

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, м. Київ:

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, О.С. Міленін, С.А. Недосека,

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар);

В.П. Бабак (заст. гол. ред.)

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ
К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.Л. Казакевич

ІФХ ім. Л.В. Писаржевського НАН України, м. Київ;

О.М. Карпаш

Харківський нац. ун-т Повітряних Сил імені Івана

Кожедуба, м. Івано-Франківськ

Й. Мірчев

Інститут механіки, Софія, Болгарія;

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук,

В.М. Учанін (заст. гол. ред.)

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів;

В.С. Єременко, Ю.В. Куц, А.Г. Протасов

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХПІ», м. Харків;

М.Г. Чаусов

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий редактор – О.Т. Зельніченко,

Міжнародна Асоціація «Зварювання», м. Київ

Видавець

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Журнал входить до переліку затверджених МОН

України видань для публікації праць здобувачів

наукових ступенів за спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу.

ISSN 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print

Doi.org/10.37434/tdnk

Журнал зареєстровано Національною радою України з

питань телебачення і радіомовлення 11.09.2025,

ідентифікатор медіа R30-06489;

реєстрант – ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

Передплата 2026

Передплатний індекс 74475. 4 випуски на рік (видається

щоквартально). Друкована версія/електронна версія:

1680 грн. за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів видавець журналу

відповідальності не несе.

ЗМІСТ

Л.М. Лобанову – 85! 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Бабак В.П., Богачев І.В., Декуша О.Л., Ковтун С.І., Куц Ю.В., Созинов С.В. Дослідження ультразвукового магнітострикційного методу ультразвукового контролю. Частина 1. Застосування магнітострикційних ефектів у системах вимірювання та неруйнівного контролю (Огляд)..... 5

Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Махненко О.О. Особливості напруженого стану зварних поглинаючих стрижнів системи управління та захисту ВВЕР-1000 в процесі монтажу та подальшої експлуатації..... 15

Петренко Д.В., Протасов А.Г. Аналіз ефективності алгоритмів Reinforcement Learning для підвищення автономності мобільних роботів 24

Глабець С.М., Єременко В.С. Аналіз складових невизначеності вимірювання розмірів дефектів стикового зварного з'єднання поліетиленових труб дифракційно-часовим методом..... 32

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Осадчук С.О., Ниркова Л.І., Гончаренко Л.В. Дослідження причин пошкодження екранних труб котла-охолоджувача конвертерних газів 39

Сучков Г.М., Кальницький М.Е., Донченко А.В., Курандо О.І., Алексієва А.Г., Бороденко О.М., Бутенко О.І., Рибалка А.О. Експериментальні дослідження вимірювальних суміщених ультразвукових прямих електромагнітно-акустичних перетворювачів з імпульсним намагнічуванням 45

ІНФОРМАЦІЯ

Новини Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики 54

Видання журналу підтримують:

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,
Технічний комітет стандартизації «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» ТК-78,
Асоціація «ОКО», ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади»

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv:
L.M. LOBANOV (Editor-in-Chief),
V.O. Troitskiy (Deputy Editor-in-Chief),
Ie.O. Davydov, O.S. Milenin, S.A. Nedoseka, Yu.M. Posypaiko,
I.Yu. Romanova (execut. secretary);
V.P. Babak (Deputy Editor-in-Chief)
General Energy Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv
Krzysztof Dragan,
Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland;
Janez Grum,
University of Ljubljana, Slovenia;
M.L. Kazakevich,
L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv;
O.M. Karpash
Ivan Kozhedub National University of the Air Force, Ivano-Frankivsk, Ukraine
Yordan Mirchev
Institute of Mechanics, Sofia, Bulgaria;
L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk,
V.M. Uchanin (Deputy Editor-in-Chief)
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv;
V.S. Eremenko, Yu.V. Kuts, A.G. Protasov
NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine;
P.M. Raiter
Ivano-Frankivsk NTU of Oil and Gas, Ukraine;
Adriana Savin
National Institute of R&D for Technical Physics, Iasi, Romania;
V.O. Storozhenko
Kharkiv NU of Radio Electronics, Ukraine;
H.M. Suchkov
NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;
M.G. Chausov
NU of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv.
Executive Editor – O.T. Zelnichenko,
International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Publisher

International Association «Welding»

Address of Editorial Office

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.
Tel./fax: +38 (044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine for the publication of works of applicants for academic degrees in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal.
ISSN 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print
Doi.org/10.37434/tdnk

The Journal was registered by the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting on 11.09.2025, carrier identifier R30-06489; registrant – E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU.

Subscription 2026

Subscription index 74475.

4 issues per year (issued quarterly), back issues available.
128 €, subscriptions for the printed (hard copy) version, air postage and packaging included.

104 €, subscriptions for the electronic version.

Publisher is not responsible for the content of the promotional material.

CONTENT

L.M. Lobanov is 85!3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Babak V.P., Bohachev I.V., Dekusha O.L., Kovtun S.I., Kuts Y.V., Sozonov S.V. Investigation of ultrasonic magnetostriction method of ultrasonic control. Part 1. Application of magnetostriction effects in measurement and non-destructive testing systems (Review)5

Milenin O.S., Velykoivanenko O.A., Rozyinka G.P., Makhnenko O.O. Features of the stress state of welded absorber rods in the control and protection system of WWER-1000 during assembly and subsequent operation 15

Petrenko D.V., Protasov A.G. Analysis of the effectiveness of Reinforcement Learning algorithms for increasing the mobile robots autonomy24

Hlabets S.M., Eremenko V.S. Analysis of uncertainty components of defect size measurement in butt welded joint of polyethylene pipes by TOFD method32

INDUSTRIAL

Osadchuk S.O., Nyrkova L.I., Goncharenko L.V. Investigation of the causes for damage of the water-wall tubes of boiler cooler of the converter gases39

Suchkov G.M., Kalnytskyi M.E., Donchenko A.V., Kurando O.I., Aleksiiiv A.H., Borodenko O.M., Butenko O.I., Rybalko A.O. Experimental studies of measuring combined ultrasonic straight electromagnetic-acoustic transducers with pulsed magnetization45

INFORMATION

News of the Ukrainian society for non-destructive testing54

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,
Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78,
Association «OKO», LLC «Diagnostic devices»

Л.М. ЛОБАНОВУ – 85!



Колектив Інституту електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, редколегія та редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» щиро вітають головного редактора журналу академіка НАН України Леоніда Михайловича Лобанова з ювілеєм!

Академік НАН України Л.М. Лобанов – визначний вчений у галузі матеріалознавства, зварювання, міцності та діагностики матеріалів і зварних конструкцій.

Л.М. Лобанов народився 29 вересня 1940 р. У 1962 р. закінчив факультет промислового та цивільного будівництва Київського інженерно-будівельного інституту, а в 1968 р. – без відриву від роботи закінчив вечірнє відділення механіко-математичного факультету Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка. Уся його наукова діяльність пов'язана з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, в якому він працює з 1963 р. У 1969 р. захистив кандидатську, а в 1984 р. – докторську дисертацію, у 1991 р. йому присуджено вчене звання професора. У 1990 р. Л.М. Лобанова обрано членом-кореспондентом АН УРСР, у 1997 р. – дійсним членом (академіком) НАН України.

Наукові праці Л.М. Лобанова присвячені дослідженню поведінки матеріалів при зварюванні, розвитку теорії зварювальних напружень і деформацій, розробці методів дослідження і регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань, створенню високоефективних зварних конструкцій нової техніки та розробці методів і засобів їх діагностики.

В його перших наукових працях були створені фізичні та математичні положення оптичного моделювання зварних напружень, побудовано теорію їх подібності. На цій основі вперше у світовій практиці визначено особливості напружених станів, що виникають при зварюванні полімерних матеріалів. Встановлено фундаментальні положення про загальні для металів і полімерів закономірності розподілу напружень при зварюванні різноманітних типів з'єднань.

Широке визнання одержали праці Л.М. Лобанова, присвячені розробці методів лазерної інтерферометрії для дослідження якості та напружено-деформованих станів зварних з'єднань. Ним отримані аналітичні співвідношення для визначення точності виміру компонентів векторів переміщень поверхонь об'єктів у залежності від параметрів оптичних схем голографічних інтерферометрів і виведені рівняння для розрахунку переміщень за градієнтами порядків інтерференційних смуг. Побудовано та реалізовано алгоритми, які дають можливість на основі даних голографічних вимірів розрахувати компоненти векторів переміщень для великих масивів точок. Створено технологію діагностики виробів авіакосмічної техніки, в основу якої покладено новий метод неруйнівного контролю якості – електронна ширографія, заснований на застосуванні лазерної апаратури та комп'ютерної обробки оптичної інформації. Його важливою перевагою є безконтактність вимірів і можливість здійснювати в реальному масштабі часу неруйнівний контроль об'єктів як із металевих, так і композиційних матеріалів. Розроблені технології діагностики та ширографічна апаратура впроваджені в КБ «Південне» й надані за контрактами науково-дослідним лабораторіям країн дальнього зарубіжжя.

Розроблено високоефективний метод визначення залишкових напружень, що заснований на поєднанні спекл-інтерферометрії та застосування малих отворів діаметром до 1 мм. Для його реалізації створено портативні прилади, що не мають аналогів у світовій практиці. Автоматизована система комп'ютерної обробки інтерферограм, які спостерігаються при створенні малих отворів, дозволяє отримувати кількісні значення напружень з високою точністю, про що свідчить конкурс, проведений Міжнародним інститутом зварювання. Доведено, що цей метод і апаратура для його реалізації забезпечують найбільш достовірні результати вимірювань. Здійснено комплекс досліджень зі створення повністю неруйнівного методу визначення залишкових напружень на основі електронної спекл-інтерферометрії і введення локального імпульсу струму в контрольовану зону.

Проведені дослідження особливостей релаксації залишкових напружень та еволюції структуроутворення під дією імпульсів струму високої щільності на зварні з'єднання конструкційних металів і сплавів показали, що збільшення параметрів і тривалості імпульсів електричного струму дає можливість регулювати напружено-деформований стан зварних з'єднань і підвищити їхні експлуатаційні властивості. Розроблені технологія та обладнання дали можливість виконати електродинамічну зміцнюючу обробку виробів авіакосмічної і суднобудівної галузі.

Завдяки працям Л.М. Лобанова та його учнів сформовано новий науковий напрямок – бездеформаційне зварювання конструкцій, який базується на регулюванні термодформаційних процесів під час зварювання та створенні попередніх перед зварюванням напружено-деформованих станів, оптимізованих стосовно зварювальних напружень і деформацій. Розроблені методи й технічні засоби усунення зварювальних деформацій було використано при створенні комплексу «Енергія-Буран» та інших ракетно-космічних систем.

Упродовж останніх років під науковим керівництвом Л.М. Лобанова виконується комплекс нових досліджень у галузі статичної та циклічної міцності зварних з'єднань, опору їх крихким руйнуванням і руйнуванням від втоми, також розроблюються наукові підходи для підвищення міцності й довговічності зварних конструкцій, їх неруйнівного контролю та діагностики. Створюються нові типи ефективних зварних конструкцій, зокрема унікальні конструкції перетворюваного об'єму космічного призначення.

Л.М. Лобанов проводить значну роботу з розвитку системи стандартизації та сертифікації зварювальних технологій, матеріалів та обладнання. З 1992 р. від очолює створений за його участю Національний технічний комітет України зі стандартизації ТК-44 «Зварювання і споріднені технології», а також є Головою виконавчого комітету Міжнародного науково-технічного центру «ПАТОН-СЕРТ», який проводить сертифікацію зварювальних виробництв на відповідність вимогам серії міжнародних стандартів ISO. Отримані у МНТЦ «ПАТОН-СЕРТ» сертифікати на зварювальне виробництво дають право виходу на європейські та міжнародні ринки.

Л.М. Лобанов – автор понад 900 наукових праць, серед яких 8 монографій, більше 90 авторських свідоцтв і патентів. Він створив визнану наукову школу в галузі зварних конструкцій, підготував 12 докторів та 17 кандидатів технічних наук, 2 доктори філософії.

Поряд з інтенсивною науковою діяльністю Л.М. Лобанов протягом багатьох років веде велику науково-організаційну роботу. З 1985 р. він є заступником директора з наукової роботи Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та керівником відділу «Оптимізація зварних конструкцій нової техніки» цього Інституту. Водночас з 2015 по 2020 рр. був академіком-секретарем Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України і членом Президії НАН України, нині – радник Президії НАН України; є головою Українського технічного комітету зі стандартизації в галузі зварювання та споріднених технологій; головою секції «Зварні конструкції» вченої ради Інституту електрозварюван-

ня ім. Є.О. Патона; головою спеціалізованої ради із захисту дисертацій при цьому Інституті; головним редактором журналу «Технічна діагностика і неруйнівний контроль», членом редколегії журналів: «Автоматичне зварювання», «The Paton Welding Journal», «Космічна наука і технологія», «Стандартизація, сертифікація, якість», «Питання атомної науки і техніки», «Фізико-хімічна механіка матеріалів», «Промислове будівництво та інженерні споруди», «Przegląd Spawalnictwa»; «Journal of Magnesium and Alloys»; членом правління Українського товариства з неруйнівного контролю і технічної діагностики; членом Президії Національного комітету України з технічної та прикладної механіки та Європейського товариства з цілісності конструкцій (ESIS); членом Американського зварювального товариства; членом секції «Матеріалознавство» Комітету з Національної премії імені Бориса Патона.

Різномпланова активна та плідна діяльність Л.М. Лобанова, його вагомий внесок у розвиток науки, підготовку висококваліфікованих кадрів, впровадження результатів досліджень у практику здобули високе визнання. Л.М. Лобанов – лауреат премії Ради міністрів СРСР (1981 р.), лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (1994 р.), заслужений діяч науки і техніки України (2004 р.). Він нагороджений орденами: «Ярослава Мудрого V ст.» (2018 р.), «За заслуги» I (2014 р.), II (2009 р.), III (1997 р.) ступенів, «Знак пошани» (1982 р.), відзнаками НАН України «За наукові досягнення» (2007 р.) і за підготовку наукової молоді» (2015 р.); премією ім. Є.О. Патона НАН України (2004 р.); медаллю Ю.В. Кондратюка (1997 р.); нагрудним знаком Національного космічного агентства України «Почесний працівник космічної галузі» (2000 р.); нагрудним знаком Конструкторського бюро «Південне» «За створення ракетно-космічної техніки» (2015 р.); нагрудним знаком Київського міського голови «Знак пошани» (2003 р.); Почесною грамотою Ради національної безпеки і оборони України (2018 р.); Почесним золотим знаком Польського науково-технічного товариства (2014 р.), Відзнаками НАН України «За сприяння розвитку науки» та «За підготовку наукової зміни»; Почесною грамотою НАН України «За самовіддану наукову і науково-організаційну роботу», Почесною грамотою Міністерства енергетики та вугільної промисловості України (2015 р.), Знаком АТ «Турбоатом» «За заслуги» (2019 р.); Золотою медаллю імені Б.Є. Патона Національної академії наук України (2022 р.).

Леонід Михайлович Лобанов все своє життя присвятив науковій діяльності, його праці — безцінний внесок у розвиток науки і техніки нашої країни!

Щиро бажаємо ювіляру міцного здоров'я, успіхів і благополуччя!

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 виробках 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 клепаєних 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

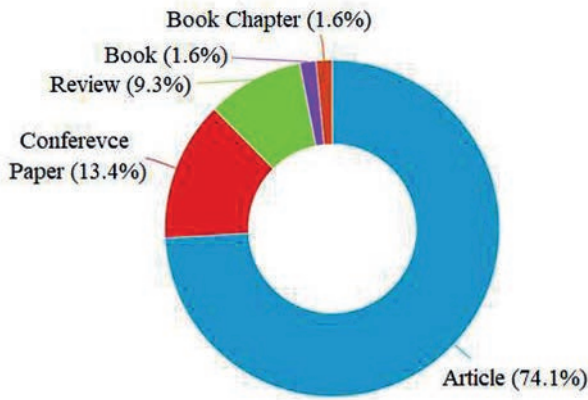


Рис. 1. Розподіл публікацій за категоріями

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-

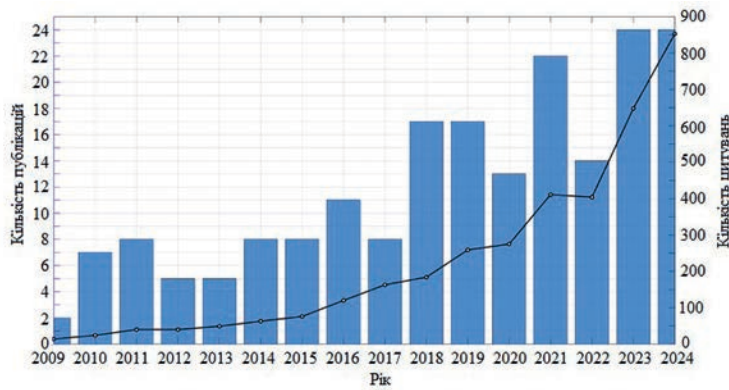


Рис. 2. Графік публікацій та цитувань статей за період 2009–2024 рр.

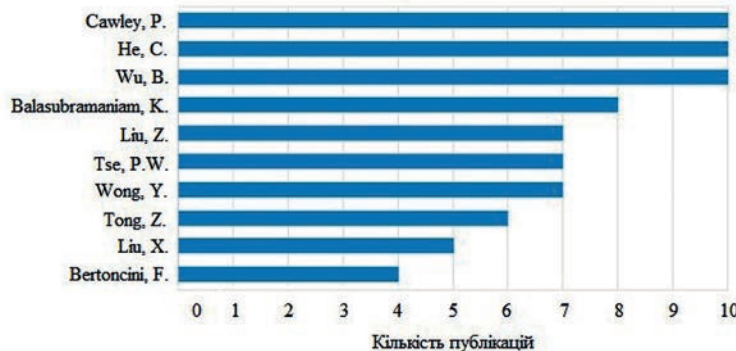


Рис. 3. Діаграма розподілу публікацій за авторами

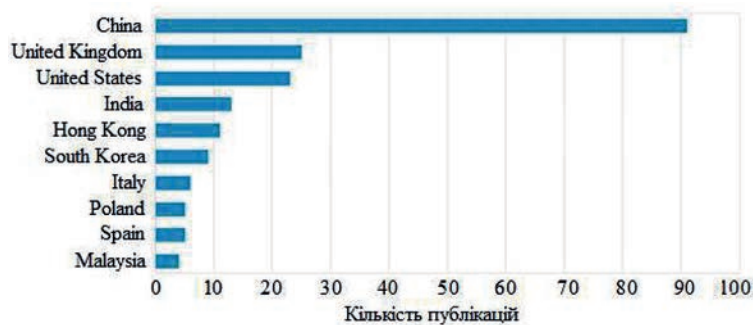


Рис. 4. Діаграма розподілу публікацій за країнами

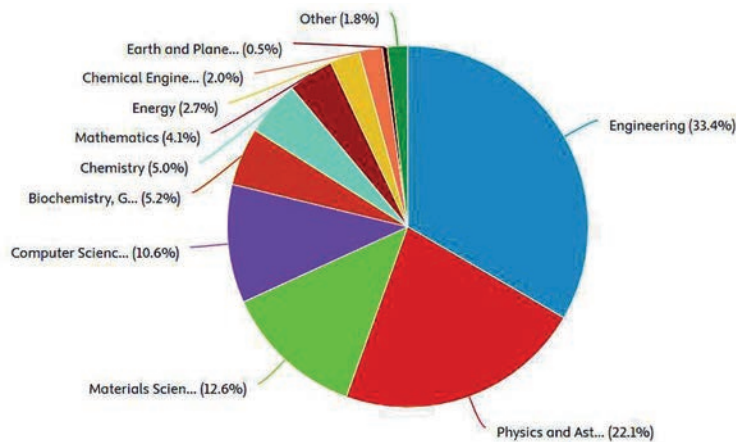


Рис. 5. Діаграма, що відображає використання результатів досліджень магнітострикційного УНК у різних галузях науки і техніки

