

ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МАГНІОСТРИКЦІЙНОГО МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ.

Частина 1. Застосування магніострикційних ефектів у системах вимірювання та неруйнівного контролю (Огляд)

В.П. Бабак¹, І.В. Богачев¹, О.Л. Декуша¹, С.І. Ковтун¹, Ю.В. Куц^{1,2}, С.В. Созонов¹

¹Інститут загальної енергетики НАН України. 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 172

²КПІ ім. Ігоря Сікорського. 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: y.kuts@ukr.net

У статті досліджується напрям розвитку методів ультразвукового неруйнівного контролю (УНК), які ґрунтуються на використанні ефектів магніострикції. На основі аналізу сучасних публікацій за напрямом зроблено висновок про підвищення зацікавленості дослідників у поглибленому вивченні можливостей цих методів УНК. Інтерес до цієї тематики обумовлений як появою нових магніострикційних матеріалів з покращеними характеристиками та розвитком цифрових методів і засобів формування та опрацювання інформаційних сигналів УНК, так і розширенням номенклатури об'єктів і задач контролю, зокрема контролю великогабаритних об'єктів, таких як трубопроводи та трубки теплообмінників, необхідністю створення технологій УНК, які не потребують акустичного контакту перетворювач/виріб і забезпечують можливість контролю виробів зі складною геометрією. Отримані результати сприятимуть кращому розумінню можливостей та обмежень використання магніострикційних ефектів в УНК. Зроблено висновок, що застосування таких систем дає змогу розширити функціональні можливості УНК та отримати нові розв'язки задач УНК у різних галузях промисловості. Також показано доцільність подальших досліджень магніострикційного методу УНК на основі малоапертурних магніострикційних перетворювачів. Бібліогр. 51, рис. 7.

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

Вступ. У зв'язку з розвитком інфраструктури та її старінням проблема безпечної експлуатації промислових конструкцій, споруд, транспорту та інших засобів забезпечення життєдіяльності суспільства набуває все більшої актуальності та стимулює пришвидшення досліджень у галузі неруйнівного контролю (НК) та моніторингу стану об'єктів. Підтвердження цього положення можна знайти в [1], де виконано ґрунтовний аналіз і наведено численну бібліографію останніх робіт з питань розвитку сенсорних технологій НК і моніторингу.

Сучасний НК охоплює широке коло методів і засобів [2–4], які ґрунтуються на використанні різних фізичних полів і речовин, та дають змогу отримувати достовірну й надійну інформацію про поточний стан і структурну цілісність критично важливих цивільних інженерних споруд [5–9], енергетичного обладнання [10–12], залізничних рейок [13], контролювати якість виробів адитивного виробництва [14–16] тощо. Досягнення в області інформаційно-вимірювальних технологій [17], зокрема методів фазових вимірювань і контролю [18–20], штучного інтелекту [21–23], методів машинного навчання [24, 25] дали змогу

суттєво розширити можливості проведення досліджень і запропонувати ряд інноваційних високотехнологічних технологій контролю та моніторингу цивільної інфраструктури.

До числа найзатребуваніших видів неруйнівного контролю належить ультразвуковий [1–3]. Методи та засоби ультразвукового неруйнівного контролю (УНК) широко використовуються для контролю якості виробів і конструкцій різної складності як на етапі їх виготовлення, так і під час експлуатації. Застосування відомих методів і засобів УНК з п'єзоелектричними ультразвуковими перетворювачами мають ряд обмежень. Зокрема такі перетворювачі потребують акустичного контакту з об'єктом контролю (ОК), а в разі необробленої поверхні ОК – її попередньої підготовки, наприклад шляхом шліфування.

Одним із перспективних методів УНК є метод, що ґрунтується на використанні магніострикційних ефектів [26, 27] (від «магніт» і лат. «strictio» – стискування, натягування). Ці ефекти пояснюються взаємодією механічних і магнітних полів у магніострикційних матеріалах – феромагнітних металах Fe, Ni, Co, Gd, Tb та їх сплавах. Маг-

Бабак В.П. – <https://orcid.org/0000-0002-9066-4307>, Богачев І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7781-5767>, Декуша О.Л. – <https://orcid.org/0000-0003-3836-0485>, Ковтун С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-6596-3460>, Куц Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>, Созонов С.В. <https://orcid.org/0000-0002-7584-4529>
© В.П. Бабак, І.В. Богачев, О.Л. Декуша, С.І. Ковтун, Ю.В. Куц, С.В. Созонов, 2025

нітострикційні матеріали відносяться до класу електромеханічно активних речовин [28]. У таких речовинах наявні або з'являються в результаті індукції елементарні диполі. Їхні дипольні моменти взаємодіють із зовнішніми електричними та магнітними полями, що призводить до виникнення пружних напружень, а, отже, і деформацій. У [29] зазначалось, що в струмопровідних матеріалах, які піддаються впливу магнітного поля, прикладене динамічне магнітне поле індукує силу Лоренца, що діє на заряджені елементарні частини, тим самим генеруючи механічні хвилі. У випадку феромагнітних електропровідних матеріалів прикладене динамічне магнітне поле індукує і магнітострикцію, і силу Лоренца. Але в цьому випадку магнітострикція є домінуючим механізмом ультразвукового хвильового процесу.

Магнітострикційні ефекти відрізняються властивістю оборотності. Найширше практичне застосування мають прямі магнітострикційні ефекти Джоуля та Відемана, які полягають у механічних змінах магнітострикційних матеріалів, що обумовлені дією зовнішнього магнітного поля [26–28]. Вони проявляються у зміні лінійних розмірів і виникненні крутильних деформацій у виробах із магнітострикційних матеріалів. Зворотними до них магнітострикційними ефектами є ефекти Вілларі та Вертгейма. Названі вище магнітострикційні ефекти є квадратичними – знак деформації не залежить від знаку магнітного поля. Відомі й інші магнітострикційні ефекти. Зокрема в [26] згадано про ефект Гільємена, який полягає у згинанні зразка внаслідок дії магнітного поля та зміні модуля Юнга матеріалу зразка; ефект Баррета пов'язаний зі зміною об'єму магнітострикційного тіла під впливом магнітного поля. Але ці ефекти не знаходять застосування в УНК.

