УДК 620.179.14 DOI: https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.01

ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ

Частина 2. Удосконалення та експериментальні дослідження магнітострикційного методу ультразвукового контролю з малоапертурними перетворювачами

В.П. Бабак[1], І.В. Богачев[1], О.Л. Декуша[1], С.І. Ковтун[1], Ю.В. Куц[1,2], С.В. Созонов[1]

[1]Інститут загальної енергетики НАН України. 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 172
[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: y.kuts@ukr.net

У першій частині статті було проаналізовано сучасні тенденції використання магнітострикційних ефектів у неруйнівному контролі та вимірювальній техніці. Аналіз публікацій з цієї проблематики засвідчив підвищення зацікавленості дослідників у поглибленому вивченні можливостей магнітострикційних ефектів як основи для розроблення нових методів ультразвукового неруйнівного контролю (УНК). Було зазначено, що перспективним напрямом досліджень є створення методів та засобів УНК на основі малоапертурних магнітострикційних перетворювачів (ММП). Такі перетворювачі дають змогу здійснювати контроль об'єктів складної геометрії, за сухого контакту з ММП та у широкому діапазоні температури об'єктів контролю. Дана стаття присвячена питанням розроблення засобів УНК із використанням ММП, дія яких ґрунтується на ефектах Джоуля та Вілларі, і дослідженню можливостей їх застосування в задачах УНК. Зокрема розглянуто особливості конструкцій ММП, їхні характеристики, особливості формування сигналів випромінюючих і приймаючих перетворювачів. Для проведення експериментальних випробувань використано оригінальну систему УНК із частотою сигналів 0,5 МГц, що дало змогу оцінити можливості розробленого методу УНК на тестових зразках у вигляді металевих пластин із дефектами у формі отворів різного діаметру та контролю дефектів зварних з'єднань. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 17.

Ключові слова: ультразвуковий неруйнівний контроль, магнітострикційні ефекти, малоапертурні магнітострикційні перетворювачі

Вступ. Ультразвуковий неруйнівний контроль (УНК) є загальновизнаним як один із найінформативніших методів дослідження матеріалів і конструкцій [1, 2]. Цей вид контролю широко використовується в різних галузях промисловості, енергетиці, на транспорті тощо. Зокрема методи УНК є важливим інструментом для забезпечення надійності та безпеки авіаційної техніки, починаючи від створення та дослідження характеристик авіаційних матеріалів [3, 4] і до оцінювання якості конструкційних елементів авіаційної техніки в процесі експлуатації [5].

Прогрес у розвитку інформаційно-вимірювальних технологій та цифрового опрацювання сигналів дають змогу розкрити нові можливості цього виду контролю та розширювати сфери його застосування. Усе це сприяє тому, що питання розроблення та впровадження нових технологій УНК залишається галуззю наукових досліджень, яка динамічно розвивається. Останнім часом приділяється значна увага питанню вдосконалення методів УНК, що ґрунтуються на магнітострикційних ефектах [6–8]. У першій частині статті [9] було зроблено висновок, що в рамках цього напряму досліджень перспективним питанням є розроблення методу та засобу УНК на основі малоапертурних магнітострикційних перетворювачів (ММП).

Метою статті є взагальнення досліджень авторів, спрямованих на вдосконалення магнітострикційного методу УНК за рахунок поліпшення конструкції ММП і покращення способів формування та опрацювання сигналів ММП, створення на цій основі лабораторного стенду та експериментальні дослідження можливостей цього методу.

Аналітична частина. ***Загальна характеристика ефектів Джоуля та Вілларі.*** Під магнітострикцією розуміють деформацію тіл при зміні їхнього магнітного стану, яка найбільш відчутно проявляється в тілах із феромагнітних матеріалів і феритів. У разі намагнічування тіл у зовнішньому знакозмінному магнітному полі виникає їхня механічна деформація – розтягування та стискання, що призводить до виникнення ультразвукових коливань. Сучасна теорія магнетизму дає таке пояснення цьому явищу: під впливом зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів перебудовуються, орієнтуючись у напрямку поля, що

Авторське право © Автор(и)
© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026
Це стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

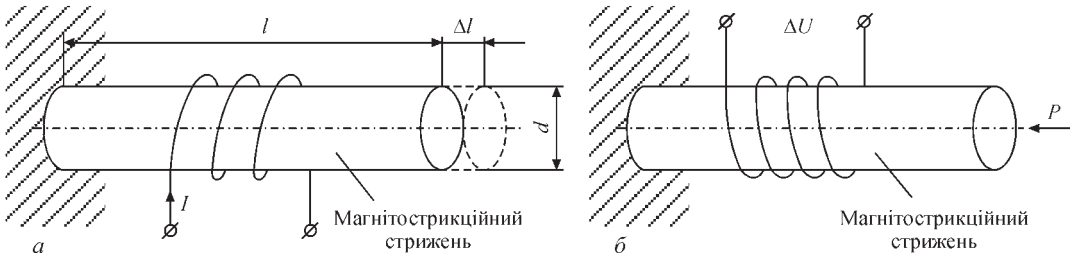

Рис. 1. Ілюстрація дії ефектів Джоуля та Вілларі

викликає зміну міжатомних відстаней і, відповідно, викривлення кристалічної решітки матеріалу.

Фізичний ефект, відомий як ефект лінійної магнітострикції, було відкрито в 1842 р. відомим англійським фізиком Д.П. Джоулем [11]. Суть ефекту Джоуля ілюструє рис. 1, *а*. Якщо через котушку збудження, намотану на стрижень із магнітострикційного матеріалу завдовжки l і діаметром d, пропустити електричний струм I, то в стрижні виникне поздовжнє магнітне поле, під впливом якого останній змінить свою довжину на величину Δl. Однією з основних характеристик магнітострикційного матеріалу є відносна магнітострикція $\delta(B)$, яка визначається виразом:

$$\delta(B) = \Delta l(B)/l, \qquad (1)$$

де B – магнітна індукція в стрижні.

Магнітострикція перетворює змінне магнітне поле в механічні коливання, які поширюються як ультразвукові хвилі. Згенеровані у такий спосіб ультразвукові коливання можна використовувати для неруйнівного контролю матеріалів. Коли ультразвукові хвилі поширюються через матеріал об'єкту контроля (ОК), вони відбиваються від дефектів або неоднорідностей, таких як тріщини чи пори. Магнітострикційний метод дає змогу отримувати відбиті від неоднорідностей хвилі або фіксувати зміни коефіцієнта акустичного тракту і в такий спосіб виявляти дефекти всередині матеріалу.

Магнітний стан феромагнетика визначається не тільки магнітним полем, але й зовнішніми пружними напруженнями, які діють на стрижень. Магнітопружний ефект, який називають зворотним магнітострикційним ефектом, виникає внаслідок взаємозв'язку між пружними напруженнями та зміною намагніченості матеріалу стрижня. Зворотним ефектом для лінійної магнітострикції є магнітопружний ефект або ефект Вілларі (рис. 1, *б*), який був відкритий у 1865 р. італійським фізиком Е. Вілларі [9]. Ефект пояснюється тим, що внаслідок дії механічних напружень у матеріалі стрижня змінюється його доменна структура, отже й намагніченість, внаслідок чого на електричній котушці з'являється електрорушійна сила (е.р.с.) ΔU. Цей ефект використовується в ММП для приймання ультразвукових хвиль після поширення в ОК.