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-

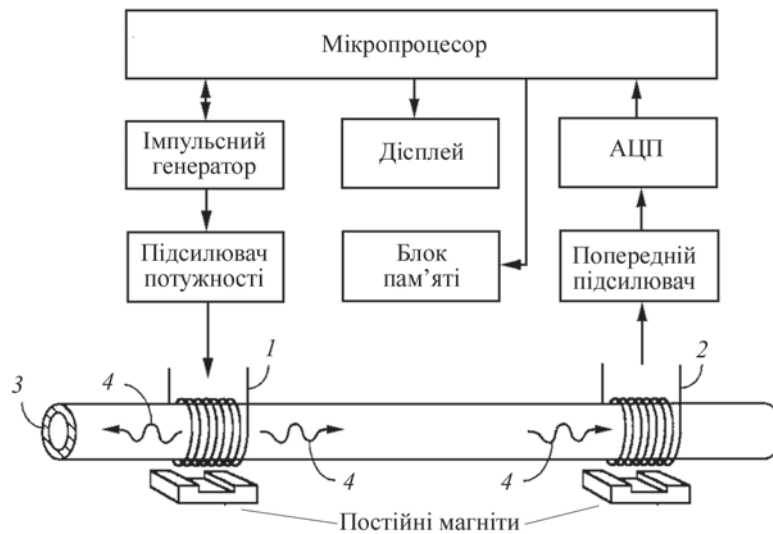


Рис. 6. Структура магнітострикційного засобу контролю

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, кріпляться 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 дровів. 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 загукання 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-

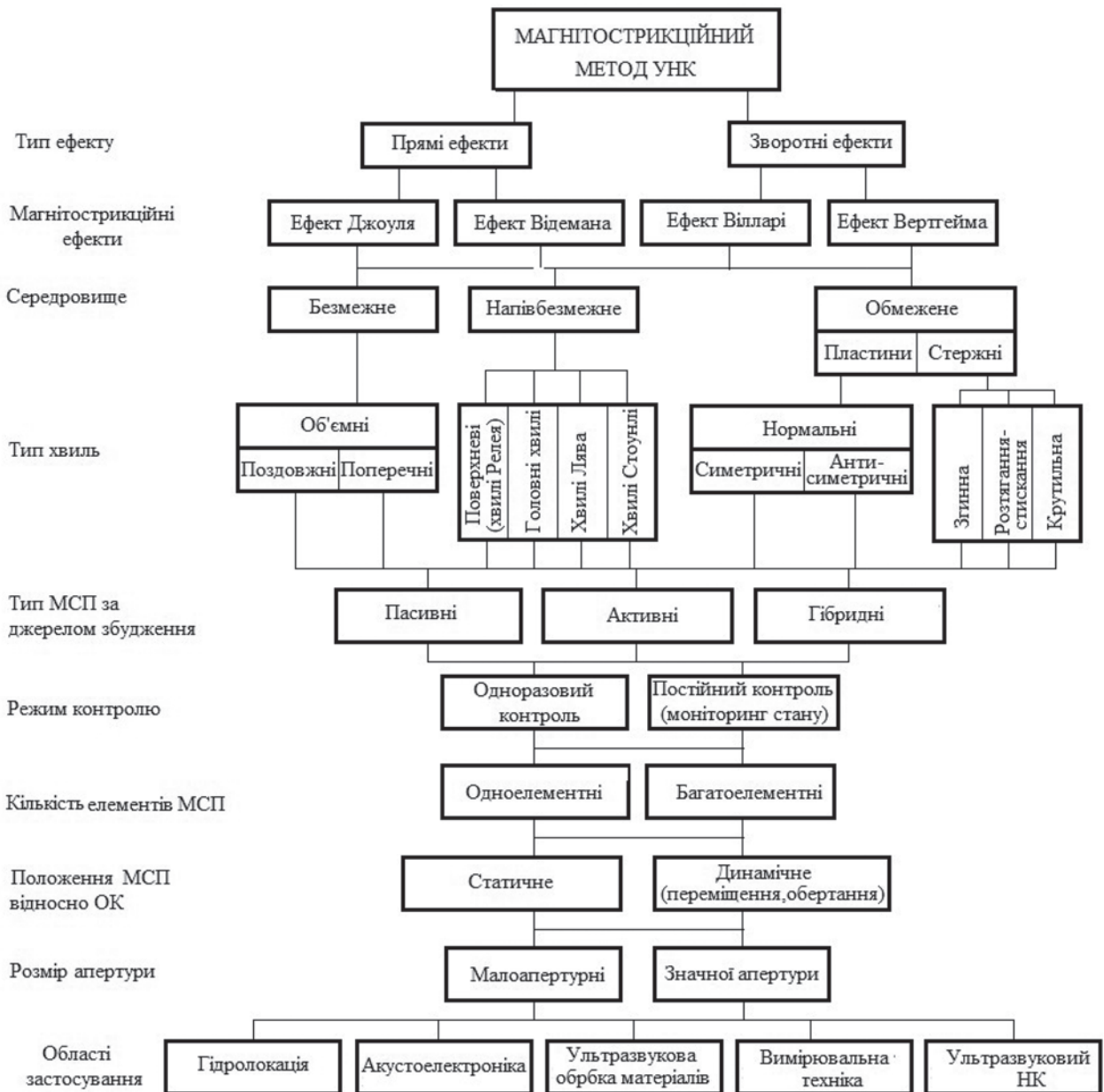


Рис. 7. Магніострикційні ефекти та їх практичне використання

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 (плівок, 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*, **SSDC**, 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. Ekrem, 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/technd2022.03.069>
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

ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ ПОГЛИНАЮЧИХ СТРИЖНІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАХИСТУ ВВЕР-1000 В ПРОЦЕСІ МОНТАЖУ ТА ПОДАЛЬШОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, О.О. Махненко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

Система управління та захисту (СУЗ) з поглинаючими елементами (ПЕЛ СУЗ) відіграють ключову роль у стабільній та безпечній роботі ядерного реактора ВВЕР-1000, забезпечуючи контроль потужності та аварійну зупинку. Надійність ПЕЛ СУЗ безпосередньо залежить від цілісності оболонкових елементів поглинаючих стрижнів (ПС), які піддаються впливу монтажного зварювання та експлуатаційних навантажень. Важливою характеристикою надійності такого типу конструкцій є напружений стан на різних етапах монтажу та експлуатації. Дослідження зосереджено на аналізі напружено-деформованого стану оболонкових елементів ПС, що зумовлений технологічним етапом монтажного зварювання та експлуатаційного навантаження. Шляхом чисельного моделювання термодформацийних процесів показано, що геометричні особливості конструкції зумовлюють принципову різницю в розподілі напружень, а саме формування двовісного напруженого стану в області зварювання конуса з оболонкою ПС і тривісного напруженого стану в зоні з'єднання наконечника з оболонкою ПС. Показано, що під час аварійної зупинки реактора та його охолодження до кімнатної температури відбувається суттєве зниження зовнішнього тиску теплоносія та різке зростання максимальних напружень у стінці оболонки ПС, що є показником підвищеної схильності до втрати цілісності. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: ядерний реактор, ВВЕР-1000, ПЕЛ СУЗ, поглинаючі стрижні, зварні оболонки, напружений стан, математичне моделювання

Вступ. Експлуатація атомних електростанцій пов'язана з необхідністю гарантування високого рівня безпеки як окремих компонентів, так і всього циклу енергетичної генерації. Це стосується забезпечення цілісності конструкцій та компонентів ядерних реакторів і супутнього технологічного обладнання, планового протікання процесів ядерних і супутніх реакцій, уникнення попадання радіоактивних речовин у навколишнє середовище, безпеки праці обслуговуючого інженерного персоналу тощо. Складність і взаємопов'язаність фізичних і технологічних процесів, а також значний вплив людського фактору зумовлює необхідність детального та всебічного вивчення закономірностей їхнього впливу на безпеку експлуатації ядерних реакторів.

Важливою частиною реактора є система управління та захисту (СУЗ), до складу якої належать поглинаючі елементи (ПЕЛ СУЗ) (рис. 1, а), які відіграють критичну роль у забезпеченні стабільної та безпечної роботи реактора, виконуючи низку важливих функцій [1, 2]. По-перше, СУЗ дозволяє точно контролювати та регулювати потужність реактора, забезпечуючи його ефективну й безпечну експлуатацію. Вона відповідає за запуск реактора та його поступовий вихід на заданий рівень потужності, а також за зміну режимів роботи шля-

хом переходу з одного рівня потужності на інший. По-друге, СУЗ забезпечує можливість оперативно припинення ланцюгової реакції ядерного поділу в разі виникнення нештатних ситуацій або необхідності швидкого зниження потужності. Це досягається шляхом скидання в активну зону ПЕЛ, які ефективно поглинають нейтрони, запобігаючи подальшому розвитку реакції. Нарешті, СУЗ є важливим елементом загальної безпеки реактора, оскільки її функціонування дозволяє виключити ймовірність неконтрольованого розвитку ядерної реакції, тим самим запобігаючи можливим аварійним ситуаціям.

Таким чином, забезпечення надійності експлуатації ядерного реактора безпосередньо пов'язане з гарантуванням цілісності елементів СУЗ. Важливість цього фактора зумовила формулювання низки регламентних вимог щодо аналізу технічного стану та працездатності окремих елементів СУЗ, зокрема, міцності та герметичності поглинаючих стрижнів (ПС) [3–5].

Особливістю цих ПС є їхній складний профіль і наявність монтажних зварних з'єднань оболонки з конусом і наконечником. Це, у свою чергу, визначає складний розподіл механічних напружень в умовах експлуатації, що зумовлено нелінійною взаємодією

Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Великоіваненко О.А. – <https://orcid.org/0009-0007-3704-2000>,

Розинка Г.П. – <https://orcid.org/0009-0009-1750-7266>, Махненко О.О. – <https://orcid.org/0000-0003-2319-2976>

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, О.О. Махненко, 2025

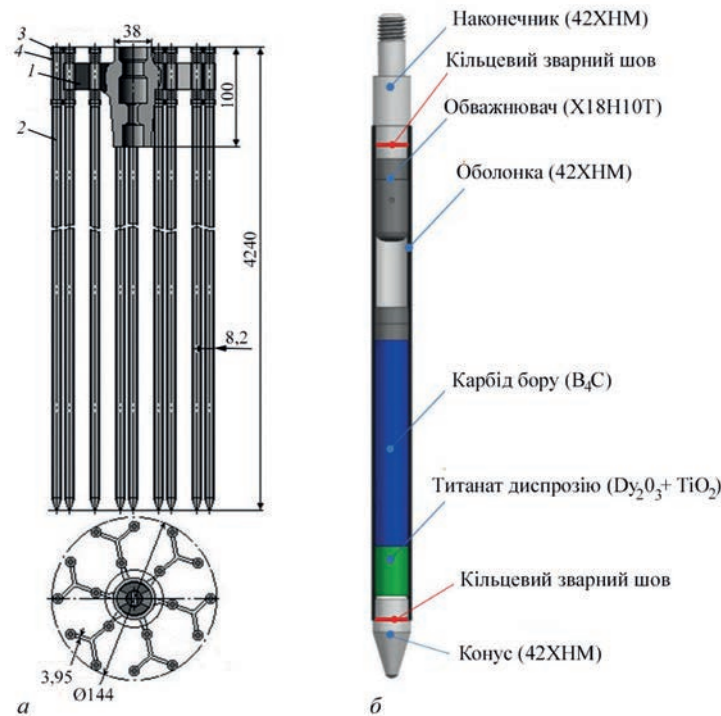


Рис. 1. Ескізи поглинаючих елементів ПЕЛ СУЗ (а) і поглинаючого стрижня ПС (б): 1 – головка; 2 – ПС; 3 – гайка; 4 – пружина

залишкових післязварювальних напружень з експлуатаційними. Відомо, що величина напружень характеризує схильність до крихкого, крихко-в'язкого та втомного руйнувань конструкційних матеріалів [6–8]. Тому розуміння закономірностей розподілу напружень у перерізі оболонкових ПС СУЗ на різних етапах експлуатації є важливим для коректного прогнозування надійності при проектуванні, технічній діагностиці фактичного стану та продовженні ресурсу на позапроектний період.

Метою даного дослідження є визначення впливу процесу монтажного зварювання та термосилового експлуатаційного впливу на напружено-деформований стан (НДС) оболонкових елементів ПЕЛ СУЗ.

Виклад основного матеріалу. ПС (рис. 1, б) являє собою стрижень з циліндричною оболонкою із хромонікелевого сплаву 42ХНМ [9] із зовнішнім діаметром 8,2 мм і товщиною стінки 0,50...0,55 мм, герметично закритий кінцевими деталями (наконечником, який забезпечує з'єднання з несучою системою ПЕЛ СУЗ, та обтяжуючим конусом) і заповнений поглинаючим матеріалом [10].

Температурні залежності фізичних і механічних властивостей корозійностійкого сплаву 42ХНМ наведені в таблиці. Границя текучості сплаву 42ХНМ при виготовленні безшовних тонкостінних холоднодеформованих труб регламентується на рівні $\sigma_T = 520$ МПа при $T = 20$ °С, $\sigma_T = 245$ МПа при $T = 375$ °С.

Герметизація оболонки здійснюється шляхом електродугового зварювання верхньої та нижньої кінцевих деталей у середовищі інертних газів. Усередині оболонки розташовано поглинаючий стрижень із дисперсійного матеріалу, такого як карбід бору (B_4C) і титанат диспрозію ($Dy_2O_3 + TiO_2$) в алюмінієвій матриці або гафній [11]. Вигорання цих елементів та їх розпухання призводить до появи надлишкового внутрішнього тиску $P_{внутр}$ всередині циліндричної оболонки (близько 3,0 МПа) та за певних умов має вплив на несучу здатність і кількісні показники технічного стану. У проектних умовах експлуатації ПЕЛ діє зовнішній тиск теплоносія $P_{зовн} = 16$ МПа за температури $T_0 = 350$ °С. Окрім проектного режиму необхідно також враховувати ситуацію аварійної зупинки експлуатації реактора, коли $P_{зовн}$ знижується до нуля, а температура – до кімнатної $T_0 = 20$ °С. Підсумовуючи сказане, можна виділити три характерних стани ПС СУЗ, а саме: після монтажного зварювання, в умовах проектного експлуатації на стаціонарному режимі та за зупинки й охолодження реактора.

Як зазначалося вище, типовою характеристикою надійності відповідальних елементів енергетичного обладнання, яка визначається під час експертизи стану, є рівень механічних напружень, що формується на різних етапах експлуатації. Для випадку оболонкових ПЕЛ СУЗ розподіл напружень у перерізі конструкції визначається

Температурні залежності фізичних і механічних властивостей сплаву 42ХНМ [9]

$T, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ГПа}$	$\alpha \cdot 10^6, 1/^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{см} \cdot ^\circ\text{C})$	$c_p, \text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
20	234	14,5	0,050	3,550
100	223	15,0	0,100	3,686
200	218	15,6	0,130	3,800
300	210	16,0	0,150	3,854
400	204	16,6	0,180	3,955
500	196	17,0	0,205	3,991
600	188	17,5	0,230	4,040
700	143	18,0	0,230	4,043
800	135	18,5	0,230	4,113
900	118	19,0	0,230	4,115
1000	96	19,5	0,230	4,115
1100	46	19,5	0,230	4,115
1200	8	19,5	0,230	4,115

взаємодією післязварювальних напружень із зовнішніми навантаженнями та температурним впливом. Тому для прогнозування полів напружень необхідно врахувати як технологічний аспект монтажного зварювання, тобто кінетику термодетформованого стану матеріалу конструкції під дією локального джерела нагрівання аж до повного охолодження та настання залишкового стану, так і подальшого експлуатаційного нагрівання та навантаження.

Просторова неоднорідність і нелінійна кінетика фізико-механічних процесів, що визначають поточний та залишковий НДС конструкції при монтажному зварюванні та подальшій експлуатації, ускладнює використання спрощених аналітичних методів аналізу. Крім того, невеликі масштаби елементів ПЕЛ СУЗ та їхня геометрична форма ускладнюють використання інструментальних засобів контролю НДС. Тому раціональним є залучення методів математичного моделювання та комп'ютерної симуляції відповідних технологічних процесів на основі мультифізичних математичних моделей та скінченно-елементних засобів їх чисельної реалізації.

У рамках цієї роботи розглядалась задача чисельного прогнозування кінетики температурного поля та розвитку пружно-пластичних деформацій у рамках постановки крайової задачі нестационарної термопластичності. Так, кінетика температурного поля описувалась шляхом чисельного розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності, а саме [12]:

$$c_p(r, \beta, z, T) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z)}{\partial \tau} = \nabla \left[\lambda(r, \beta, z, T) \cdot \nabla T(r, \beta, z) \right], \quad (1)$$

де λ, c_p – теплопровідність і об'ємна теплоємність матеріалу конструкції відповідно в даній точці як функції від просторових координат і температури.

Джерелом тепла є нормально розподілений поверхневий потік від зварювальної дуги в області монтажного з'єднання наконечника з оболонкою та конуса з оболонкою. Дисипація тепла через поверхню при зварюванні відбувається відповідно до закону Ньютона-Ріхмана (конвективна тепловіддача) і Стефана-Больцмана (інфрачервоне випромінювання) та описується відповідними потоками тепла. Таким чином, граничні умови щодо сформульованої задачі (1) наступні [12]:

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = -q_w + \alpha_T \cdot (T - T_C) + \varepsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot (T^4 - T_C^4), \quad (2)$$

де n – нормаль до поверхні; α_T – коефіцієнт тепловіддачі; T_C – температура навколишнього середовища; ε – ступінь чорноти матеріалу; σ_{SB} – константа Стефана-Больцмана; q_w – потік енергії зварювального нагрівання.

Математичний розгляд об'єднаної задачі кінетики температурного поля та розвитку НДС базується на скінченно-елементному описі з використанням восьмивузлових скінченних елементів (СЕ). У межах об'єму СЕ розподіли температур, напружень і деформацій приймаються однорідними, а приріст тензора деформацій може бути представлено у відповідності до наступного виразу [13]:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} \cdot d\varepsilon_T, \quad (3)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e, d\varepsilon_{ij}^p, \delta_{ij} \cdot d\varepsilon_T$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності та кінетикою неоднорідного температурного поля відповідно.

Тензори механічних напружень σ_{ij} і пружних деформацій $d\varepsilon_{ij}^e$ пов'язані між собою узагальненим законом Гука, тобто [14]:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma}{2 \cdot G} + \delta_{ij} \cdot (K \cdot \sigma + \varphi), \quad (4)$$

де σ – середнє значення нормальних компонентів тензора напружень σ_{ij} , тобто $\sigma = \frac{(\sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz} + \sigma_{rr})}{3}$,

$$K = \frac{1 - 2 \cdot \nu}{E} - \text{модуль об'ємного стиску.}$$

Приріст деформацій миттєвої пластичності $d\varepsilon_{ij}^p$ від напруженого стану в конкретному СЕ може бути обчислене за допомогою лінійної залежності скалярної функції Λ і девіаторної складової тензора напружень, а саме [14]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\Lambda \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma). \quad (5)$$

Конкретне значення функції Λ залежить від напруженого стану в розглянутій області конструкції, а також від форми поверхні плинності матеріалу, яка характеризується напруженням σ_s :

$$\begin{aligned} d\Lambda &= 0, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s, \\ d\Lambda &> 0, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_s \text{ неприпустимий.} \end{aligned} \quad (6)$$

Виходячи зі вищенаведеного, прирости тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції приросту відповідних складових:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} &= \Psi \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma) + \delta_{ij} \cdot (K \cdot \sigma + \Delta\varepsilon_T) - \\ & - \frac{1}{2 \cdot G} \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma)^* - (K \cdot \sigma)^*, \end{aligned} \quad (7)$$

де символ «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування, Ψ – функція стану матеріалу, що визначає умову пластичного плину відповідно до критерію Мізеса [15]:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2 \cdot G}, \\ \text{якщо } \sigma_i &< \sigma_s = \sigma_T, \\ \Psi &> \frac{1}{2 \cdot G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_s \text{ неприпустимий.} \end{aligned} \quad (8)$$

Визначення функції Ψ проводиться ітеруванням на кожному кроці чисельного простежування в рамках крайової задачі нестационарної термопластичності, що дозволяє розв'язати нелінійність за пластичним плином матеріалу.

