

УДК 620.179.16: 620.179.17

Сучков Г. М.

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики
Заклад вищої освіти «Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1805-0466

Мигущенко Р. П.

доктор технічних наук, професор,
проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»,
Заклад вищої освіти «Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна
E-mail: mrp1@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3287-9772

Кошкарів Ю. Ю.

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії
факультету озброєння та військової техніки
Заклад вищої освіти «Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна
E-mail: koshkarov@meta.ua
ORCID: 0000-0003-1430-0154

Бойко В. М.

Начальник воєнно-наукового відділу штабу Командування Сил логістики Збройних Сил України
Київ, Україна
E-mail: vicboy@i.ua
ORCID: 0000-0002-1422-481X

Донченко А. В.

аспірант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики
Заклад вищої освіти «Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна
E-mail: donchenko.a@gmail.com
ORCID: 0009-0006-0559-0160

СТАН РОЗВИТКУ ПОРТАТИВНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ, КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ ФЕРОМАГНІТНИХ МЕТАЛОВИРОБІВ (ОГЛЯД)

Анотація

Виконано аналіз інформаційних джерел з питання розробки та використання електромагнітно-акустичних методів і засобів ультразвукового контролю, вимірювань та діагностики. Встановлено широке використання електромагнітно-акустичних перетворювачів для визначення якості труб, рейок, листів тощо, виготовлених з феромагнітних матеріалів. Показано, що значні переваги електромагнітно-акустичних перетворювачів по відношенню до контактних проявляються при неруйнівному ультразвуковому контролі металовиробів в потоці виробництва з високою продуктивністю та значною економічною ефективністю, обумовленою не використанням контактної рідини, відсутністю операції спеціальної підготовки поверхні об'єкту контролю, можливістю діагностики холодних та гарячих матеріалів. Результати вимірювань трубчатих виробів майже не залежать від кривизни їх поверхні. Нові розробки безконтактних перетворювачів дозволяють вимірювати товщину металу без врахування діелектричних покриттів товщинами до 10 мм, а в багатьох випадках і більше. На відміну від фрагментарних даних, наведених в літературних джерелах, виявлені більшість переваг і недоліків електримагнітно-акустичних методів і перетворювачів ультразвукового контролю, вимірювань і діагностики. Встановлено, що головною

перевагою і одночасно недоліком є використання потужних магнітів в складі портативних перетворювачів для ультразвукового контролю виробів з феромагнітних матеріалів. Складність сканування, велика сила притискання до об'єкту контролю, налипання феромагнітних часток потребує нових технічних рішень при побудові безконтактних перетворювачів. Виключення вказаного важливого недоліку можливо за рахунок використання імпульсних джерел формування магнітного поля, що ускладнює конструкцію перетворювачів і вимагає використання більш потужних джерел живлення для портативних електромагнітно-акустичних приладів.

Ключові слова: ультразвук, вимірювання, контроль, діагностика, ЕМАП.

Вступ. Для виявлення внутрішніх та поверхневих дефектів в феромагнітних металовиробах частіш за все використовують ультразвукові методи контролю з нанесенням контактної рідини [5; 20; 21]. Для цього обов'язково необхідно видалити з поверхні об'єкту контролю (ОК) бруд, іржу, зменшити шорсткість тощо, що вимагає суттєвих витрат часу та інструменту. Складнощі мають місце при контролі ОК із значною кривизною поверхні, в горячому або холодному стані. Продуктивність автоматичної діагностики труб, листів заготовок тощо не перевищує 1 м/с, а при ручному контролі – не більше 100 мм/с.

На цей час широко використовують електромагнітно – акустичні (ЕМА) засоби та методи ультразвукового контролю [3; 6; 8; 14; 18; 25; 32; 35], які не потребують використання контактної рідини, оскільки випромінюючим та приймаючим елементом у цьому випадку є електропровідний та/або феромагнітний тонкий поверхневий шар ОК що діагностується, а середовищем, що передає енергію, є магнітне та електромагнітне поля. Але впровадження ЕМА методів необґрунтовано обмежене з причини недостатнього аналізу нових досліджень і розробок.

Мета роботи. Поставлено завдання виконати аналіз переваг і недоліків ЕМА методів і портативних засобів вимірювань, контролю та діагностики і визначити напрямки підвищення їх ефективності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Головні переваги технології ЕМА контролю та вимірювання в порівнянні з традиційними контактними методами. В основному раніше переваги ЕМА методів і портативних приладів з використанням постійних магнітів були розглянуто вибірково. Тому нижче виділимо такі переваги для областей важливого використання:

- ЕМА метод дозволяє реалізувати всі відомі методи ультразвукового контролю, вимірювань та діагностики [4; 8; 10; 13; 14; 16; 19; 25; 35];
- ЕМА способом можливо збуджувати і приймати ультразвукові коливання усіх відомих типів хвиль: об'ємні зсувні [32] та поздовжні [35], рис. 1, горизонтально поляризовані SH хвилі [6; 14], хвилі Релея [6; 8] та Лемба [25];
- він забезпечує збудження та прийом зсувних ультразвукових імпульсів нормально до поверхні ОК незалежно від її кривизни [8; 14; 32]. Поляризація таких імпульсів може бути як лінійною, рис. 1, так і радіальною;
- збуджувані ЕМАП зсувні ультразвукові імпульси мають набагато вищу чутливість щодо виявлення надтонких розшарувань, наприклад, в листах [23; 25], рис. 2, залізничних рейках [15; 22], рис. 3, трубах [18] тощо;
- зчутливість до корисного сигналу для ЕМАП вища, ніж для ПЕП при низьких температурах ОК, рис. 4.
- ЕМАП дозволяють виконувати ультразвуковий контроль в сталях з температурою до 1200 °С [2; 14], що неможливо ПЕП;
- зсувні імпульси мають приблизно вдвічі меншу швидкість розповсюдження в матеріалі, в порівнянні з поздовжніми, що надає перевагу при товщинометрії та визначенні роздільної здатність щодо визначення координат дефектів [4], які розташовані поряд;
- ЕМАП може збуджувати та приймати зсувні ультразвукові коливання в широкому діапазоні частот, що дозволяє збільшити точність вимірювань в порівнянні з стандартними ПЕП [12];
- одним ЕМАП можливо збуджувати і приймати одночасно кілька видів ультразвукових хвиль [35], що неможливо ПЕП;

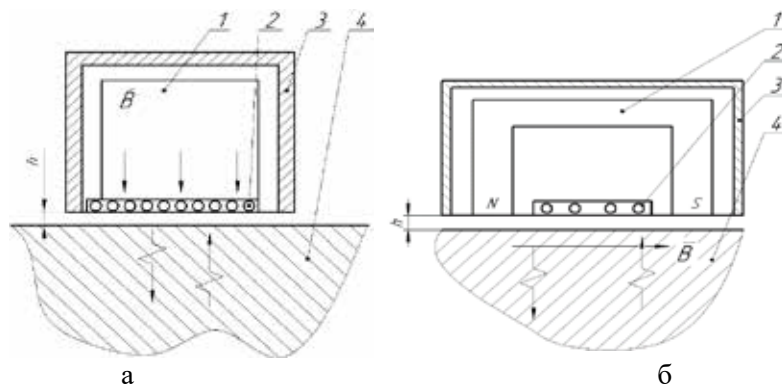


Рис. 1. Моделі збудження зсувних (а) та поздовжніх (б) ультразвукових хвиль, де:
1 – магніт; 2 – високочастотна котушка індуктивності ЕМАП; 3 – корпус; 4 – об'єкт контролю;
В – індукція магнітного поля; h – відстань від перетворювача до поверхні ОК

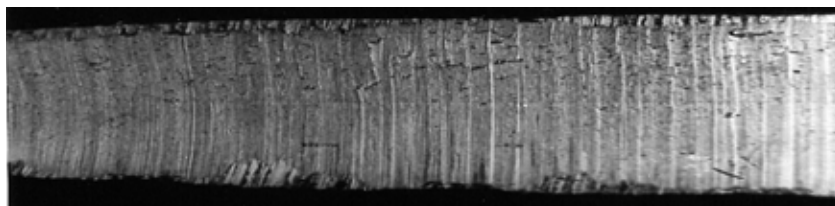


Рис. 2. Надтонкий дефект в перетині металевго листа, який виявлено тільки ЕМАП

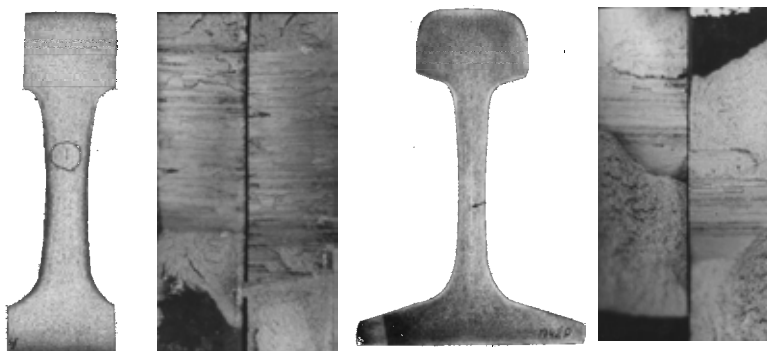


Рис. 3. Надтонкі дефекти що виявлені ЕМАП, в шийці залізничних рейок і їх крихкі злами

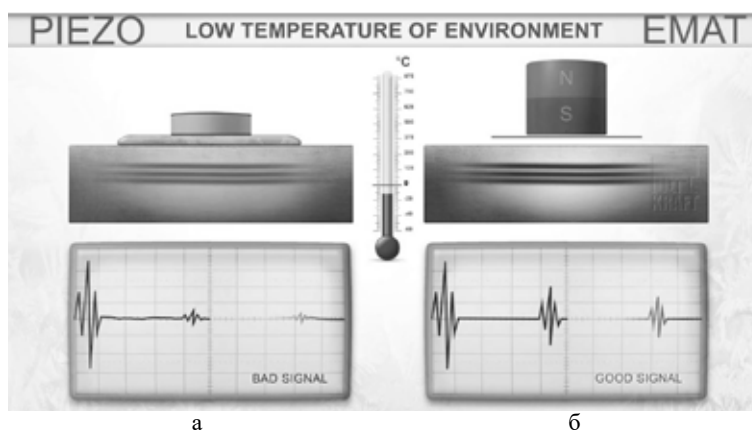


Рис. 4. Різниця прийнятого ультразвукового донного сигналу для контактного (а) та для ЕМА методу контролю (б) при низьких температурах