Перші застосування магнітострикційних ефектів пов'язані з розробленням випромінювачів і приймачів акустичних сигналів у гідроакустиці [26, 28], ультразвукових потужних резонансних перетворювачів у технологічних установках для оброблювання крихких матеріалів, зварювання, мийки, очищення тощо; сенсорах положення на основі магнітострикційних ліній затримки та перетворювачів для акустoeлектроніки [30]; датчиках крутильних моментів, руху, положення, маси, характеристики магнітного поля [31]; ультразвукових перетворювачах, здатних передавати та приймати направлені хвилі на валу, що обертається [32].

Ефективність магнітострикційних перетворювачів (МСП), які здійснюють перетворення енергії електромагнітного поля в енергію пружних коливань і навпаки, значною мірою залежить від харак-

теристик використаних у них магнітострикційних матеріалів – магнітострикційної сталі та коефіцієнта магнітомеханічного зв'язку. У свою чергу, останні залежать від хімічного складу та наявних домішок, виду термомеханічної обробки, текстури матеріалу, поля підмагнічування тощо. Тому важливим напрямом розвитку МСП є дослідження нових магнітострикційних матеріалів, їхніх акустичних характеристик для створення нових ефективніших перетворювачів [33–35]. Значний внесок у дослідження магнітострикційного ефекту та аналіз перспектив його використання у неруйнівному контролі зробили закордонні вчені, зокрема [27, 29, 32, 36–38].

Проте існуючі прилади здебільшого використовують п'єзоелектричні ультразвукові сенсори, але їх застосування обмежене для контролю об'єктів складної форми та через необхідність використання імерсійної рідини.

Метою роботи є аналіз світових тенденцій з проблематики застосування ультразвукових магнітострикційних методів і засобів неруйнівного контролю.

Загальний огляд публікацій щодо ультразвукового магнітострикційного методу неруйнівного контролю. Аналіз літературних джерел застосування ультразвукового магнітострикційного методу НК проведений з метою оцінювання рівня зацікавленості наукової спільноти цією проблематикою.

Пошук здійснювався за такими ключовими словами: магнітострикційний неруйнівний контроль, магнітострикційний перетворювач, магнітострикційний сенсор, магнітострикційна дефектоскопія, магнітострикційний контроль клепаных з'єднань (magnetostrictive non-destructive testing, magnetostrictive transducer, magnetostrictive sensor, magnetostrictive flaw detection, magnetostrictive testing of riveted joints). Для аналізу відібрано 193 публікацій у наукометричній базі даних Scopus, опублікованих за проміжок часу з 2009 до 2024 рр. Розподіл публікацій за категоріями у формі кругової діаграми наведено на рис. 1.

На рис. 2 наведено графік публікацій та цитувань наукових статей за тематикою магнітострикційного методу НК в період з 2009 по 2024 рр., з якого видно, що зацікавленість наукової спільноти цією проблематикою щороку зростає.

Найбільш цитованою статтею є [29], яку опубліковано в 2015 р. та яка має 246 цитувань. У цій роботі автори досліджують можливості застосування магнітострикційних накладних перетворювачів в УНК хвилеводів, таких як труби та пластини. Розглянутий перетворювач складається з

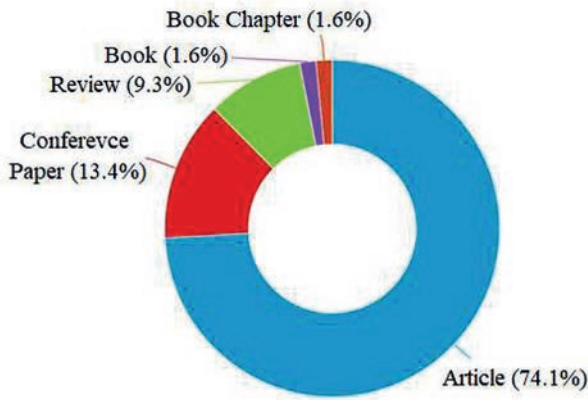


Рис. 1. Розподіл публікацій за категоріями

магнітного кола, що містить постійні магніти та котушки, а також тонкої магнітострикційної накладки, що працює як чутливий і виконавчий елемент, який прикріплений до тестового хвилеводу або з'єднаний з ним. Конфігурація такого пере-

творювача та магнітострикційної ділянки критично впливають на продуктивність контролю, тому в цій роботі розглянуто різні конфігурації магнітострикційних накладних перетворювачів, принципи їхньої роботи та області застосування.

Діаграма на рис. 3 дає уявлення про розподіл публікацій за вказаним напрямом пошуку між різними авторами.

Найбільший внесок у розвиток методів застосування магнітострикційних перетворювачів зробили вчені лондонського імперського коледжу – Cawley Peter, та He Cunfu і Wang Huan з пекінського технологічного університету, які опублікували по 10 статей (рис. 3). У цілому найбільший внесок у розвиток даного наукового напрямку зробили вчені КНР та Англії (рис. 4).

Слід зазначити, що наведені дані характеризують тільки зацікавленість певних авторів і країн у проведенні досліджень на даний момент і не завж-

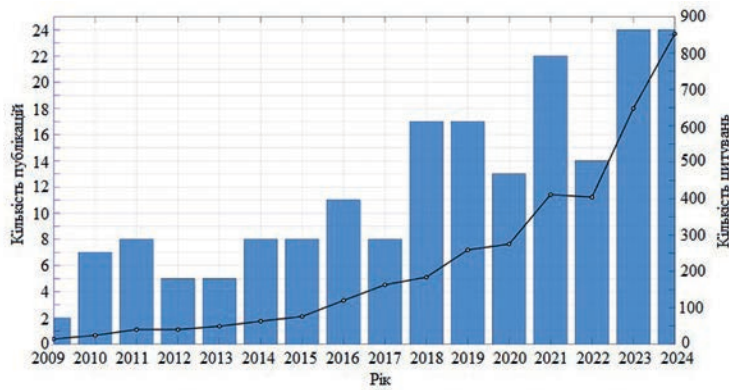


Рис. 2. Графік публікацій та цитувань статей за період 2009–2024 рр.