Для практичного використання розглянутих ефектів необхідно взяти до уваги той факт, що залежність між магнітною індукцією та механічною деформацією у магнітострикційному матеріалі має нелінійний характер [16], що потребує додаткових заходів для лінеаризації магнітострикції. Остання здійснюється шляхом створення постійної магнітної індукції в матеріалі стрижня, що можна виконати за допомогою постійних магнітів, або додатковою котушкою, яка живиться постійним струмом, або за рахунок залишкової намагніченості матеріалу стрижня. За одночасної дії постійної B_0 та змінної $B_{\sim}$ магнітної індукції у стрижні виникають механічні коливання такої самої частоти, що й частота $B_{\sim}$ (рис. 2, де H_0 та $H_{\sim}$ – напруженості постійної та змінної складової зовнішнього магнітного поля відповідно).

Лінеаризація магнітострикції спрямована на виведення магнітомеханічної залежності магнітострикційного матеріалу з квадратичної зони, яка має місце в околі значення $B_0 = 0$. Якщо $B_0 >> B_{\sim}$, між механічними та магнітними змінними існує співвідношення, близьке до лінійного. Саме ці два ефекти – Джоуля та Вілларі покладені в основу створення ММП.

Формулювання вимог до ММП та їхня реалізація. Різні аспекти створення ММП розглядались авторами в [13–15]. Нижче узагальнено вимоги до ММП, особливості їхньої конструкції та пов'язану з цим специфіку формування сигналів ММП.

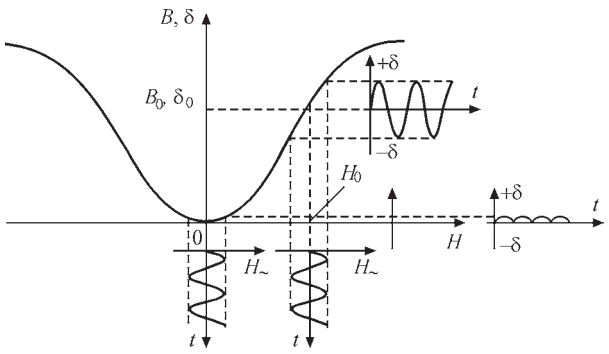

Рис. 2. Залежність відносної магнітострикції від підмагнічування матеріалу стрижня

Вимоги до ММП. При створенні ММП було необхідно вирішити низку завдань:

– підібрати магнітострикційний матеріал для хвилеводу;

– забезпечити малу апертуру перетворювача;

– вжити заходів до підвищення коефіцієнта електромагнітного перетворення;

– забезпечити лінеаризацію магнітострикції;

– мінімізувати шуми ММП-приймача;

– електрично узгодити перетворювачі з електронними блоками.

Компромісним варіантом між забезпеченням найкращих магнітострикційних характеристик і можливостями практичної реалізації ММП є використання в якості матеріалу осердя сплаву пермендюр 49КФ, який має один із найбільших серед інших матеріалів коефіцієнт магнітомеханічного зв'язку. Інші важливі характеристики цього матеріалу мають такі значення: щільність – $\rho_{\text{п}} = +8200$ кг/м^3; модуль Юнга (поздовжньої пружності) – $Y^{\text{Ю}} = 2{,}05 \cdot 10^{11}$ Па; швидкість поздовжньої хвилі – $c_l = 5200$ м/с; відносна магнітна проникність – $\mu^* = 200$; коерцитивна сила – $H_c = 140$ А/м; індукція насичення – $B_S = 2{,}4$ Тл; питомий електричний опір – $\rho_{\text{ел}} = 3{,}4 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; температура Кюри – $\theta = 980$ °С; раціональне поле підмагнічування – $H_{\text{п}} = (0{,}4...0{,}6) \cdot 10^3$ А/м.

У представленій розробці використано пружні коливання частотою 0,5 МГц, для якої довжина хвилі у пермендюрі становить $\lambda_{\text{п}} = c_l / f = 5200/500000 = 10{,}4$ мм. Під апертурою ММП розумітимемо діаметр його хвилеводу. Саме цей параметр визначає площу плоскої ділянки на поверхні ОК, що контактує з хвилеводом ММП, через яку передається/приймається енергія пружної хвилі. Діаметр осердя обраний рівним $d = 1$ мм, що задовольняє умові $d_{\text{с}} << \lambda_{\text{п}}$, а відповідна площа контактної площадки – 0,785 мм^2. Власне це й дає підстави називати такі перетворювачі малоапертурними.

Підвищення коефіцієнта електромагнітного перетворення здійснюється за рахунок використання двосекційної котушки збудження з рознесенням секцій на відстань $\lambda_{\text{п}}/2$ (рис. 3) і включеними назустріч. У цьому випадку при живленні котушки ММП-передавача радіоімпульсним сигналом амплітуда сумарного струмового сигналу в середній частині подвоюється, що веде до збільшення у ~2 рази змінної складової магнітного поля у хвилеводі без збільшення амплітуди струму збудження. Побічним негативним наслідком такого прийому є збільшення тривалості радіоімпульсу.

Лінеаризація магнітострикції забезпечується за допомогою підмагнічування хвилеводу постійним магнітом (на рисунку не показаний). Оскільки електрична котушка на феромагнітному осерді являє собою антену, то котушка ММП-приймача також виконана двосекційною (рис. 3), що забезпечує зменшення впливу зовнішніх завад і шумів. Ефект заглушення шуму пояснює еквівалентна електрична схема (рис. 4), яка містить послідовно ввімкнені е.р.с. сигналу $U_{\text{с1}}$, $U_{\text{с2}}$ та шуму $U_{\text{ш1}}$, $U_{\text{ш2}}$, які виникають у секціях котушки ММП-приймача та які навантажені на опір $R_{\text{н}}$. Схема складена з урахуванням включення назустріч секцій котушки та їх рознесенням у просторі на величину $\lambda_{\text{п}}/2$. Двосекційне виконання котушки ММП-приймача забезпечує не тільки додаткове збільшення корисного сигналу за рахунок синфазного включення е.р.с. $U_{\text{с1}}$, $U_{\text{с2}}$, але й значне заглушення шуму за рахунок протифазного включення е.р.с. $U_{\text{ш1}}$, $U_{\text{ш2}}$.

Експериментально було доведено, що використання багатошарових котушок ММП є малоефективним. Тому котушки ММП виконані одношаровими та містять усього декілька десятків витків, а їхній електричний імпеданс може становити 1…20 Ом. Узгодження низькоомного імпедансу ММП з високоомним імпедансом електронного блоку (зазвичай становить 50…8000 Ом) здійснюється за допомогою трансформаторів, які розташовуються у перетворювачі поблизу котушок ММП.