- змінюючи частоту імпульсів живлення одного ЕМА перетворювача можливо сканувати об'єм виробу під різними кутами введення ультразвукових променів [14];
- ЕМА метод дозволяє проводити контроль через діелектричні покриття товщиною до 20 мм [4; 9] та електропровідні прошарки товщиною кілька десятків міліметра;
- іржа, невідлущена нетовста окалина, шар рідини та бруду, шорсткість поверхні ОК не впливають на результати вимірювань об'ємними зсувними хвилями [3], збуджених ЕМАП;
- ЕМАП не навантажує акустично поверхню ОК, що виключає проблеми, які пов'язані з ревербераційними процесами в шарі контактної або імерсійної рідини у випадку використання ПЕП [7];
- економічні витрати, за рахунок виключення зачистки поверхні ОК при використанні ЕМАП, зменшуються майже в 2 рази [14];
- ЕМА метод забезпечує можливість виявлення відшарування діелектричного покриття за рахунок збудження і прийому ультразвукових імпульсів ЕМАП виключно в поверхневому шарі металевго ОК [11];
- за рахунок форми високочастотної котушки індуктивності ЕМАП [8; 29] забезпечується можливість фокусувати ультразвукове поле в заданому місці поверхнього шару або в об'ємі ОК;
- ЕМА метод дозволяє виконувати ультразвуковий контроль та дефектометрію зсувними ультразвуковими імпульсами без неконтрольованого поверхнього шару металу ОК [13];
- при певних умовах ЕМАП дають можливість проводити ультразвуковий контроль феромагнітних металовиробів при індукції магнітного поля 0,2...0,3 Тл [14];
- ЕМА методом ефективно вимірюються фізико – механічні характеристики матеріалів [24].

Недоліки засобів та технологій ЕМА вимірювання, контролю та діагностики з використанням постійних магнітів. Вважається, що ЕМА метод та ЕМАП мають наступні недоліки:

- має порівняно низька чутливість щодо інформаційного сигналу [10];
- зміна величини зазору між ЕМАП і металічною поверхнею ОК [15; 17;] впливає на зміну на амплітуді інформаційного сигналу експоненційно;
- при контролі феромагнітних ОК зазор між ЕМАП і металовиробом заповнюється іржею, окалиною, частинками металу тощо, що приводить до зниження чутливості (екранування), а також до появи когерентних імпульсів завад зі значною амплітудою [15];
- при ручному контролі ЕМАП з постійними магнітами складно видаляти металічні частинки з феромагнітного матеріалу, що налипають на перетворювач [10; 15];
- необхідно надійно захищати перетворювач від електромагнітних завад [30];
- ЕМАП сильно притискається до феромагнітного ОК [14];
- для ЕМАП з потужними магнітами [28] необхідно використовувати механічні системи для сканування, що ускладнює його конструкцію;
- можливе збудження ультразвукових когерентних завад в металічних елементах ЕМАП та в магніті [14].

Аналіз переваг і недоліків засобів та технології ЕМА вимірювання, контролю та діагностики та перспективи розвитку. З аналізу переваг і недоліків ЕМА перетворювачів та методів контролю встановлено значний інтерес до їх розвитку, оскільки на сьогоднішній день більшості навчальної літератури є відповідні розділи [20; 21].

Зважаючи на суттєві переваги ЕМА методу контролю, значне застосування він знайшов в основному в автоматичних установках діагностики прокату з феромагнітних сталей [31], який виготовляється у світі сотнями мільйонів тон. В портативних приладах його можливості обмежені складністю реалізації, значною величиною індукції магнітного поля і силою струмів в котушках індуктивності перетворювачів. Проте потреба в таких портативних приладах значна [10; 14; 17; 26; 33; 34].

З наведених вище даних випливає, що складність реалізації ЕМА методу компенсується разовими витратами на розробку, в той час як контактний метод ультразвукового контролю потребує постійних економічних втрат на зачистку поверхні кожного виробу, знос інструменту і ПЕП, а також витрат на контактну рідину [14].

Використання сучасних напівпровідникових елементів забезпечує пікову силу струму в котушках індуктивності ЕМАП в сотні ампер [24; 27].

Найбільш складною проблемою являється створення ЕМА перетворювачів для ультразвукових вимірювань з мінімально можливою величиною індукції поляризованого магнітного поля. Але при цьому виникає протиріччя, оскільки для отримання достатньої величини амплітуди корисного сигналу магнітне поле необхідно формувати максимальним.

Відомі магнітні системи [1], що використовують імпульсні електромагніти, які створюють потужне магнітне поле на час порядку декількох мілісекунд, тому сильне протягування до феромагнітних матеріалів практично відсутнє. Величини магнітної індукції, які створюються імпульсними електромагнітами, можуть перевищувати в кілька разів значення, що формуються магнітними системами портативних приладів з використанням постійних магнітів.