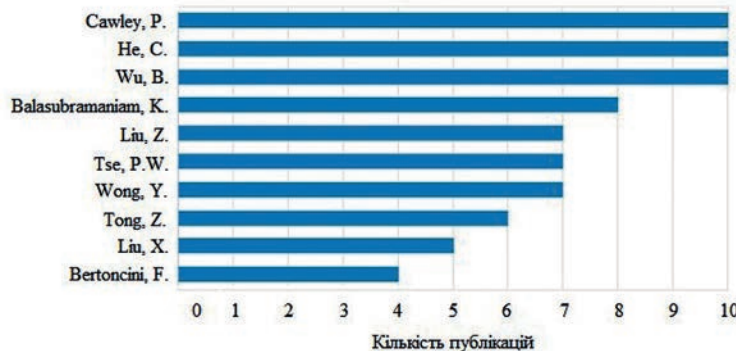


Рис. 3. Діаграма розподілу публікацій за авторами

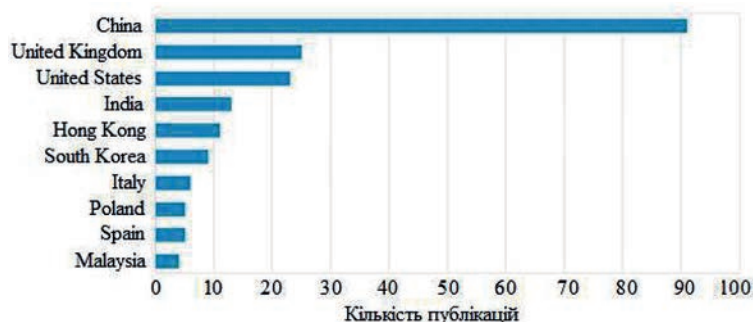


Рис. 4. Діаграма розподілу публікацій за країнами

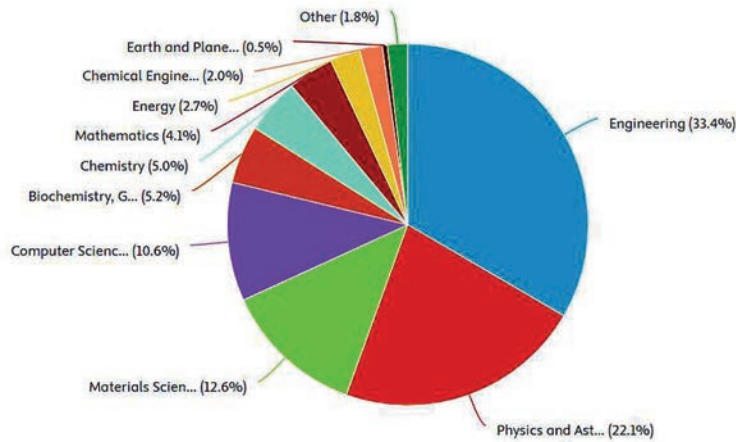


Рис. 5. Діаграма, що відображає використання результатів досліджень магнітострикційного УНК у різних галузях науки і техніки

ди адекватно відображають поточний стан в цілому розвитку цього напрямку наукових досліджень в окремих країнах.

Наведена на рис. 5 кругова діаграма відображає використання результатів досліджень магнітострикційного ультразвукового контролю в різних галузях науки і техніки.

Огляд напрямів розвитку ультразвукового магнітострикційного методу контролю.

Нижче наведено огляд найбільш цитованих і цікавих, на наш погляд, робіт, пов'язаних з теоретичними та практичними аспектами використання магнітострикції в УНК.

У [29, 39] розглянуто нову технологію використання сенсорів MsS (Magnetostrictive Sensor). Початково технологія на основі MsS була орієнтована на ультразвуковий контроль великих структур, таких як трубопроводи, та моніторингу стану пластин, анкерних стрижнів, сталевих канатів для вантових мостів та інших подібних об'єктів. Ця технологія дає змогу виявляти дефекти типу корозійних уражень, стоншення стінок і тріщин у габаритних конструкціях. Для контролю конструкцій пластинчастого типу використовують зсувні хвилі, а для огляду труб – хвилі кручення. У [39] експериментально підтверджено здатність генерувати об'ємні зсувні хвилі та виявляти за їх допомогою дефекти в габаритних виробках. Тестовий зразок мав товщину 152 мм, тому більша частина енергії пружних коливань поширювалась у ньому саме як об'ємні зсувні хвилі. У тестових зразках виявлялись штучні дефекти у вигляді прорізів та отворів. Але розшифровка сигналів MsS є достатньо складною та потребує значної кваліфікації оператора, а визначення інформативних параметрів сигналів наражається на значні труднощі внаслідок складної променевої картини поширення сигналів у зразку.

Ця технологія розроблена та запатентована (U.S. Patent 5,456,113; 5,457,994; 5,581,037; 5,767,766; 5,821,430; 6,212,944 тощо) інститутом

SwRI (Southwest Research Institute, USA). Основними елементами MsS є: тонка FeCo стрічка, що наклеюється на об'єкт контролю; накладна електрична котушка, у змінному електромагнітному полі якої знаходиться стрічка та постійний магніт для підмагнічування останньої. Зокрема в патенті [40] розглянуто магнітострикційний спосіб і апаратура для контролю феромагнітних і неферомагнітних труб та інших об'єктів циліндричної форми, що дають змогу виявляти дефекти типу корозійних виразок, витончення стінок і тріщин у матеріалі ОК. Традиційні методи НК, такі як вихрострумний, магнітний, ультразвуковий, рентгенівський, орієнтовані на виконання досліджень на локалізованих у просторі ділянках і не підходять для контролю протяжних об'єктів у ситуаціях, коли дефекти можуть виникнути на значних ділянках трубопроводів під захисними шарами чи теплоізоляцією.

Реалізовану в патенті ідею технології УНК на основі MsS ілюструє рис. 6. Локальна зміна намагніченості матеріалу труби в околі котушки збудження 1 викликає лінійні зміни матеріалу труби 3 у напрямку, паралельному прикладеному електромагнітному полю. Це породжує пружну хвилю 4, яка поширюється всередині матеріалу. Постійні магніти створюють магнітне поле зміщення, необхідне для забезпечення роботи перетворювачів у лінійному режимі. Відбившись від дефекту чи іншої аномалії матеріалу труби або від кінця труби, пружна хвиля надходить до приймальної котушки 2 і в результаті зворотного магнітострикційного ефекту перетворюється в електричний сигнал, який фіксується електронними засобами аналізу сигналів. Перевагами цієї технології є: висока чутливість магнітострикційних сенсорів, їх довговічність, відсутність потреби акустичного контакту сенсор/матеріал, великий діапазон поширення пружних хвиль, простота реалізації й низька вартість сенсорів та електронних блоків.