Комп'ютерна реалізація наведених алгоритмів дозволила провести аналіз закономірності формування НДС ПС СУЗ на етапі монтажного зварювання та подальшої експлуатації. Зварювання наконечника з оболонкою (рис. 2) у середовищі аргону відбувається на наступному режимі згідно з [10]: $U = 120$ В; $I = 20$ А; $v_{зв} = 13$ м/год. Зварюван-

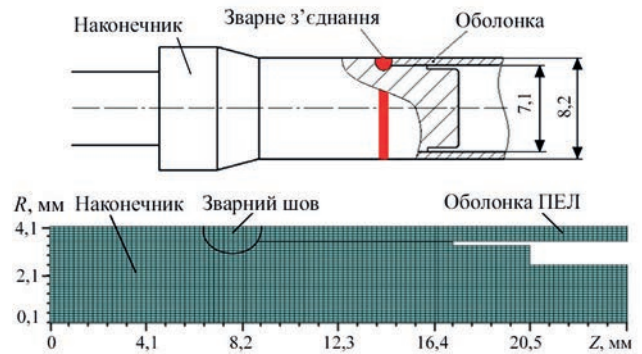


Рис. 2. Ескіз і скінченно-елементна модель зварного з'єднання оболонки ПС СУЗ з наконечником [10]

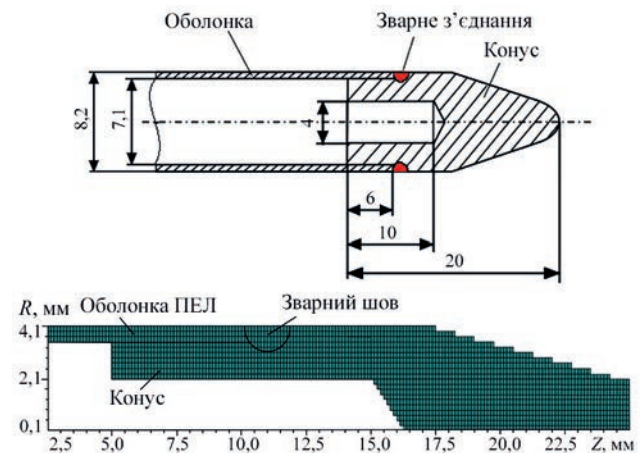


Рис. 3. Ескіз і скінченно-елементна модель зварного з'єднання оболонки ПС СУЗ з конусом [10]

ня зібраного конуса з оболонкою (рис. 3) у середовищі аргону відбувається на наступному режимі: $U = 10$ В; $I = 30$ А; $v_{зв} = 12$ м/год.

Як показали результати розрахунків (рис. 4, а), форма проплавлення в області з'єднання конуса з оболонкою ПС забезпечує належне нероз'ємне з'єднання цих компонентів. Залишкові післязварювальні напруження характеризуються підвищенням нормальних напружень в окружному ($\sigma_{\beta\beta} \approx 590$ МПа) та осьовому ($\sigma_{zz} \approx 540$ МПа) напрямках в області, близької до середини по товщині стінки конуса (рис. 5). Крім того, область розтягувальних напружень розповсюджується аж до внутрішньої поверхні оболонки області з'єднання з конусом. На противагу цьому, зовнішня поверхня характеризується стискаючими нормальними напруженнями. Максимальні значення окружних напружень близькі до значень границі текучості матеріалу у відповідності до критерію пластичності Мізеса. На противагу цьому, радіальна компонента напружень майже в п'ять разів нижча ($\sigma_{rr} \approx 105$ МПа). Така двовісність поля напружень, загалом, є характерною для циліндричних оболонкових елементів, з'єднаних кільцевим зварним швом, а особливості розподілу напружень

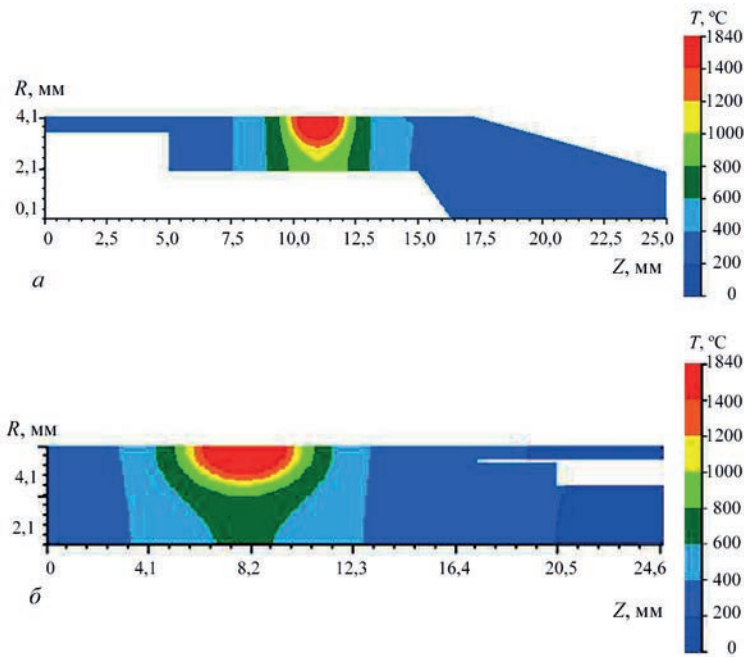


Рис. 4. Розрахунковий розподіл максимальних температур у зоні зварного з'єднання оболонки ПС СУЗ: з конусом (а) і з наконечником (б)

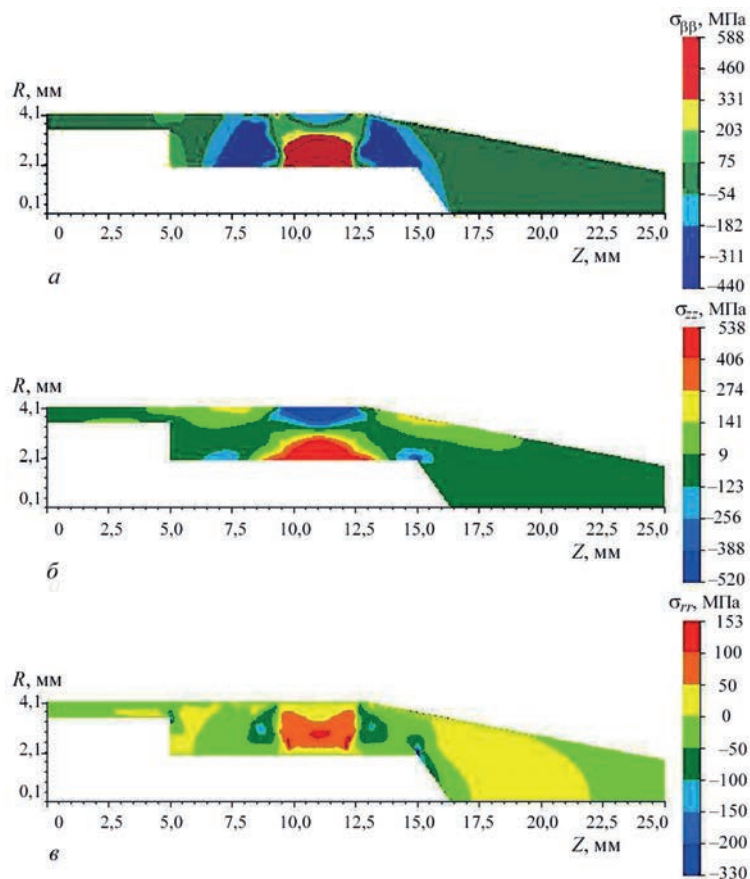


Рис. 5. Розрахункові розподіли залишкових післязварювальних напружень у зоні зварного з'єднання конуса з оболонкою ПС СУЗ: а – окружна компонента, б – осьова компонента, в – радіальна компонента

зумовлені співвідношенням товщини стінки до радіуса циліндра.

В умовах експлуатаційного навантаження за проектним стаціонарним режимом ($T_0 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{зовн}} = 16 \text{ МПа}$, $P_{\text{внутр}} = 3 \text{ МПа}$) розподіл напружень

принципово не змінюється (рис. 6), проте спостерігається певне зменшення максимальних напружень ($\sigma_{\beta\beta} \approx 500 \text{ МПа}$, $\sigma_{zz} \approx 470 \text{ МПа}$, $\sigma_{rr} \approx 85 \text{ МПа}$), викликане природнім зниженням границі текучості за температури $350 \text{ }^\circ\text{C}$ у порівнянні з кім-

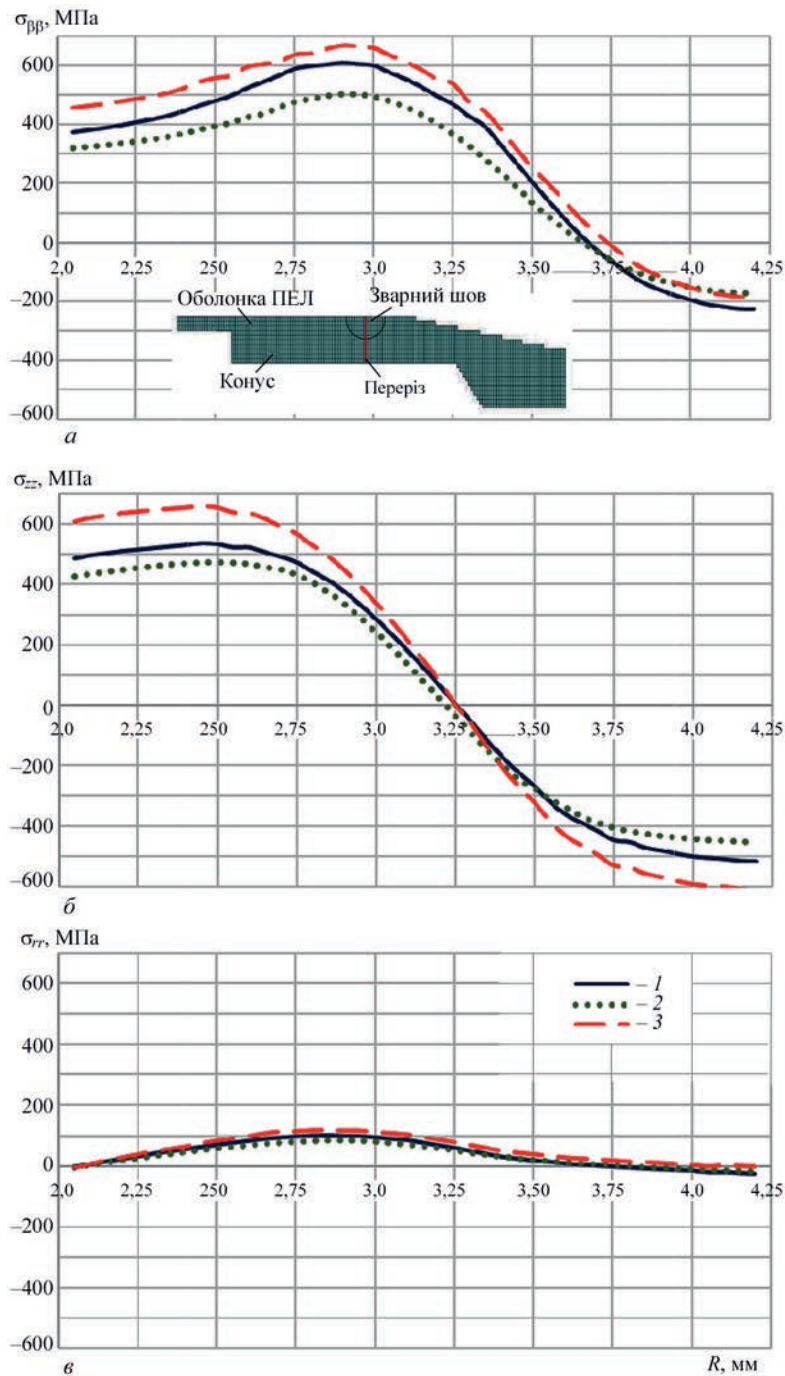


Рис. 6. Розрахункові розподіли залишкових і експлуатаційних напружень у перерізі по товщині зварного з'єднання конуса з оболонкою ПС: окружних (а), осьових (б), радіальних (в): 1 – залишкові напруження; 2 – $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$, $P_{\text{зовн}} = 16\text{ МПа}$; 3 – $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$

натною, за якою проводився процес монтаж-ного зварювання. Експлуатаційна ситуація зупинки роботи реактора, охолодження ПЕЛ СУЗ до кімнатних температур і зниження зовнішнього тиску ($P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$, $P_{\text{зовн}} = 0\text{ МПа}$, $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), призводить до значного зростання максимальних напружень ($\sigma_{\phi\phi} \approx 670\text{ МПа}$, $\sigma_{zz} \approx 660\text{ МПа}$, $\sigma_{rr} \approx 120\text{ МПа}$) у стінці оболонки (рис. 6) з тієї причини, що внутрішній тиск від наповнювача не компенсується зовнішнім тиском охолоджувача, тому може розглядатись як найбільш несприятлива з точки

зору міцності зварного з'єднання оболонки ПС з конусом.

Розподіл максимальних температур в області з'єднання наконечника з оболонкою показує значне проплавлення, що забезпечує належне нероз'ємне з'єднання окремих частин (рис. 4, б). Принциповою відмінністю розподілу залишкових напружень (рис. 7) є те, що зварне з'єднання знаходиться в суцільній частині ПС СУЗ, тому область високих післязварювальних окружних і осьових напружень формується в підповерхневій зоні, де

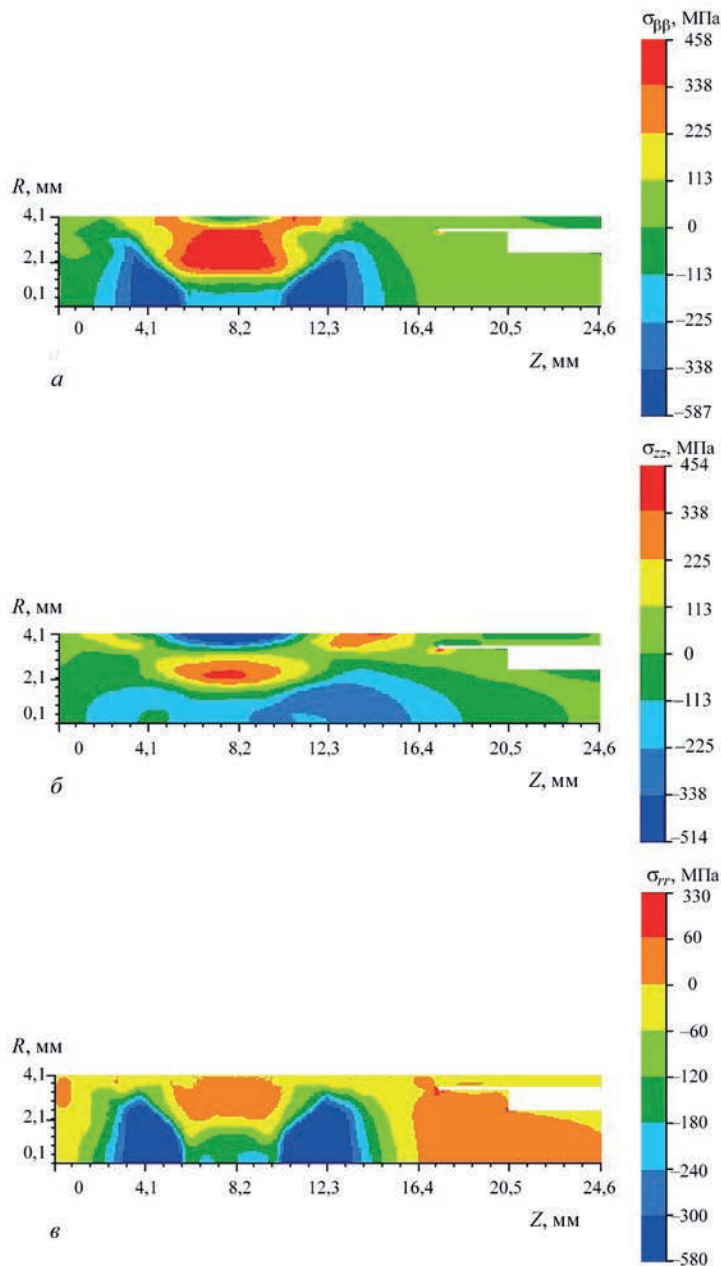


Рис. 7. Розрахункові розподіли залишкових післязварювальних напружень у зоні зварного з'єднання наконечника з оболонкою ПС СУЗ: окружних (а), осьових (б), радіальних (в)

слід очікувати максимального зниження міцності з'єднання. Крім того, у порівнянні зі зварним з'єднанням оболонки з конусом спостерігається нижчий рівень максимальних залишкових напружень ($\sigma_{\phi\phi} \approx 460$ МПа, $\sigma_{zz} \approx 350$ МПа, $\sigma_{rr} \approx 35$ МПа).

Як і для випадку області з'єднання конуса з оболонкою, за умов проєктної експлуатації в області з'єднання наконечника з оболонкою спостерігається певне зниження напружень ($\sigma_{\phi\phi} \approx 420$ МПа, $\sigma_{zz} \approx 300$ МПа, $\sigma_{rr} \approx 10$ МПа) (рис. 8), тоді як найнебезпечніший напружений стан формуються під час зупинки роботи реактора (рис. 8), коли немає компенсуючих стискаючих зусиль від зовнішнього тиску, а перерозподіл напружень при зростанні границі текучості в результаті зниження темпера-

тури з 350 °С до кімнатної викликає збільшення нормальних напружень більше ніж на 100 МПа ($\sigma_{\phi\phi} \approx 530$ МПа, $\sigma_{zz} \approx 410$ МПа, $\sigma_{rr} \approx 30$ МПа).

Висновки

1. Розроблено модель кінетики температурного поля та напружено-деформованого стану ПС СУЗ ВВЕР-1000 при монтажному зварюванні конуса з оболонкою ПС і наконечника з оболонкою ПС. Для цього використано чисельне розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності поряд із послідовним простежуванням розвитку пружно-пластичних деформацій суцільного середовища шляхом скінченно-елементного розв'язання крайової задачі нестационарної термопластичності.

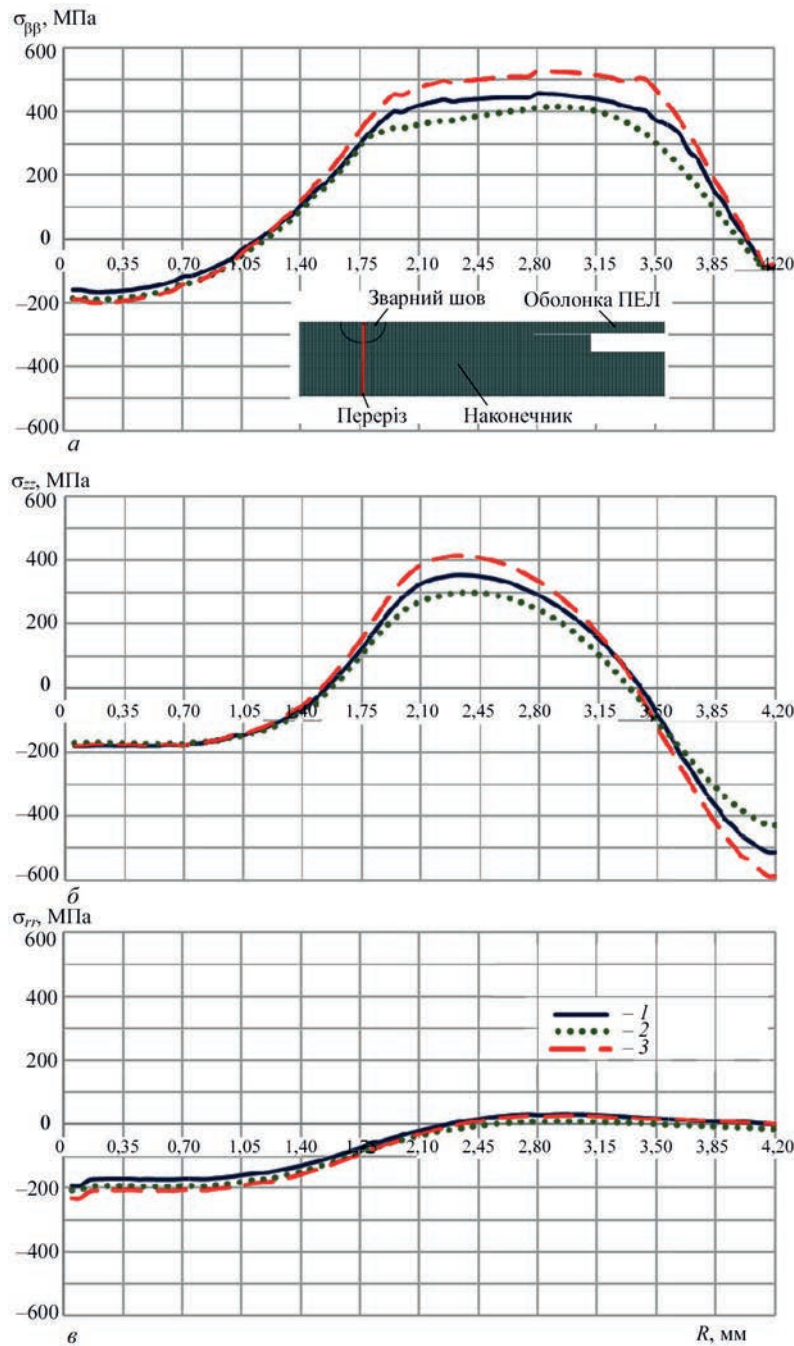


Рис. 8. Розрахункові розподіли залишкових і експлуатаційних напружень у перерізі по товщині зварного з’єднання наконечника з оболонкою ПС: окружних (а), осьових (б), радіальних (в): 1 – залишкові напруження; 2 – $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$, $P_{\text{зовн}} = 16\text{ МПа}$; 3 – $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$

2. Показано, що розвиток термдеформованого стану конструкції ПС СУЗ у процесі зварювання конуса з оболонкою призводить до формування двовісного НДС, характерного для зварювання товстостінних труб, зі значним превалюванням окружних і повздовжніх напружень. У зоні з’єднання наконечника з оболонкою ПС СУЗ зварний шов розташований у суцільній частині конструкції, що зумовлює формування підповерхневої області інтенсивних післязварювальних окружних і осьових напружень. При цьому максимальні радіальні напруження зростають до рівня інших компонентів

тензора напружень. У результаті ця ділянка конструкції перебуває в стані тривісного напруження.