Останнім часом почалися розробки перетворювачів з імпульсними магнітами. Це стало можливим шляхом використання портативних потужних напівпровідникових комутаторів струму [19; 27]. Показано, що для зменшення тепла, яке виділяється в імпульсному магніті без охолодження частота зондування ОК не повинна перевищувати 20...50 Гц. Для частот до 100 Гц достатньо охолодження струменем повітря [14; 16; 19; 27; 32]. Аналіз результатів використання постійних та імпульсних магнітів в складі портативних ЕМАП дав можливість зробити наступні висновки.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Встановлено, що портативні ЕМАП з постійними магнітами мають переваги перед ПЕП при контролі феромагнітних ОК, в тому числі з діелектричними покриттями товщиною до 10...20 мм без зачищення поверхні. Вони повинні використовувати індукцію магнітного поляризованого поля 0,2...0,5 Тл. При цьому амплітуда інформаційного сигналу забезпечується силою струму в високочастотній котушці індуктивності.

Відомі портативні ЕМА перетворювачі з імпульсними магнітами забезпечують збудження і прийом ультразвукових імпульсів усіх відомих типів хвиль. Для реалізації таких перетворювачів необхідні потужні джерела живлення з низьким імпедансом, а також швидкодіючі комутатори струму, що забезпечується сучасними засобами. Для зменшення тепла, що виділяється в імпульсному магніті без охолодження частота зондування ОК не повинна перевищувати 20...50 Гц. Для частот до 100 Гц достатньо повітряного охолодження. Повітряний зазор або діелектричний прошарок може досягати 0,2...0,5 мм, що забезпечує діагностику більшості металовиробів з фарбованими покриттями.

Таким чином, використання імпульсних джерел поляризованого магнітного поля в портативних приладах з ЕМА перетворювачами потребує додаткових досліджень і розробок в напрямку збільшення величини пікової індукції магнітного поля, зменшення габаритних розмірів та енергетичних втрат, покращення теплових характеристик, збільшення зазору між ЕМАП і поверхнею металу.

Список використаних джерел

1. Боллох В. Ф., Кочерга О. І., Щукін І. С. Порівняльний аналіз конструктивних типів комбінованих лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.084>.
2. Вілсон Д. М., Коул П. Т., Уїтінгтон К. Р. Розробка електромагнітно-акустичної системи для неруйнівного контролю сталених стрижнів при високій температурі. Зб. доп. міжнародної конференції з неруйнівного контролю. Канни. 1976. (Переклад № 9419/3).
3. Гарькавий В. В., Сучков Г. М., Срокін В. І. та ін. Дослідження макроструктури рейок з допомогою ультразвуку. Підвищення якості залізничних рейок і коліс : галуз. зб. наукових праць. Харків: УкрНДІМет, 1982. С. 84–86.
4. Десятніченко О. В. Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями: дис. канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 2015. 172 с.
5. Карпаш М. О., Рибіцький І. В., Котурбаш Т. Т., Бондаренко О. Г., Карпаш О. М. Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі : монографія. Івано-Франківськ: Вид.-во ІФНТУНГ, 2012. 420 с.
6. Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. М., Боллох В. Ф., Плєснецов С. Ю., Кочерга А. І. Інформаційно-вимірювальні електромеханічні перетворювачі для оцінки якості поверхні феромагнітних металовиробів ультразвуковими хвилями Релея. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 70–76.
7. Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Радев Х. К., Петрищев О. М., Десятніченко О. В. Електромагнітно-акустичний перетворювач для ультразвукової товщинометрії феромагнітних металовиробів без видалення діелектричного покриття. *Технічна електродинаміка*. 2016. №2. С. 78–82.
8. Плєснецов С. Ю. Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів: автореф. дис. д-ра техн. наук: спец. 05.11.13 «Прилади та методи контролю та визначення складу речовин». Харків, 2021. 40 с.
9. Познякова М. Є., Сучков Г. М., Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю., Донченко А. В. Вдосконалення вимірювального ультразвукового електромагнітно-акустичного перетворювача. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 1. С. 27–33. DOI: [10.24027/2306-7039.1.2023.282540](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2023.282540).
10. Салам Буссі, Плєснецов С. Ю. Практичні розробки електромагнітно-акустичних перетворювачів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків, 2019. № 26 (1351). С. 57–65.
11. Спосіб вимірювання товщини не електропровідного покриття на електропровідному виробі: пат. 90624 Україна. № u201312275; заявл. 21.10.2013; опубл. 10.06.2014, бюл. № 11/2014.
12. Спосіб ультразвукового контролю виробів широкосмуговим електромагнітним перетворювачем: пат. 71700 Україна. №u201115525; Заявл. 28.12.2011; опубл. 25.07.2012, Бюл №14/2012.
13. Ультразвуковий роздільно-поєднаний електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю феромагнітних металовиробів: пат. 116248 Україна. № u201612502; заявл. 08.12.2016; опубл. 10.05.2017, бюл. № 14/2017.
14. Сучков Г. М. Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів: автореф. дис. докт. техн. наук: спец. 05.11.13 «Прилади та методи контролю та визначення складу речовин». Харків, 2005. 42 с.
15. Сучков Г. М. Розробка і впровадження технології безперервного автоматичного виявлення дефектів макроструктури об'ємно - зміцнених рейок безконтактним ультразвуковим методом: дис. канд. техн. наук. 05.02.01. Харків, 1988. 146 с.
16. Сучков Г. М., Донченко А. В. Удосконалення електромагнітно – акустичних перетворювачів для ультразвукового контролю якості феромагнітних металовиробів. Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: зб. тез доповідей міжнародної наукової інтернет-конференції, 6–7 лютого 2023 р., Тернопіль–Перево́рськ (Польща). Вип. 74. Україна, 2023. С. 192–194.
17. Сайт канадської фірми Innerspec [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors>. (Дата звернення: 19.09.2021).
18. Сучков Г. М., Катасонов Ю. А., Гарькавий В. В. Можливості безконтактних електромагнітних методів неруйнівного контролю якості труб. Зб. Питання розвитку газової промисловості України. Вип. XXVIII. Діагностування трубопроводів, технологічного і енергомеханічного обладнання нафтової та газової промисловості. УкрНДІГаз. 2000. С. 102–109.
19. Сучков Г. М., Салам Буссі. Електромагнітно-акустичні перетворювачі з імпульсними джерелами поляризованого магнітного поля. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*. 2020. № 1. С. 1–6.
20. Троїцький В. О. Моніторинг стану конструкцій (введення в професію). *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2023. №3. С. 60.
21. Цапенко В. К., Куц Ю. В. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник. Київ, 2010. 448 с.
22. Beaujard L., Mondot I., Vinot J. La methode Ralus de sondage ultrasonore automatique du champignon des rails. *Revue generale des fer*. 1970. No 1. P. 13.
23. Boughedda H., Hacib T., Chelabi M., Acikgoz H., Le Bihan Y. Electromagnetic Acoustic Transducer for Cracks Detection in Conductive Material. 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). 2015. Pp. 1–4. IEEE Conference Publications. DOI:10.1109/INTEE.2015.7416717.
24. Сайт компанії International Rectifier [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://datasheetspdf.com/pdf/643573/InternationalRectifier/IRLB3036PBF/1/>. (Дата звернення: 19.09.2021).
25. Jianpeng He, Steve Dixon, Samuel Hill, Ke Xu. A New Electromagnetic Acoustic Transducer Design for Generating and Receiving S0 Lamb Waves in Ferromagnetic Steel Plate. *Sensors*. 2017. Iss. 17(5). Pp. 10–23. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/s17051023>.
26. Matthias Sehera, Peter B. Nagy On the separation of Lorentz and magnetization forces in the transduction mechanism of Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs). *NDT & E International*. 2016. Vol. 84. Pp. 1–10.

27. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R.P., Suchkov G. M., Sotnik S. V., Kropachek O. Yu. Powerful Sources of Pulse High-frequency Electromechanical Transducers for Measurement, Testing and Diagnostics. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 2. С. 31–35.
28. Hirotsugu Ogi, Masahiko Hirao, Toshihiro Ohtani. (1998). Line-focusing of ultrasonic SV wave by electromagnetic acoustic transducer. The Journal of the Acoustical Society of America. N 1. Volume 103. Issue 5. Pp. 2411–2415. doi.org/10.1121/1.422760.
29. Ohtsuka Y., Yoshimura T., Ueda Y. P2E-6 New Design of Electromagnetic Acoustic Transducer for Precise Determination of Defect. IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings.2007. Pp. 1609–1612. DOI: 10.1109/ ULTSYM. 2007.405.
30. Riichi Murayama, Kazuo Fujisawa, Hidekazu Fukuoka et Masahiko Hirao (1996) Development of an on-line Evaluation System of Formability in Cold-Rolled Steel Sheets Using Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs)", NDT&E International, Vol, 29, No. 3, pp. 141–146. doi.org/10.1016/0963-8695(94)00008-5.
31. Сайт компанії NORDINKRAFT [електронний ресурс]. Режим доступу: www.nordinkraft.de/. (Дата звернення: 08.05.2020).
32. Salam Bussi, Suchkov G., Mygushchenko R., Kropachek O., Plesnetsov S. (2019). Electromagnetic-acoustic Transducers for Ultrasonic Measurements, Testing and Diagnostics of Ferromagnetic Metal Products. Ukrainian Metrological Journal. No 4. Pp. 41–49. Retrieved from: https://doi.org/10.24027/ 2306-7039.4.2019.195956.
33. Strizhak V.A., Pryakhin A.V. Optimization of the Parameters of the Magnetizing Devices of the Electromagnetic – Acoustic Transducer. Devices and Methods of Measurements. Vol. 14. No 2. Pp. 81–95. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95.
34. Suchkov G.M., Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Mygushchenko R.P., Kropachek O.Yu. Increasing the Efficiency of the Surface-Mounted Ultrasonic Electromagnetic-Acoustic Transducer Due to the Magnetic Field Source. Технічна електродинаміка. № 2. 2023. С. 3–8. DOI: https://doi.org/10.15407/ techned2023. 02.003
35. Suchkov G.M., Taranenko Yu.K., Khomyak Yu.V. (2016). A Non-Contact Multifunctional Ultrasonic Transducer for Measurements and Non-Destructive Testing. Measurement Techniques. No 12. Vol. 59. Iss. 9. Pp. 990–993. DOI:10.1007/s11018-016-1081-3.

Suchkov G. M.