У цілому технологія використання акустичної хвилі, яка поширюється вздовж витягнутої струк-

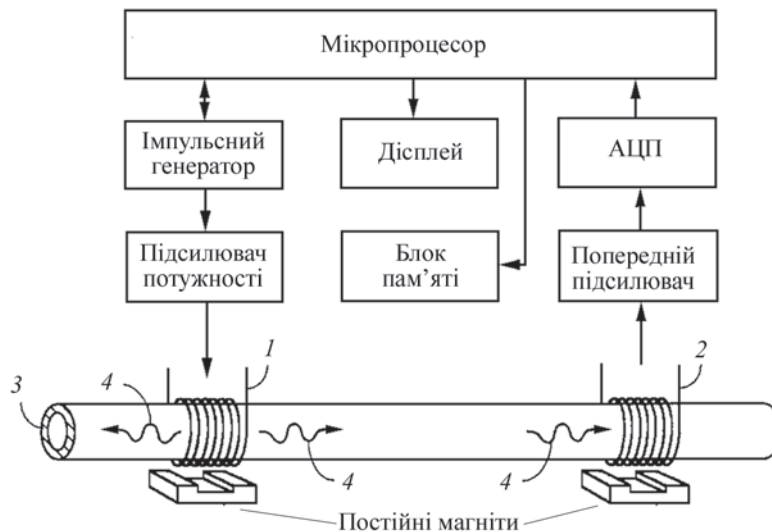


Рис. 6. Структура магнітострикційного засобу контролю

тури – трубопроводів, прутків, стрижнів, металевих пластин, залізничних рейок тощо, дістала назву методу направленої ультразвукової хвилі (the guided wave ultrasonic technique). У деяких випадках вдається виконувати контроль протяжних об’єктів на відстанях у декілька сотень метрів від точки введення ультразвукової хвилі. Частота направлених хвиль залежить від товщини виробу та зазвичай знаходиться в діапазоні від 10 кГц до кількох МГц. Найчастіше використовуються крутильні хвилі та луна-імпульсний режим роботи. У випадку контролю трубопроводів масив низькочастотних перетворювачів, які використовуються як для збудження, так і для прийому відлуння, кріпиться по колу труби для створення осесиметричної хвилі.

У [41] наведено результати розроблення сенсорів НК за методикою магнітострикційної лінії затримки (MDL – magnetostrictive delay line). Такі сенсори можуть бути використані для НК магнітострикційних матеріалів у формі акустичного хвилеводу – стрічок і дрітків. У цьому випадку досліджуваним елементом є сам MDL. Вимірювання поздовжньої швидкості звуку та його рівномірності можуть бути отримані шляхом вимірювання часу затримки між двома різними положеннями збуджувальної і вимірювальної котушок MDL. Отримана в такий спосіб інформація може бути використана для визначення магнітострикційних характеристик матеріалів.

Стаття [36] присвячена розробленню та аналізу роботи лінійного скануючого магнітострикційного перетворювача (MsT – magnetostrictive transducer) в задачах контролю таких об’єктів як трубопроводів та резервуарів, що працюють під високим тиском, і пошуку структурних пошкоджень типу витончення стінок об’єктів внаслідок корозії або тріщин в околі зварних швів. У роботі запропоновано оригі-

нальну конструкцію MsT у вигляді системи лінійно-скануючих магнітострикційних перетворювачів, в якій рухомий постійний магніт приводиться в дію спеціальним двигуном. MsT призначений для роботи в діапазоні частот 20...500 кГц. Використано поперечні хвилі з горизонтальною поляризацією (SH-хвилі), які здатні поширюватися на відносно великі відстані з низькою дисперсією та низьким загасанням. Фізична гнучкість зонда MsT дозволяє встановлювати його на поверхні в широкому діапазоні коливань їхньої кривизни.

У [42] розглянуто використання принципу магнітострикції для проведення ультразвукових випробувань об’єктів за високих температур. Така задача є особливо актуальною при проведенні УНК енергетичного обладнання та інших об’єктів, що зазнають нагріву в процесі їх функціонування. Автори повідомили, що в розглянутих перетворювачах в якості магнітострикційного сердечника використано аморфні металеві смуги, які здатні стабільно працювати у високотемпературному середовищі за температури 350 °С. Робоча частота перетворювача становить ~1 МГц. Виконані дослідження орієнтовані на задачу контролю корпусу ядерного реактора з натрієвим охолодженням та товщиною стінок 25...40 мм.

У [43] наголошено, що горизонтально поляризовані поперечні хвилі (SH-хвилі) мають велике значення для моніторингу стану та НК конструкцій. Зазначено, що SH-хвилі в пластинах, кільцеві SH-хвилі та торсійні хвилі в трубах є схожими щодо характеристик дисперсії та структури хвиль, тому останні два типи хвиль також можна назвати SH-хвилями в трубах. У цьому дослідженні узагальнено принципи роботи, застосування, переваги та обмеження різних типів перетворювачів SH-хвиль, розглянуто різні конфігурації перетво-

рювачів для збудження та прийому SH-хвиль, що сприятиме ширшому застосуванню таких перетворювачів у різних задачах моніторингу та НК виробів широкого призначення.

У [44] розглядається задача виявлення множинних дефектів у нижніх пластинах донної частини великомасштабних резервуарів для перевезення та зберігання нафти. Через важкі умови експлуатації в таких резервуарах виникають дефекти, особливо небезпечними з яких є корозійні ураження їхнього днища. У статті наведено технологію візуалізації результатів ультразвукового контролю в режимі керуваного обертання ультразвукової низькочастотної хвилі SH₀, яка збуджується в ОК 8-канальним магнітострикційним перетворювачем. Робоча частота датчика – 70 кГц. Він являє собою магнітострикційну стрічку розмірами 200×25,4×0,1 мм зі сплаву FeCo, на яку намотані котушки та встановлено вісім постійних магнітів зі сплаву NdFeB розмірами 25×12,5×1,5 мм. Уся конструкція залита епоксидною смолою та інкапсульована. З метою одночасного виявлення декількох дефектів запропоновано використання режиму обертання перетворювача з подальшим зшиванням отриманих під час кожного обертання зображень. Результати експерименту засвідчили, що зі збільшенням часу обертання підвищується точність визначення дефекту. При восьми обертах перетворювача найменша відносна похибка визначення положення дефекту сягала ~4,3 %, а мінімальна абсолютна кутова похибка – ~2,16°.

У [37] зазначено, що на ринку засобів УНК існує попит на МСП з покращеними характеристиками, а представлений вперше у 2010 р. новий МСП на основі зворотного ефекту Відемана надає низку нових можливостей для використання в НК. Розглянуто ряд розробок у цьому напрямі, зокрема автоматизований всенаправлений зонд, придатний для перевірки великих оболонок, наприклад стінки або днища резервуару для зберігання. Також розглянуто особливості використання МСП для контролю труб теплообмінників і котельних труб, які працюють за високих температур, а також пластин та анкерних стрижнів.