Конструкція ММП. Конструкція ММП у цілому подібна до наведеної в [10–12] (рис. 5). Розміри хвилеводу: діаметр 1 мм, довжина 60 мм. У конструкції ММП поглинаюче навантаження *7* введене з метою виключення перевідбиття ультразвукових коливань від неробочого кінця хвилеводу. Решта елементів конструкції визначається вимогами до ММП, розглянутими раніше. Результати

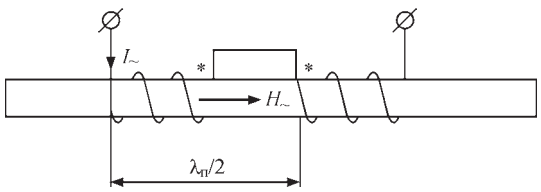

Рис. 3. Електричне підключення та розташування котушок на хвилеводі

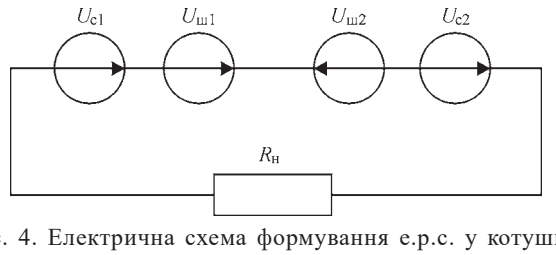

Рис. 4. Електрична схема формування е.р.с. у котушках ММП-приймача

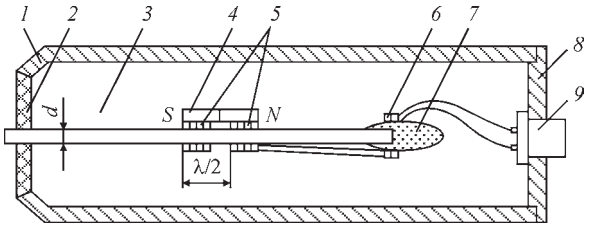

Рис. 5. Конструкція ММП: *1* – корпус, *2* – ультразвукове дзеркало, *3* – хвилевід, *4* – постійний магніт, *5* – електричні котушки, *6* – трансформатор, *7* – поглинаюче навантаження, *8* – кришка, *9* – роз'єм

вимірювання параметрів котушки ММП наведено в табл.1.

Вимірювання виконувалось вимірювачем RLC імпедансу UNI-T UT-612. Згідно з даними табл. 1 модуль комплексного опору котушки ММП не перевищує 4,2 Ом, тобто являє собою низькоомне навантаження. Узгодження перетворювача з електронними блоками системи виконано за допомогою трансформаторів. Малі розміри контактної площадки, через яку вводяться ультразвукові коливання в ОК, визначаються діаметром хвилеводу, що дає змогу виконувати дослідження на ОК зі складною геометрією поверхні.

Формування сигналу ММП-випромінювача та його спектральний аналіз. З метою більш обґрунтованого формування вимог до електронних блоків розроблюваної апаратури було проведено аналіз сигналів ММП. В якості сигналу збудження прийнято радіоімпульс, отриманий із гармонічної напруги $\sin(2\pi ft)$, $t \in (-\infty, \infty)$ амплітудою 1 В і частотою f = 0,5 МГц, який представляється наступною моделлю:

$$u(t,\tau) = I(\tau)\sin(2\pi ft), \quad \tau, t \in (-\infty, \infty), \qquad (2)$$

де T – період сигналу-носія (T = 2 мкс), $I(\tau)$ – індикаторна функція:

$$I(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau \in [0,\ 2T), \\ 0, & \tau \notin [0,\ 2T]. \end{cases} \qquad (3)$$

У дискретному представленні сигнал (2) подається вибірками, отриманими із частотою дискретизації – 64 МГц (128 точок на період сигналу-носія), відповідно період дискретизації – 15,625 нс (рис. 6, *а*). Аналізована ділянка сигналу (2) обмежена інтервалом $4T$ = 8 мкс.

З урахуванням того, що довжина однієї секції котушки збудження дорівнює $\lambda_п/4$ (тобто співставна з довжиною хвилі у хвилеводі), відносна магнітострикція хвилеводу $\delta(t)$ визначалась суперпозицією сукупності дій одновиткових котушок із різним просторовим положенням. У розрахунковій моделі прийнято, що котушка збудження має 32 витки, а її довжина $\lambda_п/4 = 2{,}6$ мм. Враховуючи ці дані та беручи до уваги, що відносна магнітострикція $\delta(t)$ як функція часу формується одночасно сигналами двох секцій котушок збудження (рис. 3), її аналітичне представлення має вигляд:

$$\delta(t) = K_{мп}\left[\sum_{g=1}^{32} I\left(t - \frac{T}{128}g\right)\sin\left(2\pi f\left(t - \frac{T}{128}g\right)\right) - \right.$$
$$\left. - \sum_{g=1}^{32} I\left(t - \frac{T}{64}\left(1 + \frac{g}{2}\right)\right)\sin\left(2\pi f\left(t - \frac{T}{64}\left(1 + \frac{g}{2}\right)\right)\right)\right], \qquad (4)$$

де $K_{мп}$ – коефіцієнт перетворення напруги у відносну магнітострикцію (у виконаних модельних експериментах прийнято $K_{мп} = 10^{-3}$ В$^{-1}$). Графік функції $\delta(t)$ представлено на рис. 6, *б*.

Деформація стрижня ММП (4) збуджує в ОК короткий ультразвуковий імпульс (хвильовий пакет), який поширюється в ОК і перетворюється у ММП-приймачі у відповідний електричний сигнал. Оскільки цей сигнал близький за формою до функції $\delta(t)$, для його аналітичного представлення можна використати модель вузькосмугового сигналу [18], яка в загальному вигляді та цифровій формі подання надається виразом:

$$u[j] = U[j]\cdot\cos(\Phi[j]), \quad j = \overline{1, J}, \qquad (5)$$

де $U[j]$ – обвідна сигналу, $\Phi[j]$ – фаза сигналу (середня частота несучої радіоімпульсу близька до значення f).

Під час поширення ультразвукової хвилі в ОК її обвідна та фаза піддаються модуляції внаслідок неоднорідності характеристик матеріалу ОК та особливостям його геометрії, внаслідок чого функції $U[j]$ та $\Phi[j]$ набувають інформаційної змістовності. Крім того, інформаційним параметром може бути затримка τ сигналу (5) відносно сигналу збудження ММП-випромінювача (2).

Таблиця 1. Параметри котушки ММП

Об'єкт вимірювання	Індуктивність, мкГн	Опір, Ом
Одна секція котушки ММП	12,3	0,38
Двосекційна котушка ММП	8,2	0,72