Doctor of Science, Professor,

*Professor of computer and radioelectronic systems for testing and diagnostics department
Higher Educational Institution National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, Ukraine*

E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1805-0466

Mygushchenko R. P.

Doctor of Science, Professor

*vice-rector of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Higher Educational Institution National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, Ukraine*

E-mail: mrp1@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3287-9772

Koshkarov Yu. Yu.

PhD, Senior Researcher,

*Leading Researcher of the research laboratory of
Faculty of Weapons and Military Technology
Higher Educational Institution National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, Ukraine*

E-mail: koshkarov@meta.ua

ORCID: 0000-0003-1430-0154

Boiko V. M.

*Director of military and scientific department of Logistic Command headquarters of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine*

E-mail: vicboy@i.ua

ORCID: 0000-0002-1422-481X

Donchenko A. V.

*post-graduate student of computer and radioelectronic systems for testing and diagnostics department,
Higher Educational Institution National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, Ukraine*

E-mail: donchenko.a@gmail.com

ORCID: 0009-0006-0559-0160

STATE OF DEVELOPMENT OF PROTABLE ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS FOR MEASUREMENT, TESTING AND DIAGNOSTIC OF FERROMAGNETIC METAL PRODUCTS (OVERVIEW)

Abstract

The analysis of information sources on the development and use of electromagnetic-acoustic methods and means of ultrasonic testing, measurements and diagnostics was performed. The widespread use of electromagnetic-acoustic transducers for determining the quality of pipes, rails, sheets, etc. made of ferromagnetic materials has been established. It is shown that the significant advantages of electromagnetic-acoustic transducers in comparison to contact transducers are manifested in the non-destructive ultrasonic metal products testing in the production flow with high performance and significant economic efficiency, due to the absence of contact fluid, special testing object surface preparation operations, the possibility of diagnosing cold and hot materials. The results of measurements of tubular products are almost independent of their surface curvature. New developments of non-contact transducers make it possible to measure the thickness of metal without taking into account up to 10 mm thick dielectric coatings, and in many cases even more.

In contrast to the fragmentary data given in literary sources, most of the advantages and disadvantages of electromagnetic-acoustic ultrasonic testing methods and transducers, measurements and diagnostics have been revealed. It was established that the main advantage and at the same time disadvantage is the use of powerful magnets as part of transducers for ultrasonic testing of products made of ferromagnetic materials. The complexity of scanning, the great force of pressing against the testing object, the sticking of ferromagnetic particles requires new technical solutions in the design of non-contact transducers.

Eliminating this important drawback is possible due to the use of pulsed sources of magnetic field formation, which complicates the design of transducers and requires the use of more powerful power sources mainly for hand-held electromagnetic-acoustic devices.

Key words: ultrasound, measurement, testing, diagnostics, EMAT.