У [45] обговорюється використання магнітострикційних ефектів для оцінювання втомних пошкоджень циклічно навантажених сталевих ниток, які використовуються як основні несучі елементи вантових мостів. Надійність, довговічність і безпека експлуатації таких конструкцій цілком залежить від цілісності сталевих ниток у вантах, які протягом тривалого часу знаходяться під змінними навантаженнями за одночасної дії метеофакторів, тому їхні пошкодження від втоми є неминучим. У на-

веденому дослідженні для оцінки втомного пошкодження запропоновано використати коефіцієнт нелінійності та коефіцієнт загухання ультразвукової хвилі, яка збуджується МСП. Експериментальним шляхом отримано зв'язок між нелінійним коефіцієнтом, коефіцієнтом ослаблення та часом циклічного навантаження, які зростають зі збільшенням часу циклічного навантаження.

У [46] наведено огляд характеристик магнітострикційних сенсорів для ультразвукового контролю та моніторингу стану трубопроводів, розглянуто принципи їхньої роботи та результати експериментальних випробувань. Підтверджено, що метод контролю трубопроводів, що ґрунтується на використанні направлених ультразвукових хвиль, дає змогу локалізувати дефекти типу корозійних уражень і порушення суцільності уздовж трубопроводу на відстанях до десятків метрів від точки введення ультразвуку. Експериментально доведено, що магнітострикційні сенсори з FeCo смужками дають змогу генерувати у 5–10 разів більшу за амплітудою ультразвукову хвилю порівняно з датчиками з Ni смужками.

У [47] запропоновано систему ультразвукового моніторингу за утворенням дефектів і їх ростом у трубах з обмеженим доступом, в якій збудження та приймання ультразвукових хвиль здійснюється магнітострикційним сенсором. У системі використано режим крутильних хвиль, які поширюються в трубі та відбиваються від дефектів типу виїмки або корозійного ураження, які змінюють площі поперечного перерізу труби. Сенсор був постійно встановлений у трубопроводі з метою забезпечення періодичності отримання та аналізу інформаційних сигналів. Властивість магнітострикційного сенсора генерувати ультразвукові хвилі стабільної в часі форми та параметрів забезпечила можливість розроблення та використання оригінального алгоритму періодичного зіставлення сигналів моніторингу з опорним сигналом і в такий спосіб підвищення здатності до виявлення дефектів і відстеження динаміки їхнього розвитку за рахунок вилучення більшої частини неінформативних складових сигналів. Це особливо важливо у випадку контролю зварних з'єднань, для яких характерним є підвищений рівень структурних шумів. Для збільшення чутливості системи було розроблено методику узгодження сигналів за їхніми фазами для врахування варіації форми хвилі через зміну навколишнього середовища.

Іншим цікавим напрямом використання магнітострикційних ефектів є створення та застосування в УНК малоапертурних магнітострикційних перетво-

рювачів (ММП) [48–51]. Під апертурою (діючою випромінювальною поверхнею) таких перетворювачів розуміється ділянка поверхні ОК, що контактує з ММП, і через яку здійснюється передавання/приймання енергії пружної хвилі. Основою таких перетворювачів є хвилевод у вигляді відрізка дроту, виготовленого з магніострикційного матеріалу з намотаною на нього електричною котушкою та встановленим постійним магнітом для підмагнічування активної ділянки хвилеводу. Діаметр хвилеводу може коливатись у межах 0,5...1,5 мм, відповідно апертура ММП визначається площею перетину хвилеводу. Унаслідок малої апертури такі перетворювачі можуть розглядатись як точкові – напівсферичні випромінювачі, що випромінюють в однорідному безмежному середовищі у тілесний кут 2π (півсферу) [28]. ММП

мають відносно низьку чутливість та ефективність, тому вони не призначені для контролю значних ділянок ОК, але мають ряд інших корисних властивостей – можливість контролю деталей зі значною кривизною поверхні, за високої температури поверхні, дають змогу створювати магніострикційні перетворювачі матричного типу. Унаслідок складних процесів формування ультразвукових хвиль та їх поширення в ОК такі перетворювачі лишаються малодослідженими як у частині оптимізації їхньої конструкції, так і в частині дослідження особливостей їх практичного застосування.

Обговорення отриманих результатів. Грунтуючись на виконаному аналізі публікацій можна констатувати, що методи та засоби магніострикційного ультразвукового контролю характери-

