніка, **1**, 63–73.
8. Сучков Г.М. (2005) Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів: автореф. дис. .... докт. техн. наук: 05.11.13. НТУ ХПІ. Харків, 37 с.
9. Донченко А.В., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Кропачек О.Ю. (2024) Накладний суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач з імпульсним намагнічуванням для контролю феромагнітних металовиробів. Патент на корисну модель № 156088. Заявка № U202304534 від 25.05.2023 р. Опубл. 08.05.2024. Бюл. № 19.
10. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. (2014) Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet. In: *IEEE Far East Forum on* Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT), Chengdu, China, 20–23 June 2014. DOI: https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272
11. Hernandez-Valle, F., Dixon, S. (2011) Pulsed electromagnet EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitori*, 53(**2**), 96–99. DOI: https://doi.org/10.1784/insi.2011.53.2.96
12. Ogata, S., Uchimoto, T., Takagi, T., Dobmann, G. (2018) Development and performance evaluation of a high-temperature electromagnetic acoustic transducer for monitoring metal processing. *Int. J. Appl. Electrom.*,58(**3**), 309–318. DOI: https://doi.org/10.3233/JAE-180016
13. Hernandez-valle, F., Dixon, S. (2010) Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet. *NDT & E International*, 4(**2**), 171–175. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.10.009
14. Guofu Zhai, Bao Liang, Xi Li et al. (2022) High-temperature EMAT with doublecoil configuration generates shear and longitudinal wave modes in paramagnetic steel. *NDT & E International*, **125**, 1–12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102572
15. Salam Bussi, Suchkov, G., Mygushchenko, R. et al. (2019) Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic measurements, testing and diagnostics of ferromagnetic metal products. *Український метрологічний журнал*, **4**, 41–49. DOI: https://doi.org/10.24027/ 2306-7039.4.2019.195956
16. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang et al. (2020) Electromagnetic acoustic detection of steel plate defects based on high-energy pulse excitation. *Applied Sciences*, 10(**16**), 5534. DOI: https://doi.org/10.3390/app10165534

References

1. Troitskyi, V.O. (2023) *Boris Paton, founder of the science of flaw detection and structural monitoring.* Kyiv, Interservis [in Ukrainian].
2. Ukrainian science and research Institute of non-destructive testing. URL: https://www.autondt.com/ [in Ukrainian].
3. Pozniakova, M.Ye. (2021) Ultrasonic method and tool for detecting internal defects in railway axles. *In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*. Kharkiv [in Ukrainian].
4. Desiatnichenko, O.V. (2015) Electromagnetic-acoustic thickness gauge for checking metal products with dielectric coatings. *In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*. Kharkiv [in Ukrainian].
5. Pliesnetsov, S.Yu. (2021) Development of methods and tools for electromagnetic-acoustic testing of rod, tubular and sheet metal products. *In: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree.* Kharkiv [in Ukrainian].
6. Innerspec Website URL: https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors
7. Suvorova, M.D. (2019) Development of magnetization sources for EMO converters on the basis of powerful permanent magnets. *Visnyk NTU KhPI. Seriia: Elektroenerhetyka ta Peretvoriuvalna Tekhnika*, **1**, 63–73 [in Ukrainian].
8. Suchkov, H.M. (2005) Development of the theory and practice of creating devices for electromagnetic-acoustic control of metal products. *In: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree*. KhPI, Kharkiv [in Ukrainian].
9. Donchenko, A.V., Myhushchenko, R.P. Suchkov, H.M., Kropachek O.Yu. (2024) Surface-mounted combined electromagnetic-acoustic transducer with pulsed magnetization for inspection of ferromagnetic metal products. Utility model patent 156088, U202304534, fill. 25.05.2023, publ. 08.05.2024 [in Ukrainian].
10. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. (2014) Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet. *In: IEEE Far East Forum on* Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT), Chengdu, China, 20–23 June 2014. DOI: https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272
11. Hernandez-Valle, F., Dixon, S. (2011) Pulsed electromagnet EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 53(**2**), 96–99. DOI: https://doi.org/10.1784/insi.2011.53.2.96
12. Ogata, S., Uchimoto, T., Takagi, T., Dobmann, G. (2018) Development and performance evaluation of a high-temperature electromagnetic acoustic transducer for monitoring metal processing. Int. J. Appl. Electrom., 58(**3**), 309–318. DOI: https://doi.org/10.3233/JAE-180016
13. Hernandez-valle, F., Dixon, S. (2010) Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet. NDT & E Intern., 4(**2**), 171–175. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.10.009
14. Guofu Zhai, Bao Liang, Xi Li, Yuhang Ge, Shujuan Wang (2022) High-temperature EMAT with double coil configuration generates shear and longitudinal wave modes in para-