3. Під час експлуатації загальна картина розподілу напружень зберігається, але відбувається зниження їхніх максимальних значень. Це явище пов’язане з тим, що при робочій температурі $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ границя текучості матеріалу зменшується порівняно з її значенням за кімнатної температури, за якої здійснювалося монтажне зварювання. Внаслідок цього матеріал стає більш податливим до пластичних деформацій, що сприяє частковому перерозподілу напружень.

4. Під час зупинки реактора та його охолодження до кімнатної температури відбувається суттєве зниження зовнішнього тиску. Оскільки внутрішній тиск наповнювача більше не врівноважується тиском охолоджувача, це спричиняє різке зростання максимальних напружень у стінці оболонки ПС СУЗ. Така ситуація створює найнесприятливіші умови для міцності зварних з'єднань оболонки, підвищуючи ризик розвитку дефектів і зниження експлуатаційної надійності конструкції.

Список літератури/References

- Misak, J. (2024) History, specific design features, and evolution of WWER reactors. *Nuclear Power Reactor Designs: From History to Advances*, **2024**, 57–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99880-2.00004-7>
- Pyrohov, T., Korolev, A., Inyushev, V., Kurov, V. (2020) Analysis of accidents of the WWER-1000 reactor in which emergency cooling heat exchangers operate. *Technology Audit and Production Reserves*, **5(55)**, 43–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.213227>
- (2013) *Guidelines for integrity and lifetime assessment of components and piping in WWER nuclear power plants (VERLIFE)*. Vienna, Int. At. Energy Agency.
- ПНАЭ Г-7-002-86. *Норми розрахунку на міцність обладнання та трубопроводів атомних енергетичних установок*. PNAE G-7-002-86. *Standards for strength calculation of equipment and pipelines of nuclear power installations* [in Ukrainian].
- API 579-1/ASME FFS-1. Fitness-For-Service (2016) Washington: American Petroleum Institute, American Society of Mechanical Engineers.
- Lemaitre, J., Desmorat, R. (2005) *Engineering damage mechanics. Ductile, creep, fatigue and brittle failures*. Berlin, Springer-Verlag.
- Amsterdam, E., Grooteman, F. (2016) The influence of stress state on the exponent in the power law equation of fatigue crack growth. *Int. J. Fatigue*, **82(3)**, 572–578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.09.013>
- Dormieux, L., Kondo, D. (2016) *Micromechanics of fracture and damage*. Vol. 1. London: ISTE Ltd.
- (1967) *Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник*. Под ред. Неймарк Б.Е. Москва, Энергия.
(1967) *Physical properties of steels and alloys used in power engineering: Refer. book*. Ed. by B.E. Neimark. Moscow, Energiya [in Russian].
- Куштим А.В., Зігунов В.В. Грицина В.М. та ін. (2023) Характеристики зварних з'єднань поглинаючих елементів зі сплаву 42ХНМ для стрижнів системи управління та захисту ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*, **4(100)**, 38–48. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4\(100\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4(100).04)
Kushtym, A.V., Zihunov, V.V., Hrytsyna, V.M., et al. (2023) Characteristics of welded joints of absorbing elements from 42KhNM alloy for control and protection system rods of WWER-1000. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, **4(100)**, 38–48 DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4\(100\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4(100).04) [in Ukrainian].
- Risovani, V.D., Zakharov, A.Z., Muraleva, E.M., Kosenkov, V.M., Latypov, R.N. (2019) Dysprosium hafnate as absorbing material for control rods. *J. of Nuclear Materials*, **355(1–3)**, 163–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.05.029>
- Karkhin, V.A. (2019) *Thermal processes in welding*. Singapore, Springer Singapore.
- Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Rozyuka, G.F. et al. (2019) Prediction of susceptibility of welded joints of titan γ -aluminide based alloy to cold cracking in electron-beam welding. *Tekhnologicheskie Sistemy*, **3**, 73-80. DOI: <https://dx.doi.org/10.29010/88.9>
- Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Popov, A.V., Sidoruk, V.A., Khimich, A.N. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, **55(1)**, 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>
- Махненко В.І. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
Makhnenko, V.I. (2006) *Safe operation resource of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

FEATURES OF THE STRESS STATE OF WELDED ABSORBER RODS IN THE CONTROL AND PROTECTION SYSTEM OF WWER-1000 DURING ASSEMBLY AND SUBSEQUENT OPERATION

O.S. Milenin, O.A. Velykoivanenko, G.P. Rozyuka, O.O. Makhnenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: asmilenin@ukr.net

The rod control cluster assemblies with absorber rods (AR) plays a key role in the stable and safe operation of WWER-1000 reactor, ensuring power regulation and emergency shutdown. The reliability of AR directly depends on the integrity of the AR shell components, which are subjected to both welding stresses during assembly and to operational loads. A critical reliability factor for such structures is the stress-strain state at various stages of assembly and operation. This study focuses on the analysis of the stress-strain state in the AR shell components caused by the technological phase of installation welding and operational loading. Numerical modelling of thermo-mechanical processes shows that the geometric characteristics of the structure fundamentally affect the stress distribution: a biaxial stressed state forms in the area where the cone is welded to the AR shell, and a triaxial stressed state develops in the zone where the tip is joined to the shell. It is shown that during reactor emergency shutdown and cooling to room temperature, there is a significant drop in the external coolant pressure and a sharp increase in the maximum stresses within the AR shell wall, indicating an increased risk of integrity loss. 15 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: nuclear reactor; WWER-1000, rod control cluster assemblies, absorber rods, welded shells, stressed state, modelling

Отримано 10.06.25

Отримано у переглянутому вигляді 24.07.25

Прийнято 29.08.25

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ REINFORCEMENT LEARNING ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ АВТОНОМНОСТІ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Д.В. Петренко, А.Г. Протасов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: petrenkod555@gmail.com, a.g.protasov@gmail.com

Стаття присвячена проблемі підвищення автономності мобільних роботів, які сьогодні мають широке застосування в різних сферах діяльності людини. Удосконалення засобів керування рухом роботів у реальних умовах за рахунок впровадження інтелектуальних систем керування дозволить їм адаптуватись до зміни середовища, адекватно реагувати на непередбачувані ситуації та ефективніше взаємодіяти з іншими учасниками технологічного процесу. Інтелектуальна система керування рухом мобільного робота поєднує як апаратні, так і програмні складові. До програмних компонентів належать методи машинного навчання, які засновані на методах побудови алгоритмів, здатних навчатися. У статті розглядаються найпопулярніші алгоритми машинного навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL), які використовуються в інтелектуальних системах керування. У цьому методі головними компонентами є агент і середовище. Середовище являє собою динамічний світ, у якому діє агент, і з яким він постійно взаємодіє. Алгоритми машинного навчання RL умовно поділяються на дві групи – алгоритми, які використовують модель, і алгоритми без моделі. Із результатів проведеного аналізу очевидно, що для підвищення автономності руху мобільного робота у складних динамічних умовах необхідно застосовувати гібридні підходи, що поєднують навчання без моделі, як у алгоритмів PPO, SAC чи TD3, із модельними компонентами, як у алгоритмів PlaNet або MuZero. Також ефективною стратегією може бути автоматична адаптація гіперпараметрів під час навчання, наприклад коефіцієнта ентропії в алгоритмі SAC або коефіцієнта обмеження політики в алгоритмі PPO, що дає підвищену стійкість до змін у середовищі та стану спостереження, зниження потреби у великій кількості взаємодій із середовищем, гнучкість адаптації до нових задач або зміни цільової поведінки. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: машинне навчання, алгоритми навчання, мобільні роботи, системи керування, автономність роботів

Вступ. Сьогодні важко собі уявити сучасні промислові підприємства, логістику, оборонну та побутову сфери без використання мобільних роботів. Ефективність їх використання залежить від рівня їх автономності. Мобільні роботи працюють в обмеженому динамічному середовищі, тому потребують розширених можливостей прийняття рішень для безпечної, ефективною та результативною навігації. Впровадження інтелектуальних систем керування рухом дозволяє вдосконалити засоби керування мобільними роботами в реальних умовах, що дає можливість їм адаптуватись до зміни середовища, адекватно реагувати на непередбачувані ситуації та покращити взаємодію з іншими агентами.

Постановка проблеми. Інтелектуальна система керування рухом мобільного робота поєднує апаратні та програмні складові, які забезпечують здатність робота автономно орієнтуватися в просторі, ухвалювати рішення та виконувати задачі у змінному, частково невизначеному середовищі. До програмних компонентів систем керування рухом робота належать методи машинного навчання Machine Learning (ML), які засновані на методах побудови алгоритмів, здатних навчатися [1].

Методи машинного навчання стали потужним інструментом, який дозволяє роботам адаптуватися до динамічних змін, обробляти дані датчиків у реальному часі та виконувати складні маневри в обмеженому просторі. Останні дослідження показують, що найпопулярнішими алгоритмами машинного навчання в інтелектуальних системах керування є методи навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) [2]. Ці методи оптимізують послідовне прийняття рішень, використовуючи попередній досвід робота та вдосконалюючи стратегію керування. Вони змінюють сприйняття роботом оточення та взаємодіють із ним для планування подальшого руху, вирішують завдання уникнення перешкод в умовах динамічного середовища, особливо коли середовище частково або повністю невідоме. Планування руху та уникнення перешкод як на глобальному, так і локальному рівні забезпечується за допомогою використання класичних алгоритмів A*, DWA, MPC, RRT тощо [3].

Методи глибокого навчання (DL) використовують нейронні мережі для обробки складних сенсорних даних, зокрема візуальної інформації з камер. Це дозволяє роботу здійснювати аналіз у

А.Г. Протасов – <https://orcid.org/0000-0002-2965-3334>, Д.В. Петренко – <https://orcid.org/0009-0003-7670-555X>

© Д.В. Петренко, А.Г. Протасов, 2025

реальному часі, розпізнавати об’єкти та приймати рішення. DL також може застосовуватися для інтеграції різних типів сенсорних даних (наприклад з камер, LiDAR або інерційних приладів IMU), що підвищує точність сприйняття та надійність автономного функціонування [4].

На сьогодні потенціал можливостей методів машинного навчання в системах керування мобільними роботами до кінця не розкритий, тому існує потреба в подальшому дослідженні методів, які підходять для керування автономними роботами в складних умовах, підкреслюючи їхні сильні сторони, обмеження та потенціал інтеграції. Зосереджуючись на алгоритмах, адаптованих до обмежених налаштувань із динамічними перешкодами, необхідно визначити найперспективніші алгоритми для модернізації та покращення, щоб підвищити автономність і стійкість роботів.

Метою даної роботи є аналіз сучасних алгоритмів машинного навчання з підкріпленням (RL), які можуть бути застосовані в системах керування мобільними роботами.

Виклад основного матеріалу. У методі машинного навчання з підкріпленням (RL) головними компонентами є агент і середовище. Середовище являє собою динамічний світ, у якому діє агент, і з яким він постійно взаємодіє. На кожному кроці цієї взаємодії агент отримує спостереження за станом середовища (St) (часткове або повне), після чого приймає рішення про виконання певної дії (At). У результаті дії агента середовище змінює свій стан, хоча його зміна може також відбуватися незалежно від впливу агента, наприклад через природні процеси чи динаміку середовища. Ключовим елементом у цій взаємодії є сигнал винагороди (Rt), який агент отримує від середовища. Винагорода – це числовий показник, що інформує агента про якість поточного стану середовища з точки зору поставленої мети (рис. 1) [5]. Метою

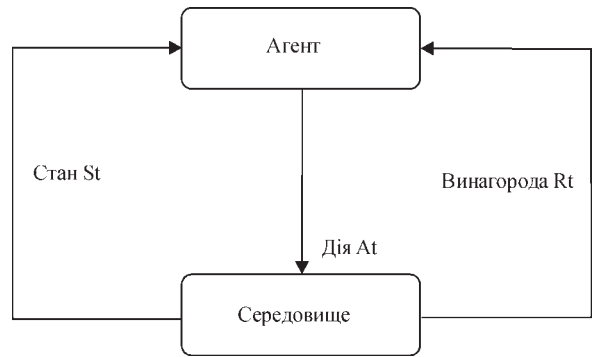


Рис. 1. Класична структура машинного навчання з підкріпленням

агента є максимізація кумулятивної винагороди, яка враховує всі винагороди, отримані протягом взаємодії з середовищем. Методи навчання з підкріпленням розроблені для того, щоб допомогти агенту навчитися ефективної поведінки, яка дозволить досягти оптимального результату. Вони базуються на поступовому покращенні стратегії дій агента через накопичення досвіду та зворотного зв’язку від середовища.

Методи RL алгоритмів можна розділити на два типи – методи на основі моделі (model-based methods) та методи без моделі (model-free methods), які відрізняються один від одного у підходах до навчання (рис. 2) [6]. Обидва типи методів знайшли широке застосування у сфері автономних мобільних роботів, які діють у динамічному середовищі [7]. Розглянемо основні принципи та алгоритми деяких підходів, їхні переваги, недоліки та сучасні тенденції інтеграції, що сприяють розширенню можливостей навчання з підкріпленням у вирішенні складних завдань.

Алгоритми RL на основі моделі. Основною перевагою використання моделі у машинному навчанні є можливість планування. Завдяки моделі агент може передбачати наслідки своїх дій у різних сценаріях, аналізувати ці наслідки та при-

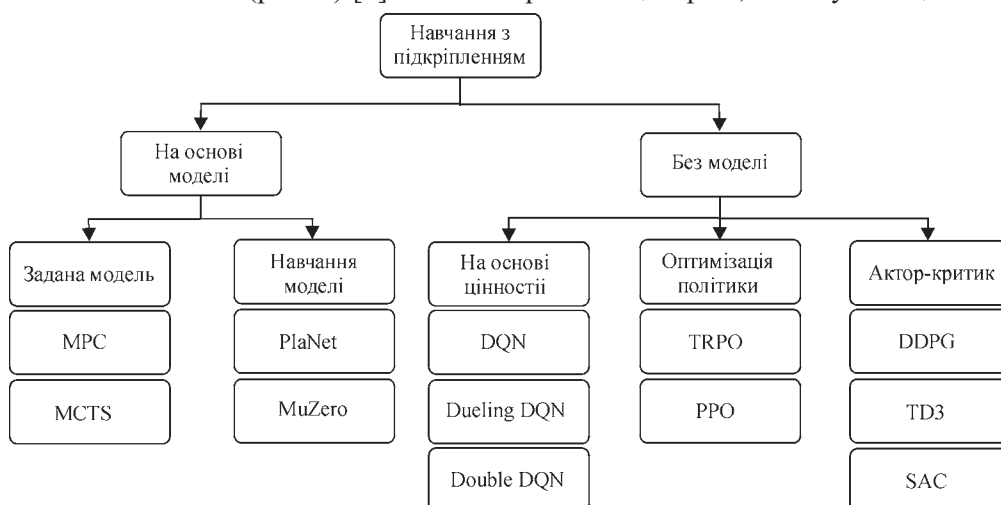


Рис. 2. Алгоритми машинного навчання з підкріпленням

ймати обґрунтованіші рішення. Результати такого планування можуть бути конвертовані у стратегічну політику, що оптимізує поведінку агента. У контексті автономних мобільних роботів модель середовища може бути використана для прогнозування динаміки руху об'єктів, оцінки ризику зіткнення або планування шляхів у реальному часі. Наприклад, методи на основі моделі можуть допомагати роботам уникати перешкоди, передбачаючи рух інших агентів у динамічному середовищі.

Метод керування Model Predictive Control (MPC) – це метод, який використовує динамічну модель системи для передбачення її майбутнього стану та знаходження оптимальної послідовності керуючих впливів, мінімізуючи функціонал вартості за обмеженнями. MPC працює за принципом рухомого горизонту прогнозування: на кожному часовому кроці система формує прогноз майбутньої поведінки робота на обмеженому горизонті часу, розв'язує задачу оптимального керування з урахуванням обмежень і обирає найкращу послідовність керуючих дій. З цієї послідовності застосовується лише перше керуюче зусилля, після чого стан системи оновлюється та весь процес повторюється з новими вхідними даними. Такий підхід забезпечує адаптивність до змін середовища в реальному часі, дотримання обмежень і мінімізацію помилок. Незважаючи на переваги (гнучкість, передбачуваність, точність), він має ряд недоліків, таких як: високі обчислювальні витрати, чутливість до похибок у математичній моделі робота, складність налаштування параметрів, обмежена швидкість реакції на раптові зміни.

Стохастичний метод пошуку Monte Carlo Tree Search (MCTS) – це метод пошуку та прийняття рішень на основі побудови ітераційного дерева пошуку за допомогою випадкового моделювання. MCTS складається з чотирьох послідовних фаз, які ітераційно повторюються для побудови та оновлення дерева пошуку. На етапі вибору (Selection) здійснюється проходження по вже існуючому дереву до вузла, який буде розширено, зазвичай із застосуванням евристики, наприклад критерію UCT. Після цього виконується розширення (Expansion), де до вибраного вузла додається один або декілька нових нащадків. У фазі моделювання (Simulation) проводиться випадкове або кероване моделювання дій від нового вузла до кінцевого стану з метою оцінки потенційної винагороди. Нарешті, у фазі зворотного оновлення (Backpropagation) отримані результати моделювання рекурсивно передаються вгору по дереву, корегуючи оцінки відвіданих вузлів. Така послідовність дій дозволяє алгоритму ефективно досліджувати простір рішень і поступо-

во наблизитися до оптимальної траєкторії чи стратегії дій у складному середовищі. MCTS ефективно використовується для планування траєкторій та прийняття рішень у динамічних середовищах, де середовище може змінюватися непередбачувано, а точне моделювання є складним для обчислювання. Попри численні переваги алгоритм має певні обмеження, такі як висока обчислювальна складність, низька ефективність у великих просторах станів, проблеми з детермінованими системами, залежність від функції винагороди.