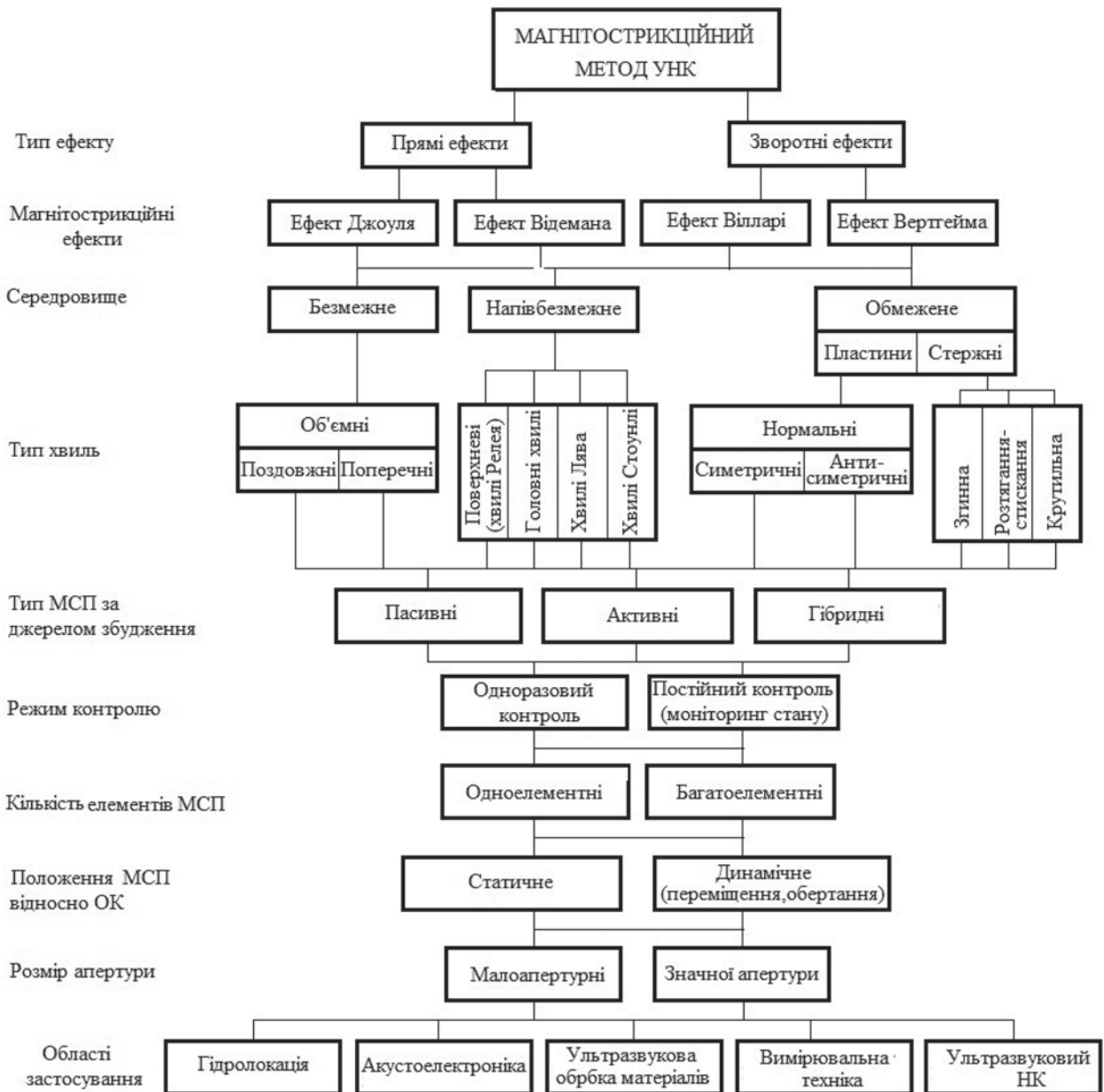


Рис. 7. Магніострикційні ефекти та їх практичне використання

зуються великим вибором способів збудження/ приймання ультразвукових хвиль, їхнім значним різноманіттям і широкими можливостями прикладного застосування (рис. 7).

У залежності від розмірів та форми середовищ поширення ультразвукових коливань розрізняють три групи хвиль: хвилі в безмежних середовищах, хвилі на межі поділу напівбезмежних середовищ і хвилі в обмежених середовищах. Детальну інформацію про типи хвиль, їхні характеристики, способи збудження та умови поширення наведено в [28]. Магніострикційні ефекти в залежності від розмірів і форми феромагнітних середовищ, виду взаємодії магнітного, електричного та механічного полів здатні породжувати практично всі види хвиль. Це обумовило широке використання магніострикційних ефектів у різних галузях науки та виробництва, зокрема в гідроакустиці, акустоелектроніці, ультразвуковій обробці матеріалів, вимірювальній техніці. Ці ефекти також знаходять дедалі ширше застосування і в магніострикційному УНК, що обумовлено їхнім значним інформативним потенціалом.

У залежності від джерела збудження розрізняють пасивні, активні та гібридні МСП [1]. Пасивні МСП використовують магніострикційні властивості матеріалу ОК. Активні МСП містять у своєму складі один чи декілька магніострикційних елементів (плівки, стрижнів тощо), які генерують ультразвукові коливання. У гібридних МСП їхні активні магніострикційні елементи стимулюють магніострикційний матеріал ОК.

За режимом контролю розрізняються одноразовий і постійний контроль. В останньому випадку магніострикційні сенсори встановлюються на ОК, що дає змогу виконувати моніторинг його стану.

За кількістю елементів розрізняють одноелементні та багатоелементні сенсори. Останні найчастіше застосовують для створення крутильних хвиль у трубах і стрижнях.

За взаємним розташуванням МСП та ОК відрізняють статичний і динамічний режими роботи. Останній зручно застосовувати у випадку автоматизації процесу НК.

За розміром апертури можна виділити сенсори зі значною апертурою та малоапертурні (МСП, апертура яких значно менше довжини хвилі). Останні можуть бути використані для контролю ОК складної геометрії, але вони мають відносно низьку чутливість та ефективність, що вимагає розроблення нових конструкційних і схемотехнічних рішень, направлених на подолання цієї вади.

Звичайно в межах однієї статті неможливо дати вичерпний огляд публікацій з питання магніто-

стрикційного методу ультразвукового контролю. Проте виконаний аналіз найбільш цитованих публікацій дає змогу визначити основні тенденції розвитку досліджень із вказаної проблематики та оцінити можливі напрями розвитку подальших досліджень.

Висновки

Одним із перспективних напрямів розвитку УНК є дослідження та впровадження у практику контролю магніострикційних методів і створення на їх основі нових ефективних засобів УНК. Їх принципова відмінність від відомих, які орієнтовані на використання п'єзоелектричних перетворювачів, полягає в особливій технології застосування, яка не вимагає спеціальної підготовки поверхні досліджуваних об'єктів і використання імерсійних рідин для забезпечення акустичного контакту.

Незважаючи на значний обсяг проведених досліджень, проблематика, пов'язана із застосуванням магніострикційних ефектів в УНК, залишається актуальною та привертає увагу фахівців.

Технологія ультразвукового магніострикційного методу контролю не потребує додаткових витратних матеріалів і пов'язаних з цим додаткових витрат на їх утилізацію, отже є екологічно чистою та не шкідливою для персоналу.

У цілому перевагою магніострикційних методів є те, що створювані за їх допомогою пружні коливання відрізняються високою стабільністю та повторюваністю характеристик. Застосування МСП дає змогу здійснювати контроль ОК в широкому діапазоні температури та за сухого контакту МСП/ОК. Крім того, магніострикція дає змогу генерувати унікальні хвильові моди, зокрема зсувні хвилі з горизонтальною поляризацією.

Перспективним напрямом досліджень є створення методів і засобів УНК на основі малоапертурних магніострикційних перетворювачів. Останні дають змогу здійснювати контроль об'єктів складної геометрії та у широкому діапазоні температур, але такі перетворювачі мають відносно низьку чутливість та ефективність. Крім того, внаслідок виникнення в ОК значного числа різних типів хвиль, різноманіття видів дефектів та особливостей конфігурацій ОК виникають певні труднощі при інтерпретації результатів контролю, що вимагає розроблення нових конструктивних і схемотехнічних рішень, а також проведення теоретичних і практичних досліджень, пов'язаних з їх використанням.