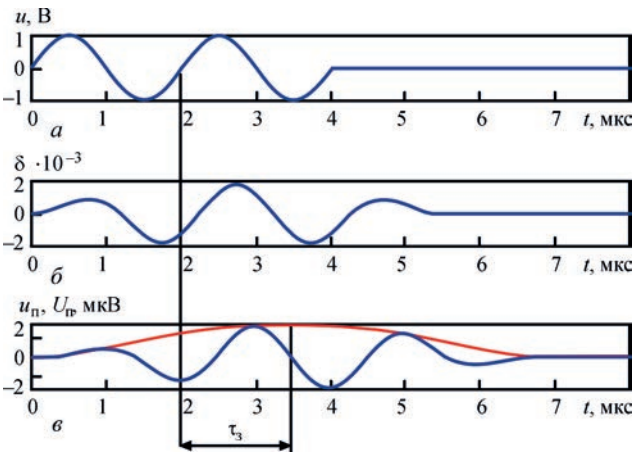

Рис. 6. Графіки модельних сигналів ММП

Формування сигналів ММП-приймача в акустичному тракті. Особливістю ММП-випромінювача є те, що він у першому наближенні може розглядатись як точковий випромінювач [16]. При взаємодії ММП з ОК в останньому можуть збуджуватись різні типи хвиль – поздовжні, поперечні, нормальні та ін., які мають різні властивості [17]. Практичне використання ММП потребує коректного врахування типу хвиль, умов їхнього збудження, дисперсії, швидкості їхнього поширення в ОК тощо. Для розроблення та обґрунтування методик контролю особливо важливим є врахування дисперсії хвиль, тобто залежності їхньої фазової швидкості $c_{\text{ф}}$ від частоти. Під фазовою швидкістю розуміється швидкість переміщення в просторі фази гармонічного коливання [17]. Фазова швидкість виражається через частоту f, довжину хвилі λ та хвильове число $k = 2\pi/\lambda$ наступним чином:

$$c_{\text{ф}} = f\lambda = 2\pi f/k = \omega/k. \qquad (6)$$

Локалізований у часі та просторі хвильовий пакет (рис. 6, *б*) поширюється з груповою швидкістю $c_{\text{гр}}$. За відсутності дисперсії $c_{\text{гр}} = c_{\text{ф}}$. Чим коротше хвильовий пакет, тим ширший його спектр. За наявності дисперсії різні частотні компоненти хвильового пакету поширюються з різними фазовими швидкостями, тому $c_{\text{гр}} \neq c_{\text{ф}}$, що, зокрема, має місце у випадку використання нормальних хвиль.

Розглянемо два випадки поширення в ОК ультразвукової хвилі з дисперсією та без дисперсії швидкості.

1. ММП-випромінювач в ОК може збуджувати такі типи хвиль, що поширюються в ОК без дисперсії швидкості [16]:

– поздовжню хвилю (розтягання-стискання), що поширюється в середовищі зі швидкістю:

$$c_l \cong \sqrt{Y^{\text{Ю}}/\rho}; \qquad (7)$$

– поперечну (зсувну) хвилю:

$$c_t \cong \sqrt{G/\rho}; \qquad (8)$$

– поверхневу хвилю (хвилю Релея):

$$c_R \cong \frac{0{,}87 + 1{,}12\nu}{1+\nu} c_t, \qquad (9)$$

де G – модуль зсуву, ρ – густина речовини, ν – коефіцієнт Пуассона.

Для цих типів хвиль дисперсія швидкості не спостерігається.

За використання цих типів хвиль у ММП-приймачі пружні коливання середовища перетворення в напругу відбуваються в спосіб, аналогічний перетворенню в ММП-випромінювачах (тільки у зворотному напрямі). За відсутності дисперсії швидкості сигнал на виході ММП-приймача $u_{\text{п}}(t) = u_{\text{п}}\left[\left(jT_{\text{д}}\right)\right]$, $j = \overline{1, J}$ та його обвідна $U_{\text{п}}(t) = U_{\text{п}}\left[jT_{\text{д}}\right]$, $j = \overline{1, J}$, за прийнятих у моделі значень $K_{\text{мп}} = 10^{-3}$ В та коефіцієнта акустичного тракту $K_{\text{ат}} = 1$, представлено на рис. 6, *в* (відповідно криві *1* та *2*). Визначення обвідної сигналу відбувається за допомогою дискретного перетворення Гільберта (ДПГ) [19], що реалізується оператором $\mathbf{H}_{\text{д}}$. Останній дає змогу отримати Гільберт-образ вибірки $\tilde{u}_{\text{п}}[j] = \mathbf{H}_{\text{д}}\left(u_{\text{п}}[j]\right)$.

Значення оцінок обвідної сигналу для всіх точок вибірки обчислюються як:

$$U_{\text{п}}[j] = \sqrt{u_{\text{п}}^2[j] + \tilde{u}_{\text{п}}^2[j]},\ j = \overline{1, J} \qquad (10)$$

Аналіз сигналу ММП-приймача та його обвідної дає змогу зробити такі висновки:

– Максимальне значення амплітуди сигналу збільшилось у ~3,4 рази.

– Тривалість прийнятого сигналу збільшилась на один період і становить 3Т.

– Центр обвідної прийнятого сигналу змістився в часі на величину $\tau_{\text{з}} \approx 0{,}75T$ (без урахування затримки в хвилеводах перетворювачів).

– Перша й остання півхвилі прийнятого сигналу мають збільшену на величину $0{,}125T$ тривалість.

Фрагмент спектру Фур'є *X*(*f*) отриманої моделі сигналів ММП-приймача представлено на рис. 7 (інтервал між гармоніками спектру становить 125 кГц). Виявлені особливості модельних сигналів ММП-приймача необхідно враховувати при оцінюванні параметрів реальних сигналів.

2. ММП-випромінювач в обмежених середовищах – пластинах і шарах може збуджувати нормальні хвилі (хвилі Лемба). Пластиною вважається ОК, що має дві ненавантажені плоско-паралельні поверхні та товщину, яка є співставною з довжиною поперечної хвилі. Хвилі Лемба мають дисперсію швидкості [16, 20]. Наприклад, швидкість поширення фази гармонічної нормальної симетричної хвилі нульової моди вздовж поверхні пластини дорівнює:

$$c_{Ns_0} = \frac{\pi h}{\lambda}\sqrt{Y^{\text{Ю}}/\rho} \qquad (11)$$

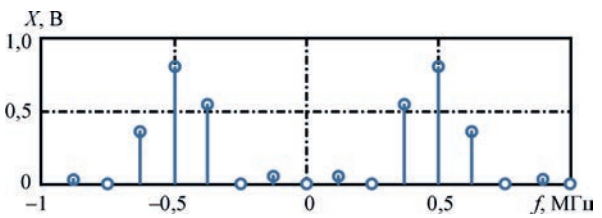

Рис. 7. Фрагмент спектру Фур'є сигналів ММП-приймача

Саме залежність швидкості c_{Ns_0} від довжини хвилі (отже й від частоти ультразвукових коливань) свідчить про дисперсію швидкості цих хвиль. У хвильовому пакеті, що поширюється в ОК, присутні коливання декількох складових із діапазону в околі несучої частоти ω (рис. 6). У такому хвильовому пакеті з достатньо вузьким спектром та за умови незначних відмінностей фазових швидкостей його гармонічних складових і не дуже великих відстаней форма обвідної хвильового пакету спотворюється не так помітно, а дисперсійні властивості середовища позначаються лише на швидкості переміщення у просторі обвідної, яка визначається груповою швидкістю хвилі [17]:

$$c_{\text{гр}}(\omega) = \frac{d\omega}{dk} \qquad (12)$$

При цьому сама хвиля «біжить» всередині обвідної з фазовою швидкістю $c_{\text{ф}} = \omega/k$ (6), яка відповідає частоті сигналу-носія (рис. 8).