Алгоритми з навчанням моделі. Алгоритм планування PlaNet (Planning with Latent Networks) – це алгоритм, що працює в середовищах із частковою або відсутньою інформацією про динаміку. Він використовує модельне навчання з підкріпленням (model-based RL) із латентним (прихованим) поданням станів та дозволяє агенту планувати дії без необхідності розгортання детальної моделі середовища. PlaNet складається з чотирьох основних кроків: спочатку сенсорні спостереження кодуються у компактні латентні представлення за допомогою варіаційного автоенкодера; потім рекурентна стохастична модель прогнозує майбутні латентні стани на основі попередніх станів і дій; далі виконується планування послідовності дій для максимізації очікуваної суми винагород у латентному просторі за допомогою Model Predictive Control; і, нарешті, параметри моделі навчаються через оптимізацію варіаційної нижньої межі (ELBO), що поєднує точність відновлення спостережень і узгодженість динамічних прогнозів. Таким чином, PlaNet ефективно планує в складних динамічних середовищах, використовуючи латентне моделювання динаміки та дозволяючи приймати рішення на основі обмежених даних. Проте алгоритм має високі обчислювальні витрати, залежить від якості латентного подання, потребує багато навчальних даних і не завжди підходить для швидкої адаптації в реальному часі. Ці обмеження можуть ускладнювати його практичне застосування для автономних мобільних роботів.

Алгоритм MuZero – це алгоритм, що поєднує планування на основі моделі з навчанням функції політики (policy function) та функції цінності (value function) без явного моделювання динаміки середовища. Він не потребує попереднього знання правил динаміки системи, а навчає приховану модель для прогнозування майбутніх станів та отриманих винагород. Основна ідея полягає в тому, що агент навчається трьома ключовими функціями: функція представлення – перетворює історію спостережень у прихований стан, який стисло описує поточний стан середовища; функція динаміки – імітує перехід між

станами та прогнозує винагороду при виконанні певної дії; функція політики та оцінки – прогнозує ймовірності вибору дій (політику) та значення (корисність) стану. Працюючи циклічно, MuZero на основі поточного стану виконує пошук у дереві можливих майбутніх станів методом MCTS, використовуючи внутрішню модель для прогнозування наслідків дій. Це дає змогу ефективно планувати та обирати оптимальні дії навіть у випадках, коли динаміка середовища невідома або складна. Після виконання дії агент отримує нові спостереження, оновлює своє розуміння стану через функцію представлення та повторює цикл. Паралельно нейронні мережі, які реалізують ці функції оновлюються на основі отриманого досвіду, мінімізуючи сумарну функцію втрат, яка враховує три основні компоненти: помилки у передбаченні винагороди, політики та цінності. Цей підхід дозволяє автономним мобільним роботам адаптивно навчатися й планувати дії у складних, динамічних і частково невідомих середовищах, забезпечуючи високий рівень автономності та ефективності. Водночас алгоритм є обчислювально затратним через інтенсивний пошук у дереві станів і тренування складних нейронних мереж, що може ускладнювати його застосування в реальному часі на роботах з обмеженими обчислювальними ресурсами.

Попри значні переваги, методи на основі моделі стикаються з серйозними викликами, основний недолік такого підходу полягає у відсутності доступу до точної моделі середовища в більшості реальних сценаріїв. У таких випадках агент повинен самостійно навчатися моделі, ґрунтуючись виключно на зібраному досвіді. Це створює ризик упередженості моделі, коли агент може працювати оптимально у межах вивченої моделі, але демонструвати неоптимальну поведінку в реальному середовищі, слабкі результати при зміні динаміки або появі невідомих факторів. Наприклад, у динамічних середовищах, таких як жваві вулиці або складські приміщення з великою кількістю роботів, помилки моделювання можуть призвести до критичних збоїв у роботі. Також навчання моделей середовищ потребує великих обчислювальних витрат, особливо в задачах з високою розмірністю простору станів або дій.

Алгоритми RL без моделі. Безмодельні підходи, на відміну від методів на основі моделі, покладаються лише на прямий досвід взаємодії агента з середовищем. Вони не потребують явної моделі для прогнозування наслідків дій, а замість цього вивчають політику або функцію цінності через багаторазові проби та помилки [8]. Для автономних мобільних роботів у динамічних середовищах безмодельні методи демонструють високу адаптивність, особли-

во в умовах, де середовище постійно змінюється й агенту потрібно швидко реагувати на нові обставини. Розглянемо найперспективніші алгоритми.

Алгоритми на основі цінності (Value-Based Methods). Метод Deep Q-Network (DQN) поєднує глибокі нейронні мережі та Q-навчання для вирішення задач навчання агента в складних середовищах, що змінюються в реальному часі, з випадковими перешкодами або рухомими об'єктами. Робот навчається на основі власного досвіду, зберігаючи транзакції в буфері відтворення, що допомагає уникнути кореляції між послідовними зразками даних. Глибока нейронна мережа дозволяє наближати складні залежності між станами та діями, що робить метод придатним для великих просторових областей. Основною метою DQN є наближення функції Q-значень за допомогою нейронної мережі, що дозволяє агенту приймати оптимальні рішення в ситуаціях з високою розмірністю станів. Функція Q-значень визначається, як:

$$Q(s, a) = E[r + \gamma \max_{a'} [Q(s', a') | s, a]],$$

де $Q(s, a)$ – оцінка якості дії a у стані s ; r – винагорода, отримана після виконання дії; $\gamma \in [0, 1]$ – коефіцієнт дисконтування, що враховує довгострокову винагороду; s' – новий стан середовища після виконання дії a ; a' – наступна дія агента; E – математичне сподівання, використовується для обчислення середнього значення випадкової величини. DQN використовує нейронну мережу для апроксимації функції $Q(s, a; \theta)$, де θ – параметри цільової Q-функції. Навчання відбувається шляхом мінімізації функції витрат:

$$L(\theta) = E[(y - Q(s, a; \theta))^2],$$

де $y = r + \gamma \max_{a'} Q(s', a', \theta^-)$ – цільове значення, θ^- – параметри цільової нейронної мережі, які оновлюються періодично для стабільності навчання.

Загальний алгоритм DQN:

1. Ініціалізація нейронної мережі $Q(s, a; \theta)$ з випадковими вагами.
2. Ініціалізація цільової мережі $Q(s, a; \theta^-) \leftarrow Q(s, a; \theta)$.
3. Повторювати для кожного епізоду:
 - 3.1. Отримання поточного стану s .
 - 3.2. Для кожного кроку в епізоді:
 - 3.2.1. З імовірністю ϵ обираємо випадкову дію a .
 - 3.2.2. Застосовується дія, отримуємо r, s' .
 - 3.2.3. Зберігаємо (s, a, r, s') у буфер обміну D .
 - 3.2.4. Обирається випадкова міні-вибірка з D та виконується градієнтний спуск для мінімізації функції втрат $L(\theta)$.
 - 3.2.5. Кожні N кроків оновлювати цільову мережу $\theta^- \leftarrow \theta$.

DQN є потужним методом для керування автономними мобільними роботами у складних динамічних середовищах завдяки здатності ефективно обробляти великі простори станів і адаптуватися до змін у середовищі. Серед основних переваг є: здатність до навчання без повного моделювання середовища, можливість узагальнення знань для нових ситуацій, покращена стабільність завдяки використанню цільової мережі та буфера відтворення. Однак метод має низку недоліків: велика обчислювальна складність і вимоги до обчислювальних ресурсів; труднощі з вибором гіперпараметрів, що впливають на ефективність навчання; можливість нестабільності при надмірному навчанні або недостатньому дослідженні середовища. Таким чином, DQN є перспективним підходом для навігації автономних роботів, але вимагає оптимізації та адаптації до конкретних задач.

Алгоритми *Dueling DQN* та *Double DQN* є модифікаціями алгоритму DQN і запропоновані для покращення стабільності та точності навчання. *Double DQN* усуває проблему переоцінювання Q -значень шляхом розділення процесів вибору дії та її оцінки за допомогою двох нейронних мереж. *Dueling DQN*, у свою чергу, використовує окремі гілки мережі для оцінки цінності стану та переваги дії, що дозволяє точніше оцінювати важливість станів навіть тоді, коли конкретна дія не має великого впливу. Обидва підходи демонструють підвищену ефективність у задачах навігації автономних мобільних роботів у складних середовищах. Основними недоліками даних модифікацій є вища обчислювальна складність через використання додаткових мережевих компонентів, потреба в більшій кількості даних для ефективного навчання, обмежений ефект у задачах з неперервними просторами дій.

Алгоритми оптимізації політики (*Policy Optimization*). Метод *Trust Region Policy Optimization (TRPO)* використовується в рамках глибокого навчання з підкріпленням, спрямований на стабільну та ефективну оптимізацію політики шляхом обмеження величини оновлення параметрів політики в межах області довіри (trust region). TRPO забезпечує гарантоване покращення політики на кожному кроці навчання, що робить його привабливим для застосування в задачах керування автономними мобільними роботами в складних і динамічних середовищах. Алгоритм TRPO працює ітераційно: на кожному кроці агент збирає траєкторії і одночасно взаємодіє з середовищем за поточною політикою, після чого оцінюється перевага дій (advantage estimation), що вказує на їхню ефективність. Далі формується сурогатна функція винагороди, яка максимізується під обмеженням

на середню KL-дивергенцію між старою та новою політикою, що гарантує стабільність оновлення. Для розв'язання цієї обмеженої задачі застосовується метод кон'югованих градієнтів з квадратичною апроксимацією KL-дивергенції та лінійним пошуком для визначення кроку оновлення параметрів політики. Процес повторюється до збіжності або досягнення заданої продуктивності. Ключовою перевагою TRPO є його здатність зберігати стабільність оновлень політики, запобігаючи великим стрибкам у політиці. Добре працює в умовах високої варіативності середовища, таких як динамічні середовища автономних мобільних роботів, де точність і передбачуваність критичні для безпеки. Алгоритм здатний оптимізувати політику для задач з великою кількістю етапів (наприклад де роботи мають виконувати тривалі завдання). Однак через високу обчислювальну складність і потребу у великих обсягах даних його застосування на реальних роботах може бути обмеженим.

Градієнтний алгоритм *Proximal Policy Optimization (PPO)* – це сучасний алгоритм RL, він був розроблений для забезпечення ефективного та стабільного навчання агентів, поєднує ідеї TRPO та стохастичної оптимізації, але є значно простішим у реалізації та має менші затрати на обчислювання. PPO базується на оновленні політики шляхом обмеження зміни між послідовними оновленнями, що запобігає надмірним корегуванням стратегії агента та сприяє стабільному навчанню. Він вводить обмеження на зміну політики за допомогою clip-функції для уникнення нестабільних оновлень. Основна цільова функція PPO виглядає наступним чином:

$$L(\theta) = E_t [\min(r_t(\theta)A_t, \text{clip}(r_t(\theta), 1 - \epsilon, 1 + \epsilon)A_t)],$$

де $r_t(\theta)$ – відношення ймовірностей нової до старої політики; A_t – функція переваги (advantage function), яка оцінює, наскільки дія була кращою; ϵ – коефіцієнт обмеження, який контролює зміну політики (гіперпараметр). Ця функція обмежує величину оновлення політики, що сприяє стабільному та безпечному навчанню. Якщо нова політика сильно відрізняється від старої, clip запобігає занадто великим змінам градієнта. Перевагами даного алгоритму є: значно легший за TRPO; не потребує обчислення Гессе або складних обмежень; забезпечує контроль над зміною політики через механізм кліпінгу; може використовувати міні-батчі та стохастичну оптимізацію, що робить його придатним для великих наборів даних; придатний до навчання великих нейромереж при моделюванні та в реальних системах. Недоліками є: неможливість гарантувати поступове підвищення продуктивності алгоритму, нестабільність при виборі гіперпараметрів, розміри батчів і навчальна

швидкість суттєво впливають на продуктивність, обмежене управління політикою.

Попри недоліки, PPO є одним з найуспішніших алгоритмів оптимізації політики, особливо у випадках, де необхідно забезпечити баланс між стабільністю, ефективністю та обчислювальною простотою. Для задач автономного керування мобільними роботами в складних динамічних середовищах PPO часто є кращим вибором, ніж TRPO, завдяки гнучкості, швидкому навчанню та практичній ефективності.

Алгоритми «актора-критика» (Actor-Critic). Алгоритм Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) – це off-policy алгоритм RL, що поєднує детерміновану політику з функціональним апроксиматором і градієнтами політики. Його особливістю є здатність ефективно працювати у неперервному просторі дій, що робить його придатним для керування роботами з точним керуванням. DDPG є основою для подальших алгоритмів, таких як TD3 та SAC. Ключовими ідеями алгоритму DDPG є використання детермінованої політики для роботи в неперервних просторах дій, що дозволяє безпосередньо відображати стан у точну дію, а також застосування архітектури «актор-критик», де актор навчається приймати оптимальні дії, а критик оцінює їх якість. Для стабілізації навчання використовуються цільові мережі з повільним оновленням і буфер повторів, який дозволяє повторно використовувати попередній досвід і розривати часову кореляцію між зразками. Крім того, до дій додається шум для забезпечення дослідження середовища в процесі навчання.

Оновлення критика здійснюється мінімізацією помилки Беллмана:

$$L(\theta^Q) = E_{(s,a,r,s')} \left[(\theta^Q(s,a|\theta^Q) - y)^2 \right],$$

де $y = r + \gamma Q'(s, \mu'(s|\theta^{\mu'})) | \theta^Q$, γ – коефіцієнт дисконтування, Q' та μ' – цільові функції критика та актора відповідно.

Оновлення актора через максимізацію очікуваної цінності дій:

$$\nabla_{\theta^{\mu}} J \approx E_s \left[\nabla_a Q(s, a | \theta^Q) \Big|_{a=\mu(s)} \nabla_{\theta^{\mu}} \mu(s | \theta^{\mu}) \right].$$

Алгоритм DDPG є потужним інструментом для навчання автономних мобільних роботів у неперервних просторах дій завдяки використанню «актор-критик»-архітектури та детермінованої політики, що забезпечує швидке й ефективно прийняття рішень у реальному часі. Проте його ефективність значною мірою залежить від налаштування гіперпараметрів і може бути нестабільним під час навчання, особливо у складних середовищах із шумом. Крім того, DDPG потребує великої кількості

взаємодій із середовищем для досягнення належної якості політики, що може бути ресурсно затратним. Незважаючи на ці недоліки, DDPG залишається одним із найефективніших методів для задач неперервного керування в автономній робототехніці.

Алгоритм Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3) – це вдосконалений «актор-критик»-алгоритм, розроблений як покращення DDPG для просторів неперервних дій (рух вперед, назад, ліворуч, праворуч і т.п.). Він зменшує переоцінку функції цінності (Q -функції), стабілізує навчання та надмірну чутливість до шуму. TD3 зберігає архітектуру «актор-критик», але додає ключові механізми для усунення нестабільності, характерної для DDPG. TD3 покращує стабільність і точність навчання шляхом використання двох Q -функцій (twin critics) для усунення систематичної переоцінки значень та ймовірності розривів у політиці, затриманого оновлення політики (delayed policy update), що дозволяє стабільніше корегувати параметри актора, та модифікованої таргетної політики з додаванням шуму (target policy smoothing). Шум згладжує політику, запобігаючи перенавчанню Q -функції на різких змінах політики, дуже корисний у фізичних роботах із шумом у сенсорах. Оновлення політики (актора) виконується рідше, ніж критиків (наприклад, кожен другий або третій крок), це дозволяє критикам краще оцінити поточну політику та уникнути дестабілізуючого зворотного зв'язку. Цільове значення для критика:

$$y = r + \gamma \min_{i=1,2} Q'_i(s', \mu'_i(s') + \epsilon),$$

де ϵ – додавання шуму для стабільності (target policy smoothing $\mu'_i(s') + \epsilon$), Φ – параметри цільової політики $\mu'_i(s')$.

Оновлення критиків (обох Q -функцій):

$$L(\theta_i) = E_{(s,a,r,s')} \left[(Q_i(s,a) - y)^2 \right], i = 1, 2.$$

Оновлення актора (рідше за критика):

$$\nabla_{\Phi} J \approx E_s \left[\nabla_a Q_{\theta_1}(s,a) \Big|_{a=\mu_{\Phi}(s)} \nabla_{\Phi} \mu_{\Phi}(s) \right].$$

TD3 демонструє значне покращення порівняно з DDPG завдяки стабільнішому навчанню, меншій переоцінці Q -функції та точнішому оновленню політики. Його основними перевагами є стійкість до шуму, стабільність у складних умовах і покращена точність у виборі дій. Серед недоліків – збільшена обчислювальна складність через використання двох Q -функцій та необхідність точного налаштування кількості затриманих оновлень актора.

Алгоритм Soft Actor-Critic (SAC) – це off-policy «актор-критик»-алгоритм, який використовує стохастичну політику та ентропійну регуляризацию для досягнення балансу між дослідженням і експлуатацією.

платуацією. Основна ідея полягає в тому, щоб не лише максимізувати очікувану винагороду, але й ентропію політики, що дозволяє агенту балансувати між експлуатацією відомих стратегій і дослідженням нових. Це особливо важливо для автономних мобільних роботів, що функціонують у динамічних, частково спостережуваних і шумних середовищах, де адаптивність і стійкість до несподіваних ситуацій є ключовими вимогами. Крім того, SAC використовує два Q -критики для зменшення переоцінки, як і в TD3, а також має автоматичне налаштування коефіцієнта ентропії, що робить алгоритм менш чутливим до гіперпараметрів.

Цільове значення для Q -функції:

$$y = r + \gamma E_{a' \sim \pi} \left[\min_{i=1,2} Q_{\theta_i}(s', a') - \alpha \log \pi_{\Phi}(a', s') \right]$$

де Q_{θ_i} – цільова Q -функція (target network), $\log \pi$ у цільовому значенні спонукає до стохастичності, α – коефіцієнт, що контролює баланс між експлуатацією та дослідженням.

Оновлення політики (актора):

$J_{\pi}(\Phi) = E_s \left[E_{a \sim \pi} \left[\alpha \log \pi_{\Phi}(a|s) - Q_{\theta_i}(s, a) \right] \right]$. Це – баланс між експлуатацією (максимізація Q) та дослідженням (через ентропію). Оновлення коефіцієнта α автоматичне, що дозволяє підтримувати бажаний рівень стохастичності.

SAC поєднує високу стабільність, ефективне дослідження та автоматичне балансування між експлуатацією й експлорацією, що робить його одним з найефективніших алгоритмів для неперервного керування в складних умовах. Його основні переваги: стійке навчання, висока продуктивність при обмеженій кількості зразків, стійкість до шуму та адаптивність. Серед недоліків – підвищені обчислювальні витрати через використання кількох нейронних мереж і складність реалізації, зокрема при використанні ентропійного регулятора та автоматичного налаштування параметра α .

Отже алгоритми RL без використання моделі середовища (model-free) відзначаються своєю гнучкістю та здатністю працювати у складних, динамічних і частково спостережуваних середовищах без попереднього знання динаміки. Ці методи, зокрема SAC, TD3, PPO, DQN та їхні модифікації, безпосередньо навчаються через взаємодію агента з середовищем, що дозволяє ефективно адаптуватися до змін. Хоча такі алгоритми зазвичай потребують значної кількості взаємодій та обчислювальних ресурсів, вони демонструють високу надійність, стабільність і простоту реалізації, що робить їх особливо придатними для автономних мобільних роботів у реальних умовах.

Результати аналізу ефективності алгоритмів машинного навчання RL. Узагальнюючи результати порівняння, можна зробити висновок, що для задач автономних мобільних роботів у складних динамічних середовищах найперспективнішими є алгоритми з класу «актор-критик» з підтримкою неперервних дій і високою стабільністю навчання. До таких алгоритмів належать Soft Actor-Critic (SAC), Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3), а також Proximal Policy Optimization (PPO) у поєднанні з добре підібраними гіперпараметрами. Ці методи забезпечують високу ефективність навчання, здатні працювати з багатовимірним простором дій і демонструють високу стійкість до нестабільності, яка характерна для реального фізичного середовища (див. таблицю).

Із результатів проведеного аналізу очевидно, що для покращення результатів керування мобільними роботами у складних динамічних умовах необхідно застосовувати гібридні підходи, що поєднують навчання без моделі (як PPO, SAC чи TD3) з модельними компонентами, наприклад із використанням моделі динаміки для планування або для імітаційного попереднього тренування (як у PlaNet або MuZero). Також ефективною стратегією може бути автоматична адаптація гіперпараметрів під час навчання, наприклад коефіцієнта ентропії в SAC або коефіцієнта обмеження політики в PPO.