References

1. Boliukh, V.F., Kocherha, O.I., & Shchukin, I.S. (2018). Porivnialnyi analiz konstruktivnykh typiv kombinovanykh liniynykh impulsnykh elektromekhanichnykh peretvoriuvachiv. [Routine analysis of design types of combined linear pulse electromechanical converters]. *Tekhnichna elektrodynamika*. No 4. P. 84–88 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.084>. [in Ukrainian].
2. Vilson, D.M., Koul, P.T., & Uittinhton, K.R. (1976). Rozrobka elektromahnitno-akustychnoi systemy dlia neruinivnoho kontroliu stalnykh stryzhniv pry vysokih temperaturi [Design of an electromagnetic-acoustic system for non-destructive control of steel rods at high temperatures]. *Zb. dop. mizhnarodnoi konferentsii z neruiniv noho kontroliu*. Kanny. (Pereklad No 9419/3) [in Ukrainian].
3. Harkavyi, V.V., Suchkov, H.M., & Srokin, V.I., et al. (1982). Doslidzhennia makrostruktury reioik z dopomohoiu ultrazvuku [Investigation of the macrostructure of slats using ultrasound]. *Pidvyshchennia yakosti zaliznychnykh reioik i kolis [Movement of the sliding rails and wheels]* : haluz. zb. naukovykh prats. Kharkiv: UkrNDIMet, P. 84–86 [in Ukrainian].
4. Desiatnychenko, O.V. (2015). Elektromahnitno-akustychnyi tovshchynomir dlia kontroliu metalovyrobiv z dielektrychnymy pokryttiamy [Electromagnetic-acoustic device for monitoring metals with dielectric coatings]. *Candidate's thesis*. Kharkiv: NTU «KhPI», 172 p. [in Ukrainian].
5. Karpash, M.O., Rybitskyi, I.V., Koturbash, T.T., Bondarenko, O.H., & Karpash, O.M. (2012). *Akustychnyi kontrol konstruksii ta ustatkuvannia u naftohazovii haluzi: monohrafiia*. [Acoustic control of structures and equipment in the oil and gas industry: monograph]. Vyd. IFNTUNH. 420 p. [in Ukrainian].
6. Myhushchenko, R.P., Suchkov, H.M., Petryshchev, O.M., Boliukh, V.F., Pliesnetsov, S.Yu., & Kocherha, A.I. (2017). Informatsiino-vymiriuvalni elektromekhanichni peretvoriuvachi dlia otsinky yakosti poverkhni feromahnitnykh metalovyrobiv ultrazvukovymy khvyliamy Releia. [Information-measuring electromechanical transducers for evaluating the surface quality of ferromagnetic metal products by ultrasonic Rayleigh waves]. *Tekhnichna elektrodynamika*. No 2. P. 70–76. [in Ukrainian].
7. Myhushchenko, R.P., Suchkov, H.M., Radev, Kh.K., Petryshchev, O.M., & Desiatnychenko, O.V. (2016). Elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia ultrazvukovoi tovshchynometrii feromahnitnykh metalovyrobiv bez vydalennia dielektrychnoho pokryttia. [Electromagnetic-acoustic converter for ultrasonic measurements of ferromagnetic metals without removing the dielectric coating]. *Tekhnichna elektrodynamika*, No 2, P. 78–82. [in Ukrainian].
8. Pliesnetsov, S.Yu. (2021). Rozvytok metodiv ta zasobiv dlia elektromahnitno-akustychnoho kontroliu stryzhnevnykh, trubchastykh ta lystovykh metalovyrobiv [Development of methods and means for electromagnetic-acoustic control of rod, tube and sheet metal products]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Kharkiv. 40 p. [in Ukrainian].
9. Pozniakova, M.Ye., Suchkov, H.M., Myhushchenko, R.P., Kropachek, O.Yu., & Donchenko, A.V. (2023). Vdoskonalennia vymiriuvalnogo ultrazvukovoho elektromahnitno-akustychnoho peretvoriuvacha. [Up-to-date vibrational ultrasonic electromagnetic-acoustic conversion device]. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, No 1. P. 27–33. DOI: 10.24027/2306-7039.1.2023.282540. [in Ukrainian].
10. Salam Bussi, & Plesnetsov, S.Yu. (2019). Praktychni rozrobky elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv. [Practical developments of electromagnetic-acoustic transformers]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Kharkiv. No 26 (1351). P. 57–65. [in Ukrainian].
11. Sposib vymiriuvannia tovshchyny ne elektroprovodnogo pokryttia na elektroprovodnomu vyrobi. [Method of curing a non-electrically conductive coating on an electrically conductive vibrator]. Patent na korysnu model No 90624, G01N29/04. No u2013 12275. Zaiav. 21.10.2013. Nadruk. 10.06.2014. Biul. No 11/2014. [in Ukrainian].
12. Sposib ultrazvukovoho kontroliu vyrobiv shyrokosmuhovym elektromahnitnym peretvoriuvachem. [Method of ultrasonic control of viruses with broad-smooth electromagnetic transformation]. Patent na korysnu model No 71700, G01N29/04. No u2011 15525. Zaiavl. 28.12.2011. Nadruk. 25.07.2012. Biul No14/2014. [in Ukrainian].