magnetic steel. NDT & E Intern., **125**, 1–12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102572
15. Salam Bussi, Suchkov, G., Mygushchenko, R., Kropachek, O., Plesnetsov, S. (2019) Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic measurements, testing and diagnostics of ferromagnetic metal products. *Ukrainskyi Metrolohichnyi Zh.*, **4**, 41–49. DOI: https://doi.org/10.24027/ 2306-7039.4.2019.195956
16. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin, Qingxin Yang (2020) Electromagnetic acoustic detection of steel plate defects based on high-energy pulse excitation. Appl. Sci., 10(**16**), 5534. DOI: https://doi.org/10.3390/app10165534

ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC CONVERTER WITH COMBINED MAGNETIZATION

H.M. Suchkov, S.Yu. Pliesnetsov, M.Ye. Kalnitskyi, Yu.Yu. Koshkarov, I.M. Oleksenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kyrpichova Str., 61002, Kharkiv, Ukraine.
E-mail: suchkov@gmail.com

The use in industry of methods and means of excitation of transverse waves ultrasonic pulses using electromagnetic-acoustic converters is becoming increasingly widespread. However, converters based on permanent powerful magnets have disadvantages, which consist in their strong attraction to ferromagnetic products and in the adhesion of ferromagnetic particles, which leads to distortion of the results of non-destructive testing and a decrease in sensitivity. Over time, such magnets gradually lose their magnetic properties. Known converters with pulse magnetization can only operate with low probing frequencies due to heating. It is proposed to use permanent magnets with a relatively low magnetic field induction and additional pulse magnetization simultaneously. Such a technical solution increases the sensitivity of the inspection and significantly reduces the attraction of the converter to the ferromagnetic product, and also makes it possible to significantly increase the frequency of probing the control object. 16 Ref., 5 Fig.

Keywords: ferromagnetic product, non-destructive testing, ultrasonic pulses, electromagnetic-acoustic converter, magnetic field, pulsed magnetization

Отримано 29.01.2025
Отримано у переглянутому вигляді 13.02.2025
Прийнято 25.03.2025

27–29 травня 2025

XXIII МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

Місце проведення: Україна, м. Київ, МВЦ, Броварський пр-т, 15

НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ СЕМІНАРИ

«3D ДРУК МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ»

27 травня 2025 р.
модератор семінару д.т.н., проф. В.В. Квасницький

«НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ»

28 травня 2025 р.
модератор семінару Ю.М. Посипайко

Запрошуємо взяти участь в роботі науково-практичних семінарів «3D друк металевих виробів» та «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану», які будуть проведені під час роботи XXIII Міжнародного промислового форуму (м. Київ, Броварський проспект, 15).

Для участі в роботі семінарів необхідно надіслати заявку в Оргкомітет (участь безкоштовна).

Контрольні дати.
Подання заявок та тез/доповідей до 30.04.2025
Подання заявок без доповіді до 26.05.2025
Розсилка програм семінарів до 15.05.2025
Час та місце проведення семінарів буде наведено в програмах.

Вартість публікації.
Одна сторінка в збірці тез/доповідей – 150 грн.
Надання індексу DOI для тези/доповіді – 150 грн.
Надання сертифіката учасника – 100 грн.
Рахунок для оплати надається за запитом учасника.

До початку семінарів буде видано збірку тез/доповідей. Об'єм публікацій необмежений.

Збірку тез/доповідей в електронному вигляді буде розміщено за посиланням http://ip.if.ua/ukr/3D-NDT-2025.

Тривалість доповідей до 20 хвилин (15 хвилин на доповідь і 5 хвилин на обговорення). Презентація доповідей на мультімедійному проєкторі.

Організатори.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Оргкомітет.
Олександр Зельніченко, тел.: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua, patonpublishinghouse@gmail.com
http://ip.if.ua/ukr/3D-NDT-2025