Використання запропонованих підходів може дати наступні ефекти:

- швидку збіжність політики в реальних умовах;
- підвищену стійкість до змін у середовищі та стану спостереження;
- зниження потреби у великій кількості взаємодій із середовищем, що критично для фізичних роботів;
- гнучкість адаптації до нових задач або зміни цільової поведінки.

Загалом ефективна комбінація сучасних алгоритмів навчання з підкріпленням, структурованих планувальних методів і технік перенесення навчання становить основу для розробки надійних систем автономної навігації у динамічному світі.

Висновки

Результати проведеного аналізу ефективності алгоритмів машинного навчання RL свідчать, що для підвищення автономності мобільних роботів у складних динамічних середовищах найперспективнішими можуть бути алгоритми з класу «актор-критик» з підтримкою неперервних дій, а саме: Soft Actor-Critic (SAC), Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3), Proximal Policy Optimization (PPO).

Результати аналізу ефективності алгоритмів RL

Алгоритм	Тип	Підтримка неперервних дій	Ефективність навчання	Стабільність навчання	Витрати на обчислювання
MPC	модельний	так	висока	висока	високі
MCTS	модельний	обмежена	середня	висока	високі
PlaNet	модельний	так	висока	середня	високі
MuZero	модельний	так	висока	висока	дуже високі
DQN	безмодельний	ні	середня	середня	середні
Double DQN	безмодельний	ні	середня	покращена	середні
Dueling DQN	безмодельний	ні	середня	покращена	середні
TRPO	безмодельний	так	висока	висока	високі
PPO	безмодельний	так	висока	висока	помірні
DDPG	безмодельний	так	висока	низька	високі
TD3	безмодельний	так	висока	висока	високі
SAC	безмодельний	так	висока	висока	високі

Використання під час навчання автоматичної адаптації таких гіперпараметрів, як коефіцієнта ентропії в SAC або коефіцієнта обмеження політики в PPO, може дати наступні ефекти: швидку збіжність політики в реальних умовах, підвищену стійкість до змін у середовищі та стану спостереження, зниження потреби у великій кількості взаємодій із середовищем, гнучкість адаптації до нових задач або зміни цільової поведінки.

Список літератури/Reference

- Петренко Д.В., Протасов А.Г. (2024) Огляд сучасних технологій підвищення автономності мобільних колісних роботів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 35(74), 2, 122–128. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/17>
- Петренко, D.V., Protasov, A.G. (2024) Overview of modern technologies for increasing the autonomy of mobile wheeled robot. *Vcheni Zapysky TNU, Seriya: Texnichni nauky*, 35(74), 2, 122–128. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/17>
- Akalin N., Loutfi A. (2021) Reinforcement Learning Approaches in Social Robotics. *Sensors*, 21(4), 1292. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041292>
- Liu, Y. et al. (2023) Mobile robot path planning based on kinematically constrained a-star algorithm and DWA fusion. *Algorithm Mathematics*, 11(21), 4552. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11214552>
- Faseeh, M. et al. (2024) Deep Learning assisted real-time object recognition and depth estimation for enhancing emergency response in adaptive environment. *Results in Engineering*, 24, 103482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103482>
- Zhang, T., Mo, H. (2021) Reinforcement learning for robot research: A comprehensive review and open issues. *International J. of Advanced Robotic Systems*, 18(3). DOI: <https://doi.org/10.1177/17298814211007305>
- Rybczak, M., Popowniak, N., Lazarowska, A. (2024) A survey of machine learning approaches for mobile robot control. *Robotics*, 13(1), 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics13010012>
- Lee, M.-F.R., Yusuf, S.H. (2022) Mobile robot navigation using deep reinforcement learning. *Processes*, 10(12), 2748. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10122748>
- Yang, L., Bi, J., Yuan, H. (2022) Dynamic path planning for mobile robots with deep reinforcement learning. *IFAC-PapersOnLine*, 55(11), 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.08.042>

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF REINFORCEMENT LEARNING ALGORITHMS FOR INCREASING THE MOBILE ROBOTS AUTONOMY

D.V. Petrenko, A.G. Protasov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: petrenkod555@gmail.com, a.g.protasov@gmail.com

The paper is devoted to the problem of increasing the autonomy of mobile robots, which are widely used in various spheres of human activity today. Improving the means of controlling the movement of robots in real conditions, through the introduction of intelligent control systems, will allow them to adapt to changes in the environment, adequately respond to unforeseen situations and more effectively interact with other participants in the technological process. The intelligent system of controlling the movement of a mobile robot combines both hardware and software components. The software components of robot movement control systems include machine learning methods, which are based on methods of constructing algorithms capable of learning. The paper considers the most popular machine learning algorithms with reinforcement (Reinforcement Learning, RL), which are used in intelligent control systems. In this method, the main components are the agent and the environment. The environment is a dynamic world in which the agent operates and with which it constantly interacts. RL machine learning algorithms are conventionally divided into two groups - algorithms that use a model and algorithms without a model. From the results of the analysis it is obvious that to increase the autonomy of mobile robot movement in complex dynamic conditions, it is necessary to apply hybrid approaches that combine model-free learning, as in the PPO, SAC or TD3 algorithms, with model components, as in the PlaNet or MuZero algorithms. Also, an effective strategy can be the automatic adaptation of hyperparameters during training, for example, the entropy coefficient in the SAC algorithm or the policy constraint coefficient in the PPO algorithm, which provides increased resistance to changes in the environment and the observation state, reducing the need for a large number of interactions with the environment, and flexibility of adaptation to new tasks or changes in target behavior. 8 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

Keywords: machine learning, learning algorithms, mobile robots, control systems, robot autonomy

Отримано 23.05.25

Отримано у переглянутому вигляді 19.06.25

Прийнято 01.09.25

АНАЛІЗ СКЛАДОВИХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РОЗМІРІВ ДЕФЕКТІВ СТИКОВОГО ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ ДИФРАКЦІЙНО-ЧАСОВИМ МЕТОДОМ

С.М. Глабець, В.С. Єременко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: s.glabets@gmail.com

Стаття присвячена аналізу складових невизначеності вимірювання розмірів дефектів стикового зварного з'єднання дифракційно-часовим методом (ДЧМ) ультразвукової дефектоскопії (УЗД). У роботі використовувались результати порівняльного дослідження R.S. Maunon та ін. щодо луна-імпульсного та дифракційно-часового методів стосовно виявлення та вимірювання розмірів дефектів і оцінки невизначеності вимірювань, де автори зосередились виключно на впливі відстані між перетворювачами. Нами було визначено максимально повний спектр факторів впливу, на основі якого побудовано діаграму Ішикави та сформовано відповідний бюджет невизначеності. Дослідження проводилося для ДЧМ УЗД стикового зварного з'єднання поліетиленових труб, але наведені підходи можуть бути застосовані для інших типів матеріалів. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: дифракційно-часовий метод, ультразвукова дефектоскопія, невизначеність вимірювань розмірів дефектів

Вступ. Для оцінки якості зварних з'єднань у процесі виготовлення та експлуатації широко використовуються ультразвукові методи неруйнівного контролю (УЗК), які дозволяють виявляти внутрішні дефекти та визначати їх розміри та координати. Класичний луна-імпульсний метод УЗК [1] використовує амплітуду відбитого від дефекту сигналу для оцінювання його розмірів, але це вимагає специфічного налаштування чутливості дефектоскопа (особливо блока часового регулювання підсилення) із застосуванням стандартних зразків. Точність цього методу суттєво залежить від типу дефекту, його орієнтації, методики сканування виробу та кваліфікації дефектоскопіста.

Точнішим для визначення розмірів дефектів є дифракційно-часовий метод ультразвукової дефектоскопії (ДЧМ УЗК), що ґрунтується на явищі дифракції ультразвукових хвиль від дефектів [2]. «Удар» ультразвукової хвилі по дефекту викликає генерацію краями дефекту сферично поширюваних ультразвукових хвиль. У ДЧМ реєструється

час приходу дифракційних хвиль від країв дефектів, тому амплітуда відбитого сигналу, а, відповідно, і орієнтація дефекту, не мають настільки критичного впливу, як у луна-імпульсному методі [3].

Для ДЧМ використовується пара ультразвукових похилих п'єзоперетворювачів (ПЕП) поздовжніх хвиль з широкою діаграмою направленості, розташованих на фіксованій відстані по різні боки зварного з'єднання. Загальна схема контролю зварного з'єднання за допомогою ДЧМ зображена на рис. 1. Один ПЕП (В) випромінює ультразвукову хвилю в об'єкт контролю (ОК), другий ПЕП (П) приймає дифракційні хвилі [4].

У загальному випадку на приймальному ПЕП отримують послідовно чотири характерних сигнали за часом приходу зі зміною фази на протилежну (рис. 2).

Позначенням на рис. 2 відповідають наступні сигнали [3]:

1. перший імпульс – пряме проходження підповерхневої поздовжньої хвилі;



Рис. 1. Схема контролю дифракційно-часовим методом

В.С. Єременко – <https://orcid.org/0000-0002-4330-7518>

© С.М. Глабець, В.С. Єременко, 2025

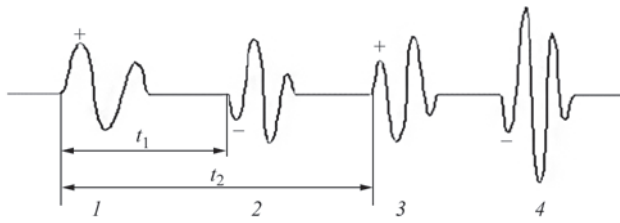


Рис. 2. Послідовність сигналів ДЧМ

2. другий імпульс – дифракційна хвиля від вершини дефекту, поздовжня, циркулярно розповсюджується в матеріалі, час приходу – t_1 ;

3. третій імпульс – дифракційна хвиля від нижнього краю дефекту, поздовжня, циркулярно розповсюджується, час приходу – t_2 ;

4. четвертий імпульс – хвиля відбиття від зворотної стінки виробу.

Наявність імпульсів від дифракційних хвиль свідчить про присутність несучільностей у зварному шві, а головними інформаційними характеристиками методу є час приходу цих дифракційних сигналів відносно першого імпульсу, що використовується для оцінювання глибини розташування та розміру несучільностей. У ДЧМ амплітуда сигналу для визначення розміру дефекту не використовується [3].

На сьогодні існують праці, присвячені оцінці невизначеності вимірювань розмірів дефектів дифракційно-часовим методом, але це оцінювання проводилося на основі опрацювання багаторазових вимірювань розмірів у цілому, без аналізу окремих складових сумарної невизначеності [1].

Мета роботи – наведення методики оцінювання невизначеності вимірювання розмірів дефектів ДЧМ з урахуванням факторів, які впливають на точність результату вимірювання.

Виклад основного матеріалу. Схема вимірювання розміру дефекту ДЧМ представлена на рис. 3: S – відстань між перетворювачами; d_1 – відстань від поверхні до вершини дефекту; d_2 – відстань від поверхні до нижнього краю дефекту; t_0 – час затримки ультразвукових хвиль у призмах ПЕП; t_1 – час приходу хвилі від вершини дефекту; t_2 – час приходу хвилі від нижнього краю дефекту.

Розрахунок висоти дефекту h проводиться за наступною формулою:

$$h = d_2 - d_1 \quad (1)$$

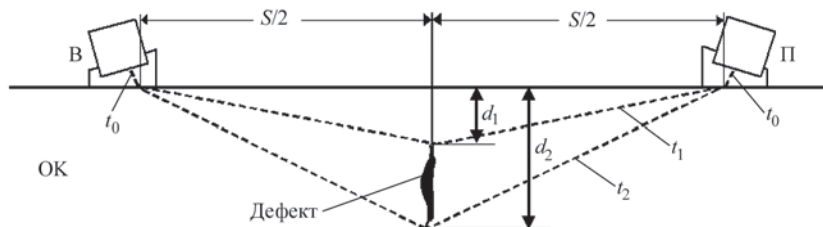


Рис. 3. Схема вимірювання розміру дефекту з використанням ДЧМ

Відстані від країв дефекту до поверхні d_1, d_2 визначаються наступним рівнянням [5]:

$$d_{1,2} = \sqrt{\left(\frac{c}{2}\right)^2 \cdot (t_{1,2} - 2t_0)^2 - S^2} \quad (2)$$

де c – швидкість поздовжніх УЗ коливань у матеріалі ОК.

Комбінована невизначеність згідно з формулою (1) матиме наступний вигляд [6]:

$$u_h = \sqrt{u_{d1}^2 + u_{d2}^2 + u_{\eta}^2} \quad (3)$$

де u_{d1}, u_{d2} – невизначеності вимірювань відстані від країв дефектів до поверхні; u_{η} – випадкова складова, яка враховує відтворюваність методу, а також неперпендикулярність і несиметричність розташування дефекту у зварному шві.

Закон розподілу сумарної комбінованої невизначеності результату вимірювання висоти дефекту можна прийняти гауссовим, оскільки на результат вимірювання впливає досить велика кількість чинників. Тоді розширена невизначеність для довірчої ймовірності $p = 0,95$ буде складати $U_h = 2u_h$.

Як видно з наведених рівнянь, основний вклад у комбіновану невизначеність висоти дефекту вносять невизначеності вимірювання відстаней від країв дефекту до поверхні. Тому проведемо детальніший аналіз модельного рівняння непрямого вимірювання (2) та невизначеностей його складових: u_{t_0} – невизначеність часу затримки ультразвукового імпульсу в ПЕП; u_c – невизначеність значення швидкості ультразвукових коливань у матеріалі, що досліджується; $u_{t_{1,2}}$ – невизначеність вимірювання часу приходу дифракційних сигналів (t_1 та t_2); u_s – невизначеність встановлення відстані між перетворювачами; u_{ξ} – невизначеність, що характеризує повторюваність вимірювань.

Комбіновані невизначеності вимірювання відстаней до верхнього та нижнього краю дефекту з урахуванням всіх складових:

$$u_{d_{1,2}} = \sqrt{\left(\frac{\partial d_{1,2}}{\partial c} u_c\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_{1,2}} u_{t_{1,2}}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_0} u_{t_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{1,2}}{\partial S} u_s\right)^2 + u_{\xi}^2} \quad (4)$$

Відповідні коефіцієнти впливу для складових комбінованих невизначеностей згідно з формулою (4) визначаються як часткові похідні та розраховуються за наступними рівняннями:

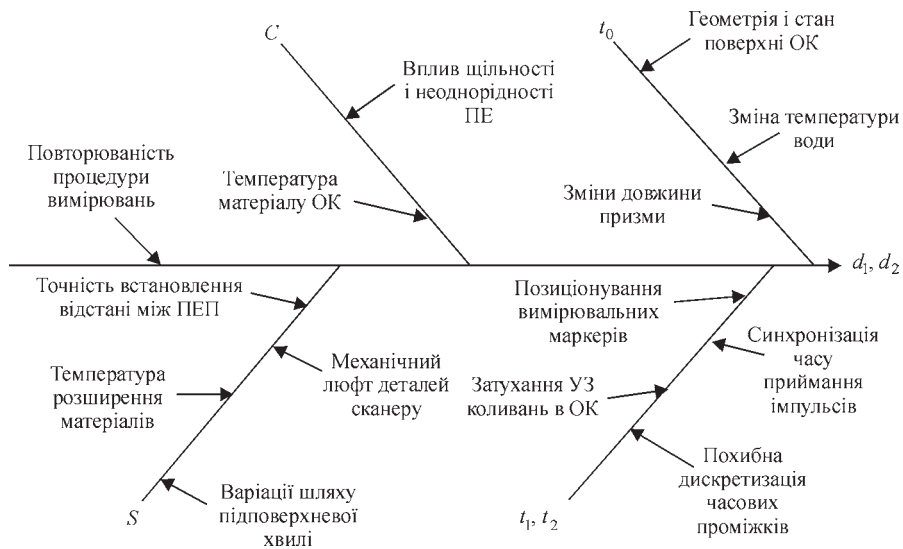


Рис. 4. Діаграма Ішкави для результату вимірювання відстаней d_1, d_2

$$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_0} = \frac{-4c^2 t_1 - 8c^2 t_0}{4\sqrt{c^2 t_1^2 - 4c^2 t_1 t_0 + 4c^2 t_0^2 - 4S^2}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial c} = \frac{2ct_1^2 - 8ct_1 + 8ct_0^2}{4\sqrt{c^2 t_1^2 - 4c^2 t_1 t_0 + 4c^2 t_0^2 - 4S^2}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_1} = \frac{2ct_1^2 - 4c^2 t_0}{4\sqrt{c^2 t_1^2 - 4c^2 t_1 t_0 + 4c^2 t_0^2 - 4S^2}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial S} = \frac{-2S}{\sqrt{c^2 t_1^2 - 4c^2 t_1 t_0 + 4c^2 t_0^2 - 4S^2}} \quad (8)$$

Для складових, які є аргументами модельного рівняння (2), побудовано діаграму Ішкави [7, 8] з подальшим розгалуженням на другорядні складові (рис. 4).

Бюджет невизначеності вимірювання висоти дефекту наведено в таблиці. При складанні бюджету невизначеності передбачалося, що складові комбінованої невизначеності є некорельованими величинами.

Проаналізуємо детальніше компоненти невизначеності, зазначені у таблиці.

1. Час затримки УЗ коливань у призмах ПЕП t_0 .

Для покращення співвідношення сигнал-шум у перетворювачах використовується призма з каналом, заповненим водою для введення та прийому УЗ коливань і одночасного забезпечення акустичного контакту (рис. 5).

З огляду на конструкцію такого перетворювача, t_0 залежить від:

1.1. Зміни довжини призми $L_{пр}$ (часу проходження УЗ коливань у водяному каналі призми) за рахунок зміни товщини еластичного ущільнювача в залежності від зношення та сили притискання перетворювача до поверхні ОК. Для мінімальної $L_{пр \min}$ і максимальної $L_{пр \max}$ довжини призми, розрахунок відповідного часу у водяному каналі призми

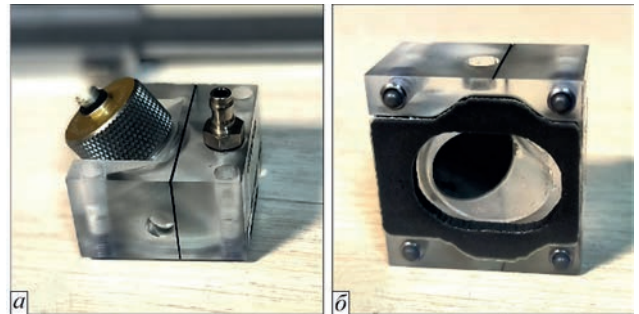


Рис. 5. ПЕП з призмою з водяним каналом і еластичним ущільнювачем: зовнішній вигляд (а), вид з контактної поверхні (б)

$t_0(L_{пр \min})$ і $t_0(L_{пр \max})$ і з урахуванням швидкості УЗ коливань у воді c_B виконується за формулою:

$$t_0 = \frac{L_{пр}}{c_B} \quad (10)$$

За отриманими максимальним і мінімальним значеннями шляху у призмі оцінюємо стандартну невизначеність, приймаючи рівномірний закон розподілу:

$$u_{t_01} = \frac{t_0(L_{пр \max}) - t_0(L_{пр \min})}{2\sqrt{3}} \quad (11)$$

Визначено експериментальним шляхом $L_{пр} = 10,3 \dots 10,5 - 11,8 \dots 12,0$ мм і відповідно $t_0 = 0,691 \dots 0,805$ мкс.