Список літератури/References

1. Hassani, S., Dackermann, U. (2023) A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. *Sensors*, **23**(4), 2204. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042204>

2. Ahmad, A., Bond, L.J. (2018) *Nondestructive evaluation and quality control. Metals: Handbook*, Vol. 17, Ninth Edition. American Society for Metals, ASM International.
3. Hellier, C. (2001) *Handbook of Nondestructive evaluation*. McGraw-Hill.
4. Bray, D.E., Stanley, R.K. (2018) *Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing, and Service*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315272993>
5. Zhang, Y., Lun Chow, C., Lau, D. (2025) Artificial intelligence-enhanced non-destructive defect detection for civil infrastructure. *Automation in Construction*, **171**, 105996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.105996>
6. Jiang Wang, Va Kong, Xiuquan Li et al. (2025) A review of non-destructive testing techniques for shear wall structures with modular integrated construction. *J. of Building Engineering*, **105**, 112337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112337>
7. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V., Zaporozhets, A.O., Zvaritch, V.M. (2020) Principles of construction of systems for diagnosing the energy equipment. In: *Diagnostic Systems For Energy Equipments*; Springer: Cham, Switzerland.
8. Kim, W., Katipamula, S. (2017) A review of fault detection and diagnostics methods for building systems. *Sci. Technol. Built. Environ.*, **24**(1), 3–21. DOI: <https://doi.org/10.1080/23744731.2017.1318008>
9. Бабак В.П., Куц Ю.В., Богачев І.В. та ін. (2020) Розроблення методу, методики та засобів контролю елементів будівельних машин та металевих конструкцій з використанням магнітострикційного ефекту. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **4**, 32–39. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.04.05>
Babak, V.P., Kuts, Yu.V., Bogachev, I.V. et al. (2020) Development of the method, procedure and means of control of elements of construction machinery and metal structures using magnetostriction effect. *Tekh. Diahnostyka ta Neruinivnyi Kontrol*, **4**, 32–39 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.04.05>
10. Babak, V., Isaenko, V., Zaporozhets, A. (2020) *Systems, Decision and Control in Energy I*, Vol. 298. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2>
11. Babak, V.P., Babak, S.V., Eremenko, V.S., Kuts, Y.V. et al. (2021) Models and measures for the diagnosis of electric power equipment. In: *Models and Measures in Measurements and Monitoring. Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 360. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5_4
12. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V. et al. (2018) *Information Provision of Diagnostic Systems for Energy Facilities*. Kyiv, Akadempriodyka. DOI: <https://doi.org/10.15407/akadempriodyka.353.134>
13. Micić, M., Brajović, L., Lazarević, L., Popović, Z. (2023) Inspection of RCF rail defects—Review of NDT methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **182**(1), 109568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109568>
14. Romanenko, V., Kovtun, S. (2024) Technology of quality control of additive manufacturing products during printing of elements of energy complexes. *System Research in Energy*, **4**(80), 110–119. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.110>
15. Ramirez, I.S., Márquez, F.P.G., Papaalias, M. (2023) Review on additive manufacturing and non-destructive testing. *J. of Manufacturing Systems*, **66**, 260–286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.005>
16. Honarvar, F., Varvani-Farahani, A. (2020) A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics*, **108**, 106227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106227>
17. Babak, V.P., Babak, S.V., Eremenko, S. et al. (2025) Information-Measuring Systems. Theory and Application. *Studies in Systems, Decision and Control*, SSSC, Vol. 592. Springer, Cham. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-89406-0>
18. Куц, Ю.В., Щербак, Л.М. (2009). *Статистична фазометрія*. Тернопіль, Тернопільський державний університет ім. І. Пулюя.
Kuts, Yu.V., Shcherbak, L.M. (2009). *Statistical phasometry*. Ternopil, I. TSU [in Ukrainian].
19. Mei, Z., Kuts, Y., Kochan, O. et al. (2022) Using signal phase in computerized systems of non-destructive testing. *Measurement Sci. Review*, **22**(1), 32–43. DOI: <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0004>
20. Куц, Ю.В., Монченко, О.В., Бистра, І. М., Олійник, О.В. (2019) *Фазовий метод ультразвукової луніампульсної товщинометрії виробів з конструкційних матеріалів* у Києві, Інтерсервіс.
Kuts, Y.V., Monchenko, O.V., Bystra, I.M., Oliynyk, O.V. (2019) *Phase method of ultrasonic echo-pulse thickness measurement of products from structural materials*. Kyiv, Interservice [in Ukrainian].
21. Zinno, R., Haghshenas, S.S., Guido, G., Vitale, A. (2022) Artificial intelligence and structural health monitoring of bridges: A review of the state-of-the-art. *IEEE Access*, **10**, 88058–88078. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199443>
22. Elenchezian, M.R.P., Vadlamudi, V., Raihan, R., Reifsnider, K., Reifsnider, E. (2021) Artificial intelligence in real-time diagnostics and prognostics of composite materials and its uncertainties: A review. *Smart Materials and Structures*, **30**(8), 083001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac099f>
23. Perfetto, D., De Luca, A., Perfetto, M., Lamanna, G., Caputo, F. (2021) Damage detection in flat panels by guided waves based artificial neural network trained through finite element method. *Materials*, **14**(24), 7602. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247602>
24. Posilović, L., Medak, D., Milković, F. et al. (2022) Deep learning-based anomaly detection from ultrasonic images. *Ultrasonics*, **124**, 106737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106737>
25. Malekloo, A., Ozer, E., AlHamaydeh, M., Girolami, M. (2022) Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights. *Structural Health Monitoring*, **21**(4). DOI: <https://doi.org/10.1177/14759217211036880>
26. Carlin, B. (1960) *Ultrasonics, Chapt. 4, Magnetostriction*. 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., 93–125.
27. Ekreem, N.B., Olabi, A.G., Prescott, T., Rafferty, A., Hashmi M.S.J. (2007) An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties. *J. of Materials Proc. Technology*, **191**(1–3), 96–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.064>
28. Цапенко, В.К., Куц, Ю.В. (2010) *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*. Київ, НТУУ «КПІ».
Tsapenko, V.K., Kuts, Y.V. (2010) *Fundamentals of ultrasonic nondestructive testing*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
29. 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>
30. Бабак В.П., Бабак С.В., Бергун В.С. та ін. (2015) Сенсори систем моніторингу теплотехнічного обладнання на основі магнітострикційного ефекту. В кн.: *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики*, за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака, Київ, 273–316.
Babak, V.P., Babak, S.V., Berehun, V.S. et al. (2015) Sensors of monitoring systems for heat engineering equipment based on the magnetostrictive effect. In: *Information support for monitoring of heat power facilities*, Ed. by V.P. Babak, Kyiv, 273–316 [in Ukrainian].
31. Calkins, F.T., Flatau, A.B., Dapino, M.J. (2007) Overview of magnetostrictive sensor technology. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, **18**(10). DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X06072358>
32. Kim, Y., Kim, Y.Y. (2007) A novel Terfenol-D transducer for guided-wave inspection of a rotating shaft. *Sensors and Actuators A: Physical*, **133**(2). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.05.006>
33. Kim, J., Jung, E. (2005) Finite element analysis for acoustic characteristics of a magnetostrictive transducer. *Smart Materials and Structures*, **14**(6), 1273. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/6/020>
34. Zheng, X.J., Liu, X.E. (2005) A nonlinear constitutive model for Terfenol-D rods. *J. Appl. Phys.*, **97**, 053901. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1850618>