Зв'язок між фазовою та груповою швидкостями хвильового пакету отримується шляхом диференціювання виразу (12) по k з урахуванням (6):

$$c_{\text{гр}}(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d\left(c_{\text{ф}}k\right)}{dk} = c_{\text{ф}} + k\frac{dc_{\text{ф}}}{dk} = c_{\text{ф}} - \lambda\frac{dc_{\text{ф}}}{d\lambda} \qquad (13)$$

Співвідношення (13) підтверджує той факт, що за відсутності дисперсії маємо $c_{\text{гр}} = c_{\text{ф}}$. У випадку нормальної дисперсії, тобто за виконання умови $c_{\text{гр}} < c_{\text{ф}}$, і при поширенні хвильового пакету в просторі в його «хвостовій» частині виникатимуть усе нові максимуми та мінімуми, які зі зміною відстані x переміщатимуться в напрямку його головної частини.

Модульована хвиля (немонохроматична), на відміну від монохроматичної хвилі, має здатність передавати певну інформацію і ця передача здійснюється зі швидкістю $c_{\text{гр}}$. Цей факт необхідно враховувати в методиках опрацювання сигналів ММП-приймача при використання хвиль Лемба.

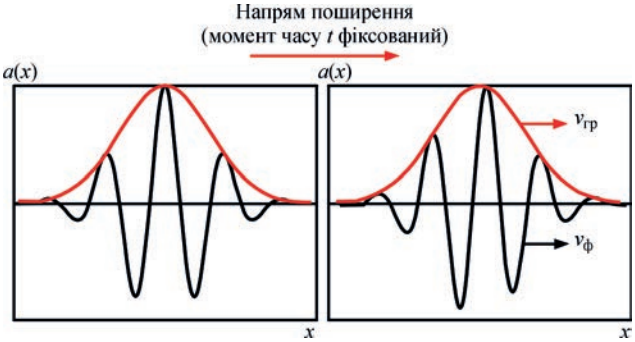

Рис. 8. Поширення хвильового пакету в дисперсійному середовищі

Експериментальна частина. ***Структура лабораторного стенду для дослідження магнітострикційного методу УНК з ММП.*** Структуру лабораторного стенду УНК з ММП наведено на рис. 9.

Стенд забезпечує формування сигналу ММП-випромінювача, первинне опрацювання сигналів ММП-приймача, виділення, аналіз і збереження інформаційних параметрів цих сигналів. Стенд складається із закріплених у спеціальному тримачі випромінюючого та приймаючого ММП, модуля формування та попереднього опрацювання сигналів ММП та апаратно-програмного модуля. До складу першого модуля входять: генератор радіоімпульсного сигналу, що забезпечує збудження акустичної хвилі у ММП-випромінювачі; підсилювач сигналів ММП-приймача (сенсора) та аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Оцифровані дані передаються в апаратно-програмний модуль, де відбувається формування вибірки інформативного сигналу, її фільтрація, оцінювання параметрів сигналу, відображення результатів та їхнє збереження.

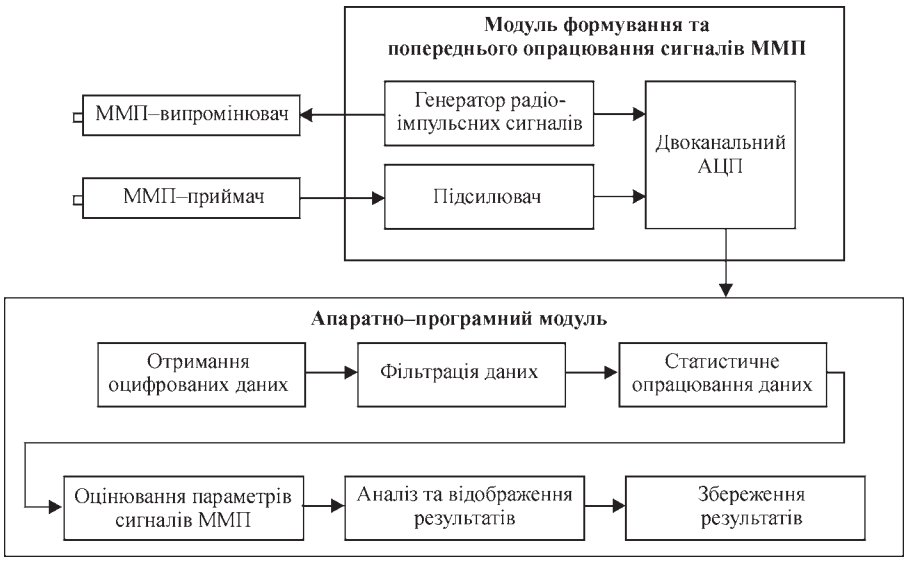

Рис. 9. Структура лабораторного стенду УНК з ММП

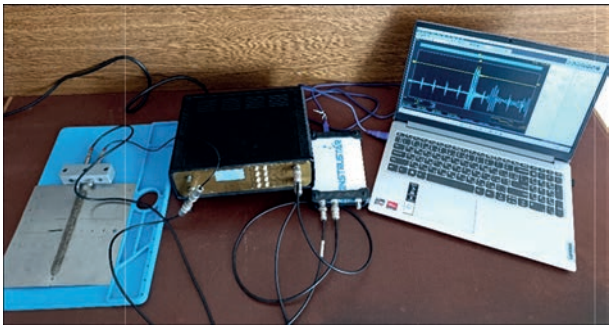

Рис. 10. Загальний вигляд лабораторного стенду УНК з ММП

Таблиця 2. Основні технічні характеристики лабораторного стенду

Робоча частота перетворювачів, МГц	0,5
Частота зондуючих імпульсів, Гц	1 … 100
Напруга на випромінювачі, В	0 … 10 на навантаженні 0,5 Ом
Форма зондуючих імпульсів	радіоімпульс
Коефіцієнт підсилення підсилювача	до 5000
Розрядність АЦП	12 дв. розрядів
Вхідний імпеданс АЦП	опір 1 МОм, ємність 25 пФ
Кількість каналів АЦП	2
Максимальна частота дискретизації АЦП	200 МГц
Джерело живлення системи	мережа 230 В, 50 Гц

Загальний вигляд лабораторного стенду УНК з ММП і тестовий зразок наведено на рис. 10. Технічні характеристики лабораторного стенду наведено в табл. 2.

Експериментальне дослідження можливостей магнітострикційного методу УНК на тестових зразках. Проведено дослідження поширення ультразвукових хвиль у зразках сталі 3 у формі пластин різної товщини з розмірами 100×50×1 мм, 100×50×2 мм, 100×50×2,5 мм з метою встановлення залежності між товщиною пластин і характеристиками виміряного сигналу ММП-приймача. У випробуваннях проводилось визначення амплітуди сигналу у випадку його поширення в пластині на фіксовану відстань 25 мм, на якій встановлювались два ММП. Фрагменти отриманих сигналів і залежність максимального значення їхньої амплітуди від товщини зразка наведені відповідно на рис. 11, 12.

З аналізу наведеного на рис. 12 графіка встановлено, що амплітуда виміряного сигналу зменшується пропорційно збільшенню товщини досліджуваного зразка. Така залежність може бути використана для оцінювання корозійних уражень тонкостінних балонів і трубопроводів.