1.2. Зміни швидкості поздовжніх УЗ коливань у воді від її температури $c_B(T)$. Згідно з графіком залежності швидкості від температури (рис. 6) визначаються максимальна $c_B(T_{\max})$ і мінімальна $c_B(T_{\min})$ швидкості для робочого діапазону температур і розраховується максимальне й мінімальне значення часу затримки у призмі за формулою, що аналогічна до (11). Для рівномірного закону розподілу стандартна невизначеність оцінюється:

Бюджет невизначеності вимірювання висоти дефекту

Величина	Фактори впливу	Тип оцінювання	Закон розподілу	Стандартна невизначеність	Комбінована невизначеність	Коефіцієнт впливу
t_0	Довжина призми	B	Рівномірний	$u_{t_{01}} = \frac{t_0(L_{\max}) - t_0(L_{\min})}{2\sqrt{3}}$	$u_{t_0} = \sqrt{u_{t_{01}}^2 + u_{t_{02}}^2 + u_{t_{03}}^2}$	$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_0}$ (5)
	Варіація швидкості УЗ коливань у воді від температури	B	Рівномірний	$u_{t_{02}} = \frac{t_0(T_{\min}) - t_0(T_{\max})}{2\sqrt{3}}$		
	Геометрія та стан поверхні ОК	A	Гаусса	$u_{t_{03}} = \sigma_g$		
c	Варіація швидкості УЗ коливань ОК	B	Рівномірний	$u_{c1} = \frac{c_{\text{MATmax}} - c_{\text{MATmin}}}{2\sqrt{3}}$	$u_c = \sqrt{u_{c1}^2 + u_{c2}^2}$	$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial c}$ (6)
	Вплив температури матеріалу ОК	B	Рівномірний	$u_{c2} = \frac{c_{\text{MAT}}(T_{\max}) - c_{\text{MAT}}(T_{\min})}{2\sqrt{3}}$		
t_d (t_1, t_2)	Позиціонування вимірювальних маркерів	A		$u_{t_{d1}} = \sigma_{\text{ОП}}$	$u_{t_d} = \sqrt{u_{t_{d1}}^2 + u_{t_{d2}}^2 + u_{t_{d3}}^2 + u_{t_{d4}}^2}$	$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_{1,2}}$ (7)
	Калібрування приладу	B	Сімпсона	$u_{t_{d2}} = u_{\text{зразка}}$		
	Шум і затухання УЗ коливань у матеріалі ОК	B	Гаусса	$u_{t_{d3}} = \frac{\sigma_{\text{ш}}}{2\alpha_s}$		
	Дискретність вимірювань часових проміжків	B	Рівномірний	$u_{t_{d4}} = \frac{1}{f_d 2\sqrt{3}}$		
S	Похибка вимірювань відстані між ПЕП	B	Гаусса	$u_{S1} = \frac{S_{\text{ном}}\gamma}{100}$	$u_S = \sqrt{u_{S1}^2 + u_{S2}^2 + u_{S3}^2 + u_{S4}^2}$	$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial S}$ (8)
	Механічний люфт деталей сканера	B	Рівномірний	$u_{S2} = \frac{\Delta_{\text{МЛ}}}{2\sqrt{3}}$		
	Температурне розширення матеріалів	B	Рівномірний	$u_{S3} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2\sqrt{3}}$		
	Варіації шляху підповерхневої хвилі	A		$u_{S4} = \sigma_{\Delta S}$		
ξ	Повторюваність процедури вимірювань	A		u_{ξ}		

$$u_{t_{02}} = \frac{t_0(T_{\min}) - t_0(T_{\max})}{2\sqrt{3}} \quad (12)$$

Для діапазону робочих температур $T = 0 \dots 40$ °C швидкість УЗ коливань у воді змінюється від 1405 до 1530 м/с.

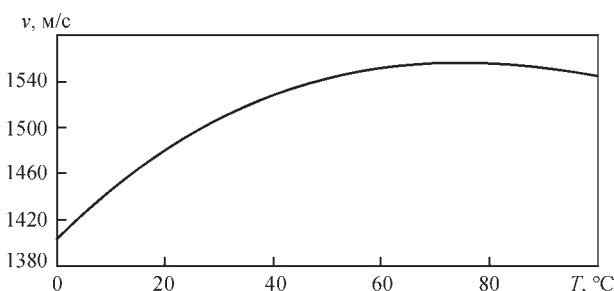


Рис. 6. Залежність швидкості ультразвукових хвиль від температури у воді [9]

1.3. Впливу геометрії ОК і стану поверхні на якість акустичного контакту (різний діаметр труб, шорсткість контрольованої поверхні). Невизначеність, зумовлена цими факторами, оцінюється за типом А (за результатами експерименту) як відповідне стандартне відхилення σ_g . У межах одного зварного з'єднання змінюється незначно:

$$u_{t_{03}} = \sigma_g \quad (13)$$

2. Швидкість поздовжніх УЗ коливань у матеріалі ОК с. Невизначеність, обумовлена зміною значень швидкості УЗ коливань у матеріалі ОК, має дві компоненти:

2.1. Варіація швидкості УЗ коливань c_{MAT} (довідкове значення), зумовлена характеристиками матеріалу – нерівномірністю його щільності та

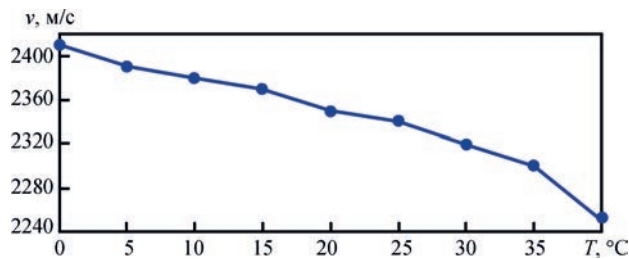


Рис. 7. Залежність швидкості поздовжніх ультразвукових хвиль в поліетилені від температури [10]

структури, пов'язаної зі способом виготовлення. Згідно з довідковими даними для поліетилену $c_{MAT} = 2150...2500$ м/с. Експериментальне значення, отримане для поліетилену при температурі 20 °C, становить: $c_{MAT} = 2450$ м/с. Згідно з [7] варіація швидкості УЗ хвиль у матеріалах ОК є одним з найзначущих чинників у невизначеності вимірювань розмірів дефекту:

$$u_{c1} = \frac{c_{MAT\ max} - c_{MAT\ min}}{2\sqrt{3}} \quad (14)$$

2.2. Вплив температури матеріалу ОК на швидкість УЗ коливань c_{MAT} . Швидкість поздовжніх УЗ коливань у поліетилені залежить від його температури T , $c_{MAT}(T)$. Згідно з графіком залежності швидкості в поліетилені від температури на рис. 7 визначаємо максимальне та мінімальне значення для наперед заданого робочого діапазону температур (для діапазону температур 0...40 °C отримуємо розкид $c_{MAT} = 2410...2250$ м/с). Для рівномірного закону розподілу стандартну невизначеність оцінюємо як:

$$u_{c2} = \frac{c_{MAT}(T_{max}) - c_{MAT}(T_{min})}{2\sqrt{3}} \quad (15)$$

3. Час приходу дифракційних хвиль від верхнього та нижнього країв дефекту t_1 і t_2 відповідно. На невизначеності впливають наступні чинники:

3.1. Точність позиціонування вимірювальних маркерів. Вимірювальні маркери розташовуються оператором вручну на початку першої півхвилі сигналу від дефекту на В-скан розгортці. Позитивна та негативна півхвилі відображені градаціями білого та чорного кольору відповідно (рис. 8). Відсутність чітких контурів і рівень кваліфікації опе-

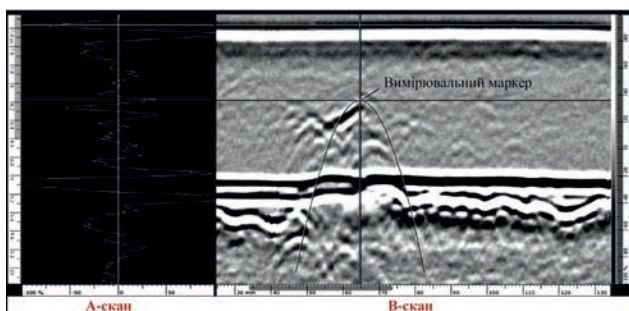


Рис. 8. А-скан і В-скан результатів сканування ДЧМ з дефектом і вимірювальним маркером

ратора впливає на точність розташування маркерів. Для визначення впливу зазначеного фактору проводиться серія повторних процедур розміщення вимірювальних маркерів з розрахунком СКВ результатів $\sigma_{оп}$ (оцінка за типом А).

3.2. Невизначеність калібрування приладу перед проведенням контролю. Калібрування виконується на стандартних зразках відомої товщини, виготовлених із матеріалу, що відповідає матеріалу ОК згідно з рекомендаціями [2]. Невизначеність калібрування буде оцінюватися невизначеністю стандартного зразка $u_{t_{д2}} = u_{зразка}$.

3.3. Співвідношення сигнал-шум у прийнятому сигналі впливає на точність вимірювання часових інтервалів. У зв'язку з тим, що ДЧМ, на відміну від луна-імпульсного методу, не є амплітудним, вимірювання часових інтервалів T не прив'язано до фіксованого рівня амплітудної характеристики сигналу. При контролі матеріалів з великим коефіцієнтом затухання УЗ коливань спостерігається високий рівень шуму (рис. 9). Рівень шуму умовно позначено штриховою лінією. Кут нахилу переднього фронту огинаючої корисного сигналу також залежить від затухання та структури матеріалу. За умови ослабленого сигналу та високого рівня шумів може бути втрачено від половини першого періоду до декількох періодів корисного сигналу. Пов'язана з цим затримка у часі позначена як ΔT [6].

Цю невизначеність, обумовлену кутом нахилу переднього фронту або «крутістю» [11], тобто амплітудною характеристикою сигналу, можемо оцінити за формулою:

$$u_{t_{д3}} = \frac{\sigma_{ш}}{2\alpha_s} \quad (16)$$

де $\sigma_{ш}$ – середньоквадратичне значення шуму сигналу; α_s – крутість АХС (В/с).

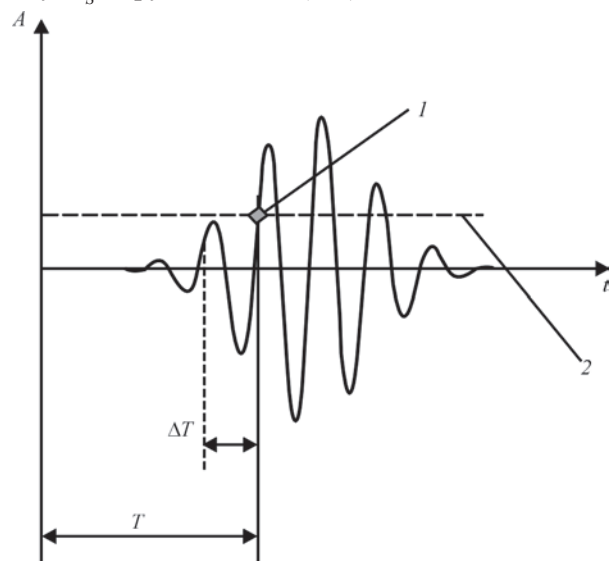


Рис. 9. Корисний сигнал на рівні шуму: 1 – момент вимірювання часу приходу корисного сигналу, 2 – рівень шуму

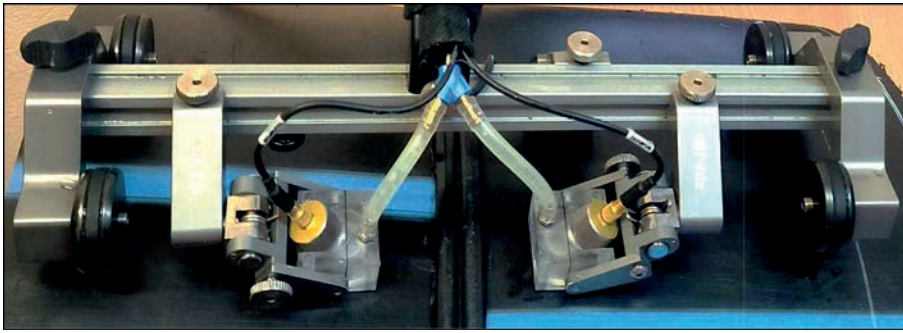


Рис. 10. Розташування сканера із встановленими ПЕП і призмами на ОК

Довідкові дані затухання УЗ коливань у поліетилені становлять 0,3 дБ/мм на частоті $f=2,25$ МГц [10]. Експериментально отримані дані затухання УЗ коливань становлять 0,7 дБ/мм на частоті $f=2,25$ МГц. Згідно з даними [12] у поліетилені також спостерігається високий рівень шуму. Співвідношення сигнал-шум (SNR) може досягати значення 9:1.

3.4. Невизначеність, обумовлена похибкою дискретизації часових інтервалів, визначається частотою дискретизації конкретного дефектоскопа, зазвичай складає 100 МГц. Складова похибки визначається частотою дискретизації сигналів f_d в АЦП. За умови рівномірного закону розподілу:

$$u_{t_{\text{дн}}} = \frac{1}{f_d 2\sqrt{3}} \quad (17)$$

4. Відстань між перетворювачами S. Невизначеність обумовлена наступними факторами:

4.1. Невизначеність точності встановлення відстані між ПЕП. u_s визначається класом точності вимірювального інструменту γ , який використовувався при виготовленні скануючого пристрою, тобто максимально допустимою зведеною похибкою з нормальним законом розподілу, отже:

$$u_{s1} = \frac{S_{\text{ном}} \cdot \gamma}{100} \quad (18)$$

4.2. Невизначеність, обумовлена механічним люфтом деталей сканера $\Delta_{\text{мл}}$:

$$u_{s2} = \frac{\Delta_{\text{мл}}}{2\sqrt{3}} \quad (19)$$

4.3. Невизначеність, обумовлена температурним розширенням матеріалів і складається з наступних чинників:

4.3.1. Температурне розширення сталевих деталей сканера впливає на відстань між перетворювачами (рис. 3). Сталь має коефіцієнт теплового розширення 0,012 мм/°С. Для діапазону робочих температур 0...40 °С отримаємо зміну відстані між ПЕП і значення $L_{\text{мін}}$ та $L_{\text{макс}}$ відповідно. Ця складова невизначеності u_{s3} визначається формулою:

$$u_{s3} = \frac{L_{\text{макс}} - L_{\text{мін}}}{2\sqrt{3}} \quad (20)$$

4.3.2. Температурне розширення ОК. Коефіцієнт теплового розширення поліетилену становить 0,2 мм/°С. Зміна температури матеріалу викликає зміну товщини стінки труби, що позначається на точності калібрування глибиноміра приладу. Невизначеність обчислюється за формулою як для сталі (20).

4.4. Збільшення шляху підповерхневої хвилі викликане огинанням поверхневих артефактів розміром, співставним або більше довжини хвилі. На неї також впливає: відмінність акустичних характеристик поверхневого шару матеріалу, механічні пошкодження поверхні, форма валика зварного з'єднання, увігнутість чи зміщення кромки труб. Ця складова невизначеності оцінюється за типом А.

5. Повторюваність процедури u_{ξ} зумовлена впливом таких факторів як:

- людський фактор при встановленні та центруванні сканера відносно шва (рис. 10);
- кваліфікація оператора під час налаштування приладу та виконання контролю;
- зміна умов контролю (різкі зміни температури, якість акустичного контакту тощо).
- інші фактори, вплив яких неможливо або нецільово виокремити та оцінити.

За наявності результатів багаторазових вимірювань та їх статистичної обробки ця складова невизначеності може бути суттєво зменшена.

Висновки

У роботі запропоновано методику опрацювання вимірювальної інформації при контролі стикових з'єднань дифракційно-часовим методом. За допомогою цієї методики проведено аналіз точності вимірювання розмірів дефектів у зварних з'єднаннях поліетиленових труб з урахуванням технічних характеристик обладнання, стану та особливостей об'єкту контролю, параметрів навколишнього середовища, кваліфікації дефектоскопіста. Особливу увагу приділено факторам, які не враховувалися іншими дослідниками. Визначено найсуттєвіші складові невизначеності вимірювання розмірів дефектів, на основі яких сформульовано та проаналізовано бюджет невизначеності.

Запропонований підхід можливо застосовувати для оцінки невизначеності вимірювань розмі-

рів дефектів ДЧМ у різних практичних ситуаціях, як для контролю поліетиленових, так і металевих зварних з'єднань.

Список літератури

1. Mayworm, R.C., Alvarenga, A.V. (2020) Costa-Felix R.P.B. A metrological approach to the time of flight diffraction method (ToFD). *Measurement*, **167**, 108298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108298>
2. ДСТУ EN ISO 10863:2022 *Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування дифракційно-часового методу (TOFD) (EN ISO 10863:2020, IDT; ISO 10863:2020, IDT).*
3. Boháčik, M., Mičian, M., Koňár, R., Hlavatý, I. (2017) Ultrasonic testing of butt weld joint by TOFD technique. *Manufacturing Technology*, **17**(6), 842–847. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/6/842>
4. Глабеть С.М. (2024) *Можливість використання дифракційно-часового методу ультразвукового контролю для стикових зварних з'єднань поліетиленових труб.* Тези конференції EAIRP 2024. ПФФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського.
5. Moles, M., Robertson, L., Sinclair, T. (2012) Developments in Time-Of-Flight Diffraction (TOFD). In: *18th World Conference on Nondestructive Testing*, 16–20 April 2012, Durban, South Africa.
6. Babak, V., Babak, S., Kuts, Yu., Myslovykh, M., Scherbak, L., Zaporozhets, A. (2021) *Models and measures in measurements and monitoring.* Studies in Systems, Decision and Control. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>
7. Куц Ю.В., Монченко О.В., Бистра І.М. та ін. (2019) *Фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії виробів з конструкційних матеріалів: монографія.* Київ, Інтерсервіс.
8. Галаган Р.М., Єременко В.С. (2016) *Ультразвуковий контроль відкритої мікроскопічної пористості фарфорових ізоляторів: монографія.* Київ, НТУУ «КПІ».
9. Галаган Р.М. (2019) *Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник.* Київ, НТУУ «КПІ».
10. Qi, G., Li, Y., Ding, N. (2019) Measurement of acoustic basic parameters of polyethylene pipe. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **677**, 022050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022050>
11. Мокійчук В.М., Монченко О.В. (2012) Оцінювання невизначеності вимірювання товщини луноімпульсним методом. *Системи обробки інформації*, **1**, 74–77.
12. Correia, C. (2017) TOFD Examination of HDPE butt weld fusion joints. *E-J. of Nondestructive Testing*. https://www.ndt.net/article/ndtnet/2017/1_Correia.pdf

References

1. Mayworm, R.C., Alvarenga, A.V. (2020) Costa-Felix R.P.B. A metrological approach to the time of flight diffraction method (ToFD). *Measurement*, **167**, 108298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108298>
2. DSTU EN ISO 10863:2022. Non-destructive testing of welds. Ultrasonic inspection. Application of the diffraction-time method (TOFD) (EN ISO 10863:2020, IDT; ISO 10863:2020, IDT) [in Ukrainian].
3. Boháčik, M., Mičian, M., Koňár, R., Hlavatý, I. (2017) Ultrasonic testing of butt weld joint by TOFD technique. *Manufacturing Technology*, **17**(6), 842–847. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/6/842>
4. Glabets, S.M. (2024) Possibility of using the diffraction-time method of ultrasonic inspection for butt welded joints of polyethylene pipes. In: *Abstracts of the EAIRP 2024 Conference*. PBF, NTUU «KPI» [in Ukrainian].
5. Moles, M., Robertson, L., Sinclair, T. (2012) Developments in Time-Of-Flight Diffraction (TOFD). In: *18th World Conference on Nondestructive Testing*, 16–20 April 2012, Durban, South Africa.
6. Babak, V., Babak, S., Kuts, Yu. et al. (2021) *Models and measures in measurements and monitoring.* Studies in Systems, Decision and Control. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>
7. Kuts, Y.V., Monchenko, O.V., Bystra, I.M. et al. (2019) *Phase method of ultrasonic echo-pulse thickness measurement of products from structural materials: Monograph.* Kyiv, Interservice [in Ukrainian].
8. Galagan, R.M., Eremenko, V.S. (2016) *Ultrasonic control of open microscopic porosity of porcelain insulators: Monograph.* Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
9. Galagan, R.M. (2019) *Theoretical foundations of ultrasonic nondestructive testing: A textbook.* Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
10. Qi, G., Li, Y., Ding, N. (2019) Measurement of acoustic basic parameters of polyethylene pipe. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **677**, 022050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022050>
11. Mokiychuk V.M., Monchenko O.V. (2012) Estimation of uncertainty of thickness measurement by echo-pulse method. *Systemy Obrobky Informatsii*, **1**, 74–77 [in Ukrainian].
12. Correia, C. (2017) TOFD Examination of HDPE butt weld fusion joints. *E-J. of Nondestructive Testing*. https://www.ndt.net/article/ndtnet/2017/1_Correia.pdf

ANALYSIS OF UNCERTAINTY COMPONENTS OF DEFECT SIZE MEASUREMENT IN BUTT WELDED JOINT OF POLYETHYLENE PIPES BY TOFD METHOD

S.M. Hlabets, V.S. Eremenko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: s.glabets@gmail.com

The paper is devoted to the analysis of the uncertainty components of measuring the size of defects in a butt welded joint by the diffraction-time method (DTM) of ultrasound detection (USD). Used in the work are the results of a comparative study by R.S. Mayworm et al. on echo-pulse and diffraction-time methods for detecting and measuring defect sizes and estimating measurement uncertainty, where the authors focused exclusively on the effect of the distance between the transducers. We have identified the fullest possible range of influencing factors, based on which we have built an Ishikawa diagram and formed an appropriate uncertainty budget. The study was carried out for DTM ultrasonography of butt welded joints of polyethylene pipes, but the approaches presented here can be applied to other types of materials. 12 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: diffraction-time method, ultrasonic flaw detection, uncertainty of defect size measurements

Отримано 28.05.25

Отримано у переглянутому вигляді 13.06.25

Прийнято 22.09.25

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ ЕКРАННИХ ТРУБ КОТЛА-ОХОЛОДЖУВАЧА КОНВЕРТЕРНИХ ГАЗІВ

С.О. Осадчук, Л.І. Ниркова, Л.В. Гончаренко

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: lnyrkova@gmail.com

Досліджено екранні труби котла-охолоджувача конвертерних газів, які зазнали пошкоджень після експлуатації впродовж п'яти років. Методом оптичної мікроскопії показано, що корозійні пошкодження у вигляді тріщин, розташованих впоперек осі труби на внутрішній поверхні, розвивалися за механізмом міжзеренного руйнування по границях феритної і перлітної складових. Встановлено, що на внутрішній поверхні труби відбувалися процеси пароводяної корозії за реакцією з виділенням водню $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$, внаслідок чого утворилися дрібні виразки, що розвинулися у тріщини через втрату під час експлуатації цілісності захисного шару під дією теплових навантажень і механічних напружень у локальних місцях. Основною причиною пошкодження екранних труб є пароводяна корозія. Бібліогр. 11, рис. 5.