35. Chen, Y., Yang, X., Yang, M., Wei, Y., Zheng, H. (2021) Characterization of giant magnetostrictive materials using three complex material parameters by particle swarm optimization. *Micromachines*, 12(11), 416. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi1211416>
36. Vinogradov, S., Chen, X., Cobb, A., Fisher, J. (2023) Applications of linear scanning magnetostrictive transducers (MST) for finding of hard to detect anomalies in structural components. Research and Review. *J. of Nondestructive Testing*, 1(1). DOI: <https://doi.org/10.58286/28141>
37. 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>
38. Se-Beom Oh, Yong-Moo Cheong, Deok-Hyun Lee, Kyung-Mo Kim (2019) Magnetostrictive guided wave technique verification for detection and monitoring defects in the pipe weld. *Materials*, 12(6), 867. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12060867>
39. Puchot, A.R., Duffe, C.E., Cobb, A.C., Light, G.M. (2009) New magnetostrictive sensor technology applications. In: *5th Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition*, Bahrain (MENDT 2009). <https://www.ndt.net/article/mendt2009/papers/AdanCobb-newMss.pdf>
40. Kwun, H., Teller, C.M. (1996) *Nondestructive evaluation of pipes and tubes using magnetostrictive sensors*. Pat. US005581037, Int. Cl. G01N 29/14; G01N 29/28, Fill. Mar. 9, 1995; Date of Patent: Dec. 3, 1996.
41. Hristoforou, E., Kosmas, K. (2007) Magnetostrictive delay lines for non-destructive testing. *Intern. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 25, 287–296. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=59f35ce2a98b2b102cb214a10e5e5bc041bc1149>
42. Ashish, A., Rajagopal, P., Balasubramaniam, K. et al. (2017) Bulk ultrasonic NDE of metallic components at high temperature using magnetostrictive transducers. *AIP Conference Proceedings*, 1806(1), 050010. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4974604>
43. Miao, H., Li, F. (2021). Shear horizontal wave transducers for structural health monitoring and nondestructive testing: A review. *Ultrasonics*, 114, 106355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106355>
44. Wang, H., Wu, B., Gao, X., Liu, Y., Li, X., Liu, X. (2023) Ultrasonic guided wave defect detection method for tank bottom plate based on SH0 mode multichannel magnetostrictive sensor. *Measurement*, 223, 113790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113790>
45. Xiaohui Chen, Jiang Xu, Yong Li, Shenghuai Wang (2023) Characteristic parameters of magnetostrictive guided wave testing for fatigue damage of steel strands. *Materials*, 16, 5215. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155215>
46. Bertoncini, F., Giunta, G., Raugi, M., Turcu, F. (2012) Overview and experimental evaluation of magnetostrictive transducers for guided wave inspection. *E-J. of Nondestructive*, Issue 2012-09. https://www.ndt.net/article/ndtnet/2012/1_Turcu.pdf
47. Se-Beom Oh, Yong-Moo Cheong, Deok-Hyun Lee, Kyung-Mo Kim (2019) Magnetostrictive guided wave technique verification for detection and monitoring defects in the pipe weld. *Materials*, 12, 867. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12060867>
48. Babak, V.P., Bogachev, I.A. (2016) Small aperture magnetostrictive sensors for non-destructive testing. *NDT days 2016*, Sozopol, Bulgaria: Scientific Proceedings, 1(156).
49. Bohachev, I.V., Babak, V.P., Zaporozhets, A.O. (2022) Novel small-aperture transducers based on magnetostrictive effect for diagnostic systems. *Technical Electrodynamic*, 3, 69–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.069>
50. Bohachev, I., Kovtun, S., Kuts, Y., Sozonov, S., Khaidurov, V. (2023) Enhanced phase method of signal detection for ultrasonic magnetostriction defectoscopy of power equipment. *System Research in Energy*, 2, 72–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072>
51. Babak, V., Zaporozhets, A., Khaidurov, V., Scherbak, L., Bohachev, I., Tsiupii, T. (2023) Mathematical models and software for studying the elasticity of building structures and their systems. In: *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*, 454. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_4

INVESTIGATION OF ULTRASONIC MAGNETOSTRICTION METHOD OF ULTRASONIC CONTROL.

Part 1. Application of magnetostriction effects in measurement and non-destructive testing systems (Review)

V.P. Babak¹, I.V. Bohachev¹, O.L. Dekusha¹, S.I. Kovtun¹, Y.V. Kuts^{1,2}, S.V. Sozonov¹

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

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

The paper investigates the directions of development of ultrasonic non-destructive testing (UNT) methods based on the use of magnetostriction effects. After analysis of modern publications in the field, it is concluded that researchers are increasingly interested in in-depth study of the capabilities of these NDT methods. Interest in this topic is due to the emergence of new magnetostrictive materials with improved characteristics and the development of digital methods and means of forming and processing NDT information signals, as well as the expansion of the range of control objects and tasks, in particular the control of large-sized objects such as pipelines and heat exchanger tubes, the need to create NDT technologies that do not require acoustic contact between the transducer and the product and provide the ability to control products with complex geometry. The results obtained will contribute to a better understanding of the possibilities and limitations of using magnetostriction effects in NDT. It is concluded that the use of such systems allows expanding the functional capabilities of NDT and obtaining new solutions to NDT problems in various industries. The feasibility of further research into the magnetostrictive method of NDT based on small-aperture magnetostrictive transducers is also shown. 51 Ref., 7 Fig.

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

Отримано 13.06.25

Отримано у переглянутому вигляді 07.08.25

Прийнято 17.09.25