На тестовому зразку сталі 08кп розміром 200×200×0,5 мм (рис. 13), що містив штучні дефекти (отвори) різного діаметра (1, 2, 3 мм) було проведено дослідження поширення ультразвукових хвиль. Використовувався тіньовий метод

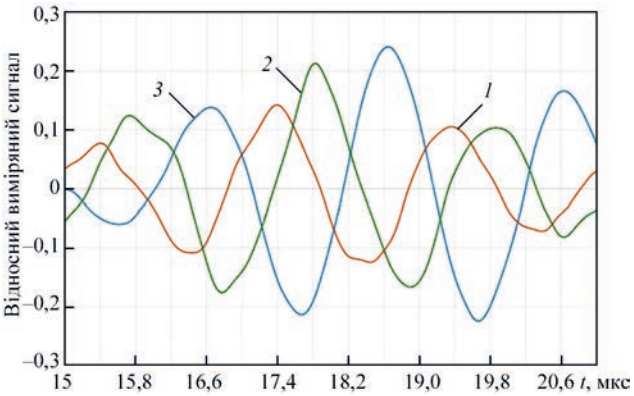

Рис. 11. Фрагменти сигналів ММП-приймача в досліді з пластинами із сталі 3 завтовшки: *1* – 2,5 мм, *2* – 2 мм, *3* – 1 мм

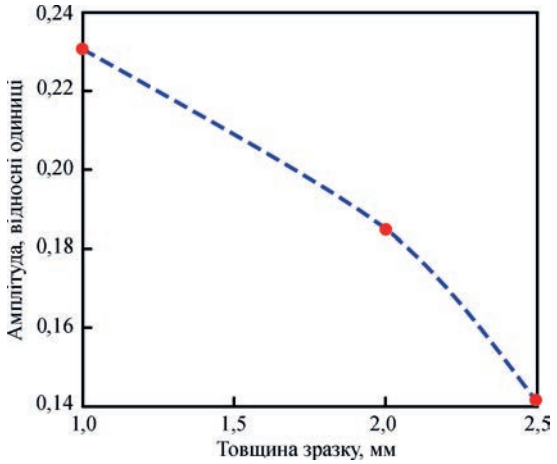

Рис. 12. Залежність максимальної амплітуди сигналу ММП-приймача від товщини зразка

УНК [2, 16], дефект розташовувався посередині між ММП-випромінювачем та ММП-приймачем, відстань між якими дорівнювала 25 мм.

Фрагменти отриманих сигналів ММП-приймача при прозвучуванні ділянок зразка з отворами різних діаметрів наведено на рис. 14, а на рис. 15 – залежність амплітуди сигналу від діаметра отворів.

Аналіз наведених на рис. 14, 15 даних засвідчив, що амплітуда виміряного сигналу зменшується пропорційно збільшенню діаметра отвору (1, 2, 3 мм). Цей результат є важливим для підтвердження можливості застосування тіньового методу із запропонованими ММП у задачі виявлення дефек-

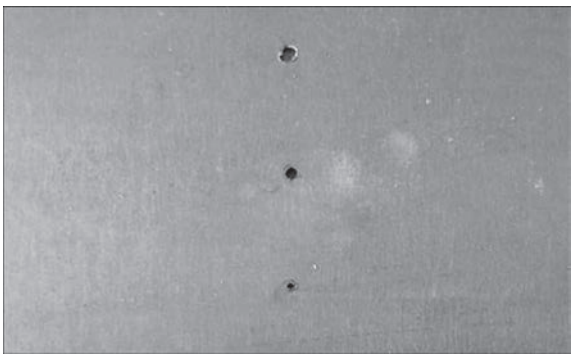

Рис. 13. Тестовий зразок сталі 08кп зі штучними дефектами – отворами діаметром 1, 2, 3 мм

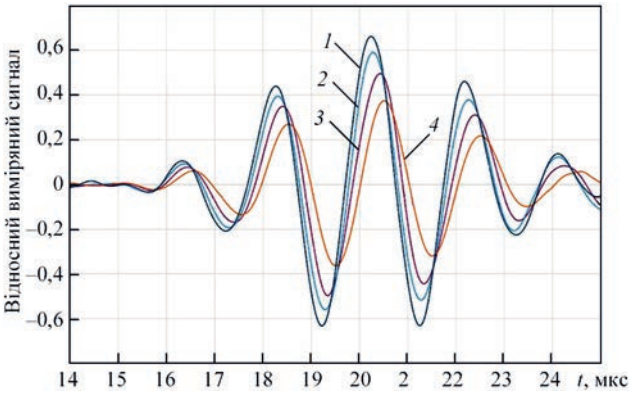

Рис. 14. Фрагменти сигналів ММП-приймача в зразку сталі марки 08кп з отворами різного діаметра: *1* – ізотропна, *2* – отвір 1 мм, *3* – отвір 2 мм, *4* – отвір 4 мм

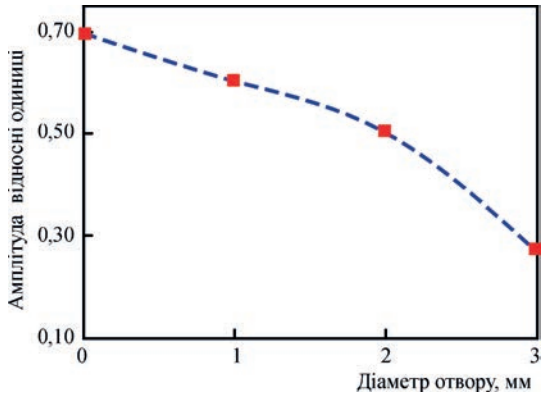

Рис. 15. Залежність амплітуди сигналу ММП-приймача від діаметра отворів

тів типу порожнин у тонких листах при розмірі дефектів менше за довжину хвилі у зразку, а також у задачі контролю зварних швів тонких листів. І в цьому випадку амплітуда сигналу ММП-приймача як інформаційна ознака виявилась чутливою до розмірів дефекту.

Апробація методу УНК із використанням ММП у задачі контролю дефектів зварних з'єднань металевих листів. Експериментальні дослідження було проведено на зразках тонких металевих листів зі зварним швом за відсутності

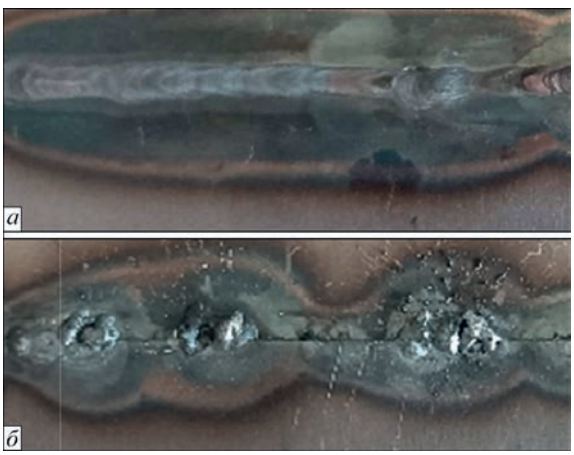

Рис. 16. Зразок зварного шва: *а* –ділянка без дефекту; *б* – ділянка з дефектом

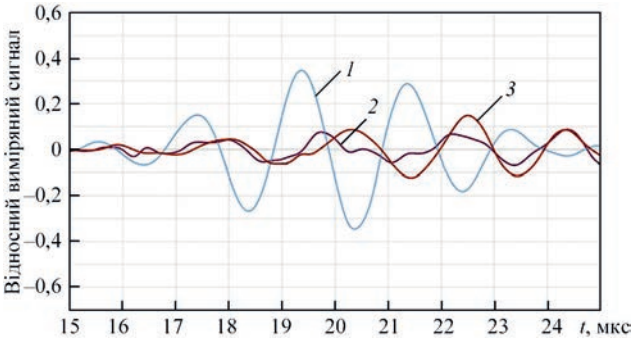

Рис. 17. Графіки сигналів ММП-приймача при контролі звареного з'єднання тонких металевих листів зразки зварного шва: *1* – без дефекту, *2*, *3* – з дефектом

(рис. 16, *а*) та наявності дефекту (рис. 16, *б*). Використовувався тіньовий метод УНК. Фрагменти графіків сигналів ММП-приймача наведено на рис. 17.