Ключові слова: вуглецева сталь, екранні труби, котел-охолоджувач, внутрішня корозія, пароводяна корозія

Вступ. Котельний агрегат містить теплообмінні поверхні для використання тепла димових газів. Основна парогенеруюча поверхня котла – екранні труби із вуглецевої сталі безшовні гаряче- та холоднотформовані. У котлах малого та середнього тиску використовують газощільні екрани з плавцевих або звичайних труб, з'єднаних по всій довжині привареною смугою [1]. Висока корозійна тривкість труб елементів котла обумовлена наявністю корозійнотривкого шару, що утворюється під час експлуатації. Ефективність захисної дії цього шару залежить від його щільності та міцності зчеплення з поверхнею труби, що забезпечує його здатність захищати від зовнішніх впливів хімічного або фізико-механічного характеру. Однак під час експлуатації теплоенергетичного обладнання можуть виникати пошкодження внаслідок розкладення пари з виділенням кисню та водню за реакцією $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$, що стає причиною поступового руйнування захисного шару.

Вплив пари на захисний шар Fe_3O_4 може бути обумовлений властивостями води: рН, вмістом солей і кисню, наявністю міді тощо. Взаємодія механічного характеру залежить від: температури, особливо від її коливань; утворення накипу, що призводить до перегрівання окремих ділянок поверхонь; зменшення швидкості руху пароводяної суміші [2].

Чинники пошкодження труб. Внутрішніми чинниками пошкодження труб є: склад, гетерогенність і механічні напруження, наприклад, внаслідок зварювання або наплавлення металу. До складу вуглецевих і низьколегованих сталей входить багато елементів (кремній, марганець, сірка тощо),

які можуть утворювати неметалеві включення, що полегшує локальну корозію виразками та корозійне розтріскування. Гетерогенність сталі може бути домінуючим чинником в умовах корозії з водневою деполяризацією. У цьому випадку швидкість корозії контролюється швидкістю реакції розряду іонів водню, яка каталітично прискорюється забрудненнями поверхні катодного характеру [2].

У закритих системах корозія з виділенням водню з підвищенням температури зростає. Теплові навантаження поверхонь нагріву (щільність теплового потоку) також прискорюють корозію труб. Наприклад, потенціал корозії сталі в конденсаті за тиску 10 МПа зміщується від $-0,7$ до $-0,9$ В при зміні температури від 0 до 400 °С [2] через часткове руйнування захисної плівки внаслідок термічних напружень у плівці, що виникають у зв'язку з різними коефіцієнтами об'ємного та лінійного розширення плівки й сталі; механічного впливу бульбашок пари, які інтенсивно утворюються на поверхні металу; відновлювальної дії на плівку атомарного водню. Атомарний водень завжди утворюється під час контакту сильно нагрітої води зі сталлю внаслідок корозії з водневою деполяризацією.

Корозія поверхонь нагріву, що контактують з водною парою та водою. Поверхні нагріву котлів піддаються зовнішній корозії (під дією продуктів згоряння) та внутрішній (під дією середовища, що нагрівається) [1]. Труби із вуглецевої сталі, що контактують з водною парою та водою, іноді зазнають корозійних уражень внаслідок як рівномірної, так і локальної корозії (киснева, стоянкова, лужна, пароводяна, підшламова, корозійна втома), яка прискорюється під дією температури [1, 2].

С.О. Осадчук – <https://orcid.org/0000-0001-9559-0151>, Л.І. Ниркова – <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>,

Л.В. Гончаренко – <https://orcid.org/0000-0001-8371-2078>

© С.О. Осадчук, Л.І. Ниркова, Л.В. Гончаренко, 2025

Вуглецева сталь за температури 120...150 °С у чистій воді здебільшого зазнає нерівномірної корозії з утворенням корозійних плям; за температури 200...300 °С корозійних плям стає менше; за температури 350 °С поверхня вкривається темно-сірим шаром і корозійні плями майже відсутні. Для зменшення корозії сталі в очищеній воді треба контролювати вміст кисню [3].

Киснева корозія, що спостерігається як при роботі котла, так і при перебуванні його в резерві [1], проявляється у вигляді виразок, вкритих продуктами корозії заліза. Продукти корозії, які міцно зчеплені з металом і мають чорний колір, утворені магнетитом Fe_3O_4 . Киснева корозія перебігає переважно в місцях, в яких накопичується волога, особливо під час простою під плівкою сконденсованої пари [2]. Виразки на елементах котла, що не працює, вказують на *стоянкову* корозію [1]. Для захисту парових і водогрійних котлів від кисневої корозії застосовують термічну деаерацію живильної та підживлювальної води, а також консервацію котла при знаходженні його в резерві або ремонті. Захист від стоянкової корозії здійснюють шляхом використання розчину аміаку або газоподібного азоту при простою котла більше 1–2 місяців; шляхом заповнення котла деаерованою водою та підтримання в ньому постійного надлишкового тиску – до трьох діб.

Залізо кородує у воді навіть за відсутності кисню. У конденсаті залізо діє як анод, тому воно окиснюється. Доля іона двовалентного заліза (Fe^{2+}) залежить від температури середовища, рН і умов течії. За низьких температур Fe^{2+} реагує з водою з утворенням нерозчинного гідроксиду заліза двовалентного $Fe(OH)_2$. Якщо швидкість потоку конденсату достатньо висока, колоїдний $Fe(OH)_2$ переноситься за течією та відкладається в іншому місці. У зонах потоку з малою швидкістю $Fe(OH)_2$ відкладається поблизу місця окиснення, утворюючи шар пористого оксиду [4].

Пароводяна корозія – руйнування металу в результаті хімічної взаємодії металу з водяною парою [2]: $3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$. Мідь, що потрапляє з елементів тракту живильної води разом з оксидами заліза, має каталітичну дію та сприяє виділенню водню [2]. Руйнування вуглецевої сталі стає можливим за температури понад 400 °С. Продуктами реакції взаємодії є газоподібний водень та магнетит. Пароводяна корозія має рівномірний і локальний характер. У першому випадку утворюється шар продуктів корозії, іноді сріблястого кольору. Локальна корозія має вигляд виразок, борозенок і тріщин. Основною причиною виникнення пароводяної корозії є нагрівання стін-

ки труби до критичної температури, за якої інтенсифікується реакція окиснення металу водою. Цьому сприяє низка умов, серед яких: порушення циркуляції в трубі; високі щільності теплових потоків (більше $230 \cdot 10^3$ Вт/м²); поява плівкового режиму кипіння, що призводить до перегрівання металу. Запобігання пароводяній корозії здійснюється шляхом усунення причин, що викликають перегрівання металу труб. Слід зазначити, що цю корозію не можна усунути шляхом зміни або поліпшення водно-хімічного режиму котельного агрегата, оскільки причини пароводяної корозії залежать від гідродинамічних процесів у котлі, а також умов експлуатації [2]. Підкреслено [5], що пароводяна корозія, яка відбувається у послабленому місці, може бути початковою стадією водневого окрихчення та створювати деякі передумови для водневої атаки – руйнування захисного шару магнетиту та виділення водню. На цей час відомі випадки ураження пароводяною корозією не тільки горизонтальних, але й вертикальних екранних труб, наприклад, поблизу зварних швів, виконаних контактним зварюванням або за допомогою підкладних кілець.

Лужна корозія поверхонь нагріву, що відбувається за електрохімічним механізмом, проявляється у вигляді локалізованих руйнувань (борозенок) екранних труб і крихких пошкоджень (міжкристалітних тріщин – лужна або каустична крихкість) у місцях упарювання котлової води [2]. У більшості випадків лужна корозія поверхонь нагріву супроводжується пароводяною корозією [1, 2], зокрема розвивається на теплонапружених трубах екранної системи [2]. Корозійне розтріскування, що відбувається за міжкристалітним механізмом, обумовлене високими розтягувальними напруженнями в трубах, що контактують з котельною водою; наявністю в котловій воді розчиненого їдкого натру та високої відносної лужності котлової води, що перевищує 20 % [1]. Механізм лужної корозії у вигляді крихких (бездеформаційних) тріщин полягає у виникненні різниці потенціалів між тілом зерна та його границею у напруженому металі. За температури понад 200 °С руйнуються захисні плівки під дією концентрованих (упарених) розчинів їдкого натру (5...10 %) в місцях недостатньої циркуляції котлової води, що має гідратну та карбонатну лужність [2].

Підшламова корозія відбувається під шаром шламу за електрохімічним і хімічним механізмом внаслідок забруднення живильної води оксидами заліза та міді [1, 2]. Корозія проявляється у вигляді виразок і раковин з різко окресленими контурами. Корозія екранних труб може відбуватися як

за високої, так і за нормальної лужності котлової води [2]. Різниця в хімічному складі котлової води практично не впливає на ініціювання корозії. Основною причиною є забруднення живильної води оксидами міді та заліза [2]. Пошкодження поверхні металу незалежно від їх походження за наявності оксидів заліза та міді стають осередками підшламової корозії [1].

Корозійна втома – специфічна форма пошкоджень, пов'язана з одночасною дією корозії і циклічних теплових напружень. У такому випадку виникають транскристалітні тріщини [1].

Водно-хімічний режим, що у загальних рисах описано в НПАОП 0.00-1.81 [6], повинен забезпечувати роботу котла та живильного тракту без пошкоджень їхніх елементів унаслідок відкладення накипу та шламу, підвищення відносної лужності котлової води до небезпечних границь або внаслідок корозії металу. Вибір способу оброблення води для живлення котлів повинен здійснюватися відповідно до вимог експлуатаційної документації виробника.

Досвід експлуатації котлів показав, що пошкодження екранних труб пов'язане з зародженням і ростом поперечних тріщин на внутрішніх поверхнях, обернених до факела, які виникають передусім через первинні відкладення на зовнішній поверхні труб [7]. Інші вважають це явище результатом внутрішньої корозії труб, види якої розглянуто вище [1, 2].

Незважаючи на стабільну циркуляцію води в бічному екрані та відповідність її швидкості розрахунковим значенням, основною причиною розривів металу в екранній трубці є корозія та локальний перегрів стінки в області внутрішніх відкладень [8].

Корозійне руйнування труби модуля парогенератора призвело до витоку пари з труби, зверненої до газу. Унаслідок руйнування оксидного шару на внутрішній поверхні труби тріщини утворилися та поширювалися від втомного навантаження, що призвело до деградації мікроструктури та транскристалітного розтріскування [9].

Проведений аналіз показав, що до цього часу питання визначення виду корозії труб нагрівальних поверхонь котла, що спричиняє їх пошкодження, недостатньо вивчене.

Мета роботи – встановити причини пошкодження труб екранних поверхонь котла-охолоджувача конвертерних газів.

Методи дослідження. Досліджували труби екранної поверхні котла-охолоджувача конвертерних газів з внутрішнім діаметром 32 мм та товщиною стінки 5 мм із вуглецевої сталі 20 складу,

мас. %: С – 0,18; Si – 0,30; Mn – 0,52; S – 0,009; Cr – 0,07; Ni – 0,09; Cu – 0,13. Захисний екран у вигляді труб, призначений для захисту нижніх камер від випромінювання з конвертера та механічної дії з боку горловини конвертера, розміщений у нижній частині котла. Щілина між трубами заварена смугою.

Огляд зразків проводили неозброєним оком при денному освітленні. Продукти корозії видаляли у 20 % оцтовій кислоті. Корозійні ураження ідентифікували згідно з [10]. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі NEOPHOT 21 із застосуванням цифрової камери Allied Vision 1800 U-2050c та програмного забезпечення SEO ImageLAB v1.0 на нетравлених шліфах і після їх травлення у 4 % спиртовому розчині нітратної кислоти. Розмір феритного зерна визначали згідно з [11]. Аналіз відкладень з внутрішньої поверхні зразка труби проведено методом ІСР-спектрального аналізу за допомогою приладу iCAP 6500 DUO Termo E.C.

Виклад основного матеріалу. Дослідження та аналіз отриманих результатів. *Аналіз умов експлуатації екранних труб.* Охолоджувач конвертерних газів – вертикальний водотрубний, однобарабанный паровий котел об'ємом 170 м³ з примусовою циркуляцією, призначений для охолодження сильно запиленних високотемпературних газів, що поступають у процесі плавлення сталі з конвертера в установку газоочищення. Склад конвертерних газів в момент максимального газовиділення такий: оксид вуглецю CO – 47 %; діоксид вуглецю CO₂ – 21,5 %; азот N₂ – 30 %; водень H₂ – 1,5 %; пил – 65 %. Слід зазначити, що високотемпературні конвертерні гази містять водень (1,5 %), але контактують із зовнішньою поверхнею екранних труб.

Робочий тиск котла 20 кгс/см², температура насиченої пари 250 °С, температура газів на виході з конвертера 1700 °С; на виході з охолоджувача під час основного режиму роботи 700 °С; паропродуктивність 280 т/год.

Основною особливістю роботи котла є циклічність подавання конвертерних газів, і, як наслідок, змінне теплове навантаження. Хімічно очищена вода та пароводяна суміш циркулює в трубах, зовнішня поверхня яких контактує з високотемпературними конвертерними газами. Під час експлуатації виконано промивання та оброблення хімічними реагентами котла. Відхилів від режимів роботи котла не було. Під час відсутності електрики упродовж 1 року котел було виведено з експлуатації та проведено його консервацію азотом. Перше корозійне ураження в трубах виявлено через 5 років експлуатації. Ремонт аварійних

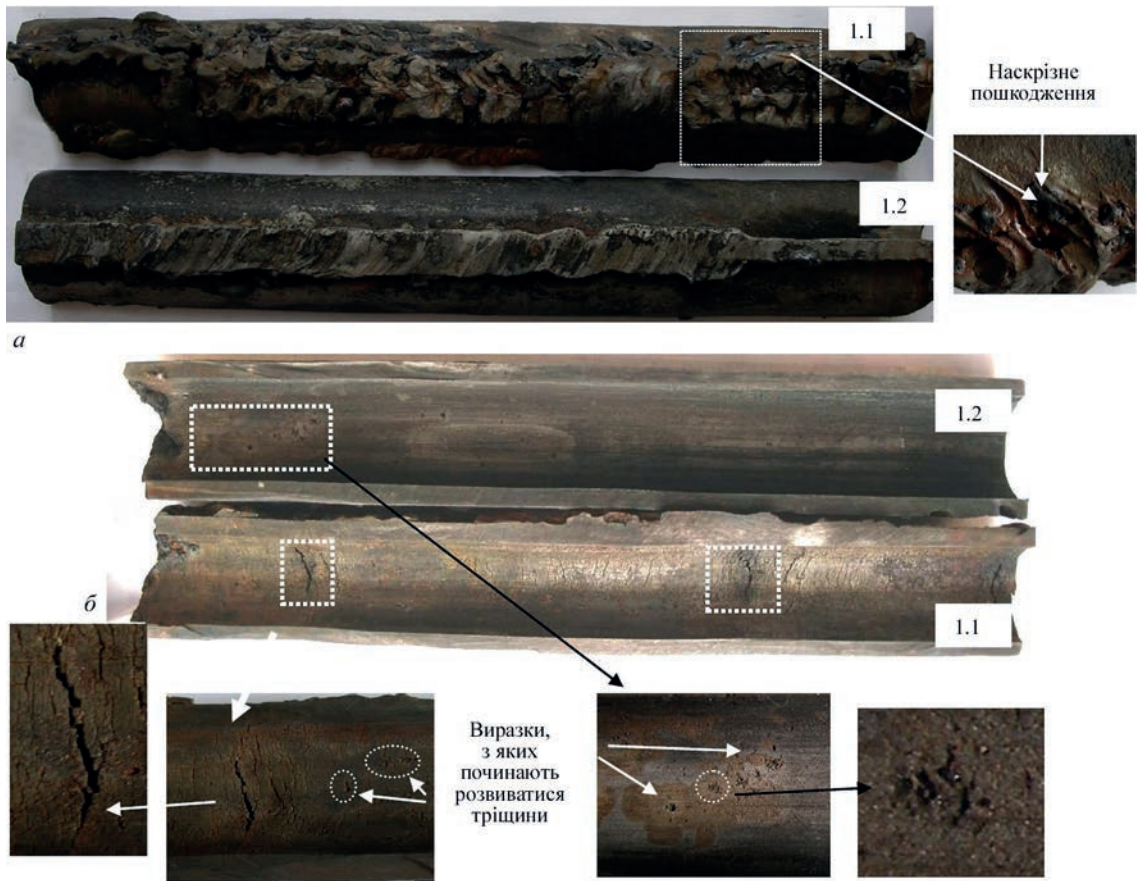


Рис. 1. Зовнішній вигляд зразка труби, вирізаного з екранної поверхні котла-охолоджувача: *а* – зовнішня поверхня; *б* – внутрішня поверхня

ділянок проводили шляхом заміни труб і заварювання дефектів.

Під час огляду зразка безшовної труби, вирізаної з екранної поверхні котла, встановлено (рис. 1), що зовнішня поверхня є не рівною, вкритою шаром продуктів темно-сірого кольору, які утворилися під час згоряння конвертерних газів. На зовнішній поверхні частини зразка (1.1) вздовж осі труби ручним дуговим способом у декілька шарів виконано наплавлення металу завширшки приблизно 40 мм. У декількох місцях на поздовжньому наплавленому шарі є наплавлення поперек осі труби. У межах наплавленого шару видно дрібні неглибокі тріщини, розташовані поперек осі труби. На границі між поздовжнім і поперечним наплавленими шарами виявлено розвинені тріщини та наскрізне пошкодження. На зовнішній поверхні іншої половини зразка (1.2) вздовж осі труби приварено смугу металу розміром приблизно 6 мм, посилення на якій знято. На цій частині труби тріщини відсутні як на внутрішній, так і на зовнішній поверхнях.

На внутрішній поверхні (рис. 1, *б*) виявлено велику кількість дрібних тріщин впоперек осі труби. Зазначено, що крупніші тріщини розташовані на ділянках зразка, на яких є наплавлений шар впоперек труби на зовнішній поверхні, імовірно

виконаний під час ремонту тріщин. Внутрішня поверхня у цій частині труби деформована. На ній (