13. Ultrazvukoviy rozdilno-poednaniy elektromagnitno-akustichniy peretvoruvfch dla kontrola feromagnitnih metalovirobiv [Ultrasonic separate-coupled electromagnetic-acoustic transducer for monitoring ferromagnetic metal products]. Patent na korysnu model No 116248, G01N29/04. Ziavl. 08.12.2016. Nadruk. 10.05.2017. Biul. No 9/2017. [in Ukrainian].
14. Suchkov, H.M. (2005). Rozvytok teorii i praktyky stvorennia pryladiv dla elektromagnitno-akustychnoho kontroliu metalovyrobiv [Development of theory and practice of the creation of devices for electromagnetic-acoustic control of metal particles]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Kharkiv: NTU "KhPI", 42 p. [in Ukrainian].
15. Suchkov, H.M. (1988). Rozrobka i vprovadzhennia tekhnolohii bezperervnogo avtomatynoho vyavlennia defektiv makrostruktury ob'iemno-zmitsnennykh reioik bezkontaktnym ultrazvukovym metodom: avtoief [Development and promotion of technology for continuous automatic detection of defects in the macrostructure of volumetric slats using a non-contact ultrasonic method]. *Candidate's thesis*. Kharkiv: UkrDNDIMet, 24 p. [in Ukrainian].
16. Suchkov, H.M., & Donchenko, A.V. (2023). Udoskonalennia elektromagnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv dla ultrazvukovoho kontroliu yakosti feromagnitnykh metalovyrobiv. [Upgrading of electromagnetic-acoustic converters for ultrasonic testing of ferromagnetic metal particles]. Tezy dopovidi mizhnarodnoi naukovoii internet-konferentsii «Informatsiine suspilstvo: tekhnolohichni, ekonomichni ta tekhnichni aspekty stanovlennia». [“Information partnership: technological, economical and technical aspects of development”]. (vyp. 74). 6–7 liutoho 2023 r., m. Ternopil–m. Perevorsk (Polshcha). Pp. 192–194.
17. Sait kanadskoi firmy Innerspec [elektronnyi resurs]. Retrieved from: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors>. (Data zvernennia: 15.06.2022).
18. Suchkov, H.M., Katasonov, Yu.A., & Harkavyi, V.V. (2000). Mozhlyvosti bezkontaktnykh elektromagnitnykh metodiv neruinivnogo kontroliu yakosti trub. [Possibility of non-contact electromagnetic methods for non-invasive control of pipe quality]. *UkrNDIgaz. Vyp. KhKhVIII. Diahnostuvannia truboprovodiv, tekhnolohichnogo i enerhomekhanichnogo obladnannia naftovoii ta hazovoii promyslovosti*. UkrNDIHaz. P. 102–109. [in Ukrainian].
19. Suchkov, H.M., & Salam, Bussi. (2020). Elektromagnitno-akustychni peretvoriuvachi z impulsnymy dzherelamy poliaryzuiuchoho magnitnogo polia. [Electromagnetic-acoustic reversals with pulsed jets of a polarizing magnetic field]. *Tekhnichna diahnostryka i neruinivnyi kontrol*. No 1. P. 1–6. [in Ukrainian].
20. Troitskyi, V.O. (2023). Monitorynh stanu konstruksii (vvedennia v profesiiu). [Monitoring the condition of structures (introduction to the profession)]. *Tekhnichna diahnostryka ta neruinivnyi kontrol*. No 3. P. 60. [in Ukrainian].
21. Tsapenko, V.K., & Kuts, Yu.V. (2010). Osnovy ultrazvukovoho neruinivnogo kontroliu: pidruchnyk. [Basics of ultrasonic non-invasive testing: handyman]. Kyiv: NTUU “KPI”. 448 p. [in Ukrainian].
22. Beaujard, L., Mondot, I., & Vinot, J. (1970). La metode Ralus de sondage ultrasonore automatique du champignon des rails. *Revue generale des fer*. No 1. P. 13. [in French]
23. Boughedda H., Hacib T., Chelabi M., Acikgoz H., Le Bihan Y. (2015). Electromagnetic Acoustic Transducer for Cracks Detection in Conductive Material. 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1–4. DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416717. IEEE Conference Publications [in English]
24. Sait kompanii International Rectifier [elektronnyi resurs]. Retrieved from: <https://datasheetspdf.com/pdf/643573/InternationalRectifier/IRLB3036PBF/1/>. (Data zvernennia: 19.09.2021) [in English]
25. Jianpeng, He, Steve Dixon, Samuel Hill, Ke Xu. (2017). A New Electromagnetic Acoustic Transducer Design for Generating and Receiving S0 Lamb Waves in Ferromagnetic Steel Plate. *Sensors*, iss. 17(5). Pp. 10–23. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/s17051023> [in English]
26. Matthias Sehera, Peter B. Nagy (2016). On the separation of Lorentz and magnetization forces in the transduction mechanism of Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs). *NDT & E International*. Vol. 84. Pp. 1–10 [in English]
27. Plesnetsov, S.Yu., Petrishchev, O.N., Mygushchenko, R.P., Suchkov, G.M., Sotnik, S.V., & Kropachek, O.Yu. (2018). Powerful Sources of Pulse High-frequency Electromechanical Transducers for Measurement, Testing and Diagnostics. *Електротехніка і Електромеханіка*. No2. P. 31–35 [in English]
28. Hirotsugu Ogi, Masahiko Hirao, & Toshihiro Ohtani. (1998). Line-focusing of ultrasonic SV wave by electromagnetic acoustic transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*. N 1. Volume 103. Issue 5. Pp. 2411–2415. doi.org/10.1121/1.422760 [in English]
29. Ohtsuka, Y., Yoshimura, T., & Ueda, Y. (2007). P2E-6 New Design of Electromagnetic Acoustic Transducer for Precise Determination of Defect. *IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*. Pp. 1609–1612. DOI: 10.1109/ULTSYM.2007.405 [in English]
30. Riichi Murayama, Kazuo Fujisawa, Hidekazu Fukuoka et Masahiko Hirao (1996). Development of an on-line Evaluation System of Formability in Cold-Rolled Steel Sheets Using Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs)", *NDT&E International*, Vol, 29, No. 3, pp. 141–146. doi.org/10.1016/0963-8695(94)00008-5 [in English]
31. Sait kompanii NORDINKRAFT [elektronnyi resurs]. Retrieved from: www.nordinkraft.de/. (Data zvernennia: 08.05.2020). [in English]
32. Salam Bussi, Suchkov, G., Mygushchenko, R., Kropachek, O., & Plesnetsov, S. (2019). Electromagnetic-acoustic Transducers for Ultrasonic Measurements, Testing and Diagnostics of Ferromagnetic Metal Products. *Ukrainian Metrological Journal*, No 4, pp. 41–49. Retrieved from: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2019.195956> [in English]
33. Strizhak, V.A., & Pryakhin, A.V. (2023). Devices and Methods of *Measurements*. Vol.14. No 2. Pp. 81–95 [in English]
34. Suchkov, G.M., Bolyukh, V.F., Kocherga, A.I., Mygushchenko, R.P., & Kropachek, O.Yu. (2023). Increasing the Efficiency of the Surface-Mounted Ultrasonic Electromagnetic-Acoustic Transducer Due to the Magnetic Field Source. *Технічна електродинаміка*. No 2. P. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/techne2023.02.003> [in English]
35. Suchkov, G.M., Taranenko, Yu.K., & Khomyak, Yu.V. (2016). A Non-Contact Multifunctional Ultrasonic Transducer for Measurements and Non-Destructive Testing. *Measurement Techniques*. No 12. Vol. 59, Iss. 9, Pp. 990–993. DOI:10.1007/s11018-016-1081-3 [in English]