За результатами експерименту встановлено, що ультразвуковий сигнал проходить бездефектну ділянку зварного шва, практично не змінюючи форми сигналу та без додаткового зменшення амплітуди. Натомість дефекти у шві суттєво зменшують амплітуду прийнятого сигналу (більше ніж у 2 рази), що є надійною ознакою наявності дефекту.

При викладенні результатів експериментальних досліджень частково наведено матеріали [20].

Висновки

На теперішній час, у зв'язку з появою та використанням нових конструкційних матеріалів і технологій виготовлення виробів, необхідністю виявлення дефектів виробів на ранніх стадіях розвитку, проблема створення інноваційних методів УНК матеріалів і виробів є актуальною у всьому світі. До кола нових перспективних методів УНК належить метод, що ґрунтується на використанні малоапертурних магнітострикційних перетворювачів.

За результатами проведених модельних та експериментальних досліджень зроблено такі висновки.

1. Запропонований спосіб прямого та зворотного перетворення електричних та ультразвукових сигналів у ММП дає змогу підвищити ефективність перетворення, але разом з цим призводить до деформації ультразвукового сигналу та його додаткової затримки, що необхідно враховувати при опрацюванні сигналів ММП та оцінюванні їхніх інформативних параметрів – амплітуди, фази та затримки.

2. У дослідах на тестовому зразку у формі пластини зі сталі 08кп з отворами різного діаметра (1, 2, 3 мм) із застосуванням тіньового методу УНК встановлено обернено пропорційну залежність

амплітуди сигналу ММП-приймача від діаметра отвору.

3. Проведено експериментальні дослідження на зразках листової сталі 3 різної товщини (1, 2 та 2,5 мм), що дало змогу встановити залежність амплітуди сигналу ММП-приймача при поширенні ультразвукового коливання в зразку від товщини зразка: амплітуда сигналу зменшується обернено пропорційно товщині досліджуваного зразка.

4. Отримані результати контролю на зразках зварних з'єднань тонколистових матеріалів підтвердили можливість застосування методу УНК із використанням ММП у задачі виявлення дефектів у таких швах.

У подальшому планується проведення досліджень ефективності методу УНК з ММП для інших типів матеріалів і різних видів дефектів (тріщин, непроварів, розшарування тощо), а також дослідження особливостей використання затримки сигналів як інформаційної ознаки при використанні хвиль Лемба для розв'язання різних задач УНК.

Список літератури

1. Aquil Ahmad, Leonard J. Bond (2018) *Nondestructive evaluation of materials*, ASM Handbook, Vol. 17, Ninth Edition, American Society for Metals, ASM International.
2. Панасюк В.В. (2001) *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. Посібник.* Т.5: *Неруйнівний контроль і технічна діагностика.* Під ред. З.Т. Назарчука. Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
3. Панасюк В.В. (2007) *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник* / Т.9: *Міцність та довговічність авіаційних матеріалів та елементів.* Львів, Сполом.
4. Джала Р.М., Джала В.Р., Івасів І.Б. та ін. (2018) *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідниковий посібник у* 8 т. Т. 4: *Електрофізичні методи неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій.* Під ред. З.Т. Назарчука. Київ, Простір-М.
5. Коломійцев О.В., Комаров В.О. (2022) Економічний ефект і порівняння виявляння тріщин у силових елементах крила літака методами неруйнівного контролю. In: *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «International Scientific Innovations in Human Life»,* Manchester. https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-international-scientific-innovations-in-human-life-13-15-aprelya-2022-goda-manchester-v-elikobritaniya-arhiv
6. Kim, Y.Y., Kwon, Y.E. (2015) Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides. *Ultrasonics*, **62**, 3–19. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.015
7. Vinogradov, S., Fisher, J. (2018) *Review of guided wave testing using magnetostrictive Transducers.* 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden. https://www.ndt.net/article/ecndt2018/papers/ecndt-0486-2018.pdf
8. Vinogradov, S., Cobb, A., Fisher, J. (2018) New magnetostrictive transducer designs for emerging areas of NDE. *Materials*, **11**, 755. DOI: https://doi.org/10.3390/ma11050755
9. Бабак В.П., Богачев І.В., Декуша О.Л., Ковтун С.І. та ін (2025) Дослідження ультразвукового магнітострикційного методу ультразвукового контролю. Частина 1. Застосування магнітострикційних ефектів в системах вимірювання та неруйнівного контролю (Огляд). *Технічна діагностика та неруйнівний контроль,* **3**, 5–14. DOI: https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.01
10. Carlin, B. (1960) *Ultrasonics, Chapter 4, Magnetostriction*. Second edition. McGraw-Hill Book Company Inc., 93–125.
11. Бабак В.П., Бабак С.В., Берегун В.С. та ін. (2015) *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія.* Під ред. В.П. Бабака. Київ.
12. Babak, V.P., Bogachev, I.A. (2016) Small aperture magnetostrictive sensors for non-destructive testing. *«NDT days 2016», Sozopol, Bulgaria: Scientific Proceedings*, 1(**156**).
13. Bohachev, I.V., Babak, V.P., Zaporozhets, A.O. (2022) Novel small-aperture transducers based on magnetostrictive effect for diagnostic systems. *Tekhnichna elektrodynamika,* **3**, 69–78. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2022.03.069
14. Bohachev, I.V., Kovtun S., Kuts Y. et al. (2023) Enhanced phase method of signal detection for ultrasonsc magnetostriction defectoscopy of power equipment. *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*, 2(**73**), 72–82. DOI: https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072.
15. Цапенко В.К., Куц Ю.В. (2010) *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*. Київ, НТУУ «КПІ».
16. Crawford, F.S. (1966) *Waves.* Berkeley physics course. Vol. 3. McGraw-Hill.
17. Bendat, J., Piersol, A. (2010) *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. John Willey & Sons.
18. Poularikas, A. (2010). *Transforms and Applications Handbook*. CRC Press LLC.
19. Harb, M.S., Yuan, F.G. (2015) A rapid, fully non-contact, hybrid system for generating Lamb wave dispersion curves. *Ultrasonics,* **61**, 62–70. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.03.006
20. Kovtun, S.I., Bohachev, I.V., Dekusha, O.L. et al. (2025) Experimental research of the magnetostrictive method of ultrasonic nondestructive testing. *Bulgarian Society for NDT Int. J. «NDT Days»*. Vol. VIII, Issue 2, 70–76. https://www.bg-s-ndt.org/journal/vol8.html

References

1. Aquil Ahmad, Leonard J. Bond (2018) *Nondestructive evaluation of materials*. ASM Handbook, Vol. 17, Ninth Edition, American Society for Metals, ASM International.
2. Panasyuk, V.V. (2001) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. book.* Vol. 5: *Non-destructive testing and technical diagnostics.* Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, PMI [in Ukrainian].
3. Panasyuk, V.V. (2007) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. book.* Vol. 9: *Strength and durability of aviation materials and components.* Lviv, Spolom [in Ukrainian].
4. Dzhala, R.M., Dzhala, V.R., Ivasiv, I.B. et al. (2018) *Technical diagnostics of materials and structures: Refer. book.* In: 8 Volumes. Vol. 4: *Electrophysical methods of non-destructive testing of defectiveness of structure elements.* Ed. by Z.T. Nazarchuk. Kyiv, Prostir-M [in Ukrainian].
5. Kolomiitsev, O.V., Komarov, V.O. (2022) Economical effect and comparison of crack identification in load-bearing element of aircraft wing by methods of non-destructive testing. In: *Proc. of the 10th International Scientific and Practical Conf. on International Scientific Innovations in Human Life»,* Manchester [in Ukrainian]. https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-international-scientific-innovations-in-human-life-13-15-aprelya-2022-goda-manchester-velikobritaniya-arhiv
6. Kim, Y.Y., Kwon, Y.E. (2015) Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides. *Ultrasonics*, **62**, 3–19. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.015
7. Vinogradov, S., Fisher, J. (2018) *Review of guided wave testing using magnetostrictive Transducers.* 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden. https://www.ndt.net/article/ecndt2018/papers/ecndt-0486-2018.pdf
8. Vinogradov, S., Cobb, A., Fisher, J. (2018) New magnetostrictive transducer designs for emerging areas of NDE. *Materials*, **11**, 755. DOI: https://doi.org/10.3390/ma11050755

9. Babak, V.P., Bohachev, I.V., Dekusha, O.L., Kovtun, S.I., Kuts, Y.V., Sozonov, S.V. (2025) Investigation of ultrasonic magnetostriction method of ultrasonic control. Part 1. Application of magnetostriction effects in measurement and non-destructive testing systems (Review). *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **3**, 5–14 [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.01
10. Carlin, B. (1960) *Ultrasonics, Chapter 4, Magnetostriction*. Second edition. McGraw-Hill Book Company Inc., 93–125.
11. Babak, V.P., Babak, S.V., Beregun, V.S. et al. (2015*) Information support of monitoring of heat-and-power engineering objects: Monography.* Ed. by V.P. Babak. Kyiv [in Ukrainian].
12. Babak, V.P., Bogachev, I.A. (2016) Small aperture magnetostrictive sensors for non-destructive testing. *«NDT days 2016», Sozopol, Bulgaria: Scientific Proceedings*, 1(**156**).
13. Bohachev, I.V., Babak, V.P., Zaporozhets, A.O. (2022) Novel small-aperture transducers based on magnetostrictive effect for diagnostic systems. *Technical Electrodynamics,* **3**, 69–78. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2022.03.069
14. Bohachev, I.V., Kovtun S., Kuts Y. et al. (2023) Enhanced phase method of signal detection for ultrasonsc magnetostriction defectoscopy of power equipment. *System Research in Energy*, 2(**73**), 72–82. DOI: https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072
15. Tsapenko, V.K., Kuts, Yu.V. (2010) *Fundamentals of ultrasonic non-destructive testing.* Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
16. Crawford, F.S. (1966) *Waves.* Berkeley physics course. Vol. 3. McGraw-Hill.
17. Bendat, J., Piersol, A. (2010) *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. John Willey & Sons.
18. Poularikas, A. (2010) *Transforms and Applications Handbook*. CRC Press LLC.
19. Harb, M.S., Yuan, F.G. (2015) A rapid, fully non-contact, hybrid system for generating Lamb wave dispersion curves. *Ultrasonics,* **61**, 62–70. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.03.006
20. Kovtun, S.I., Bohachev, I.V., Dekusha, O.L. et al. (2025) Experimental research of the magnetostrictive method of ultrasonic nondestructive testing. *Bulgarian Society for NDT Int. J. «NDT Days»*. Vol. VIII, Issue 2, 70–76. https://www.bg-sndt.org/journal/vol8.html

INVESTIGATION OF ULTRASONIC MAGNETOSTRICTION METHOD OF ULTRASONIC CONTROL.
Part 2. Improvement and experimental research of the magnetostriction method of ultrasonic testing

V.P. Babak[1], I.V. Bohachev[1], O.L. Dekusha[1], S.I. Kovtun[1], Y.V. Kuts[1,2], S.V. Sozonov[1]

[1]General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 172 Antonovych Str., Kyiv, Ukraine, 03150, E-mail: sveta_kovtun@ukr.net

[2]National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteyisky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: y.kuts@ukr.net

In the first part of the article, modern trends in the use of magnetostrictive effects in non-destructive testing and measurement technology were analyzed. An analysis of publications on this issue showed an increase in the researchers' interest in in-depth study of the possibilities of magnetostrictive effects as a basis for the development of new methods of ultrasonic non-destructive testing (UNT). It was noted that a new promising direction of research is the creation of NDT methods and tools based on small-aperture magnetostrictive transducers (MST). Such transducers make it possible to control objects of complex geometry, in dry contact with MST and in a wide range of temperatures of control objects. The article is devoted to the development of NDT tools using MST, the action of which is based on the Joule and Villari effects, and the study of the possibilities of their application in NDT problems. In particular, the features of MST designs, their characteristics, and the peculiarities of signal formation of emitting and receiving transducers are considered. For experimental tests, an original UNT system with a signal frequency of 0.5 MHz was used, which made it possible to evaluate the capabilities of the developed UNT method on test samples, which were metal plates with defects in the form of holes of different diameters, and by testing defects in welded joints. 20 Ref., 2 Tabl., 17 Fig.

Keywords: ultrasonic non-destructive testing, magnetostrictive effects, small-aperture magnetostrictive transducers

ORCID

Бабак В.П. – https://orcid.org/0000-0002-9066-4307, Ковтун С.І. – https://orcid.org/0000-0002-6596-3460,
Богачев І.В. – https://orcid.org/0000-0001-7781-5767, Декуша О.Л. – https://orcid.org/0000-0003-3836-0485,
Куц Ю.В. – https://orcid.org/0000-0002-8493-9474, Созонов С.В. – https://orcid.org/0000-0002-7584-4529

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

Ю.В. Куц
Інститут загальної енергетики НАН України. 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 172.
E-mail: y.kuts@ukr.net

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

В.П. Бабак, І.В. Богачев, О.Л. Декуша, С.І. Ковтун, Ю.В. Куц, С.В. Созонов (2026) Дослідження ультразвукового магнітострикційного методу ультразвукового контролю. Частина 2. Удосконалення та експериментальні дослідження магнітострикційного методу ультразвукового контролю з малоапертурними перетворювачами. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **02**, 3–12. DOI: https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.01

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk
Отримано 20.02.2026
Отримано у переглянутому вигляді 09.03.2026
Підписано до друку 25.06.2026
Оприлюднено 27.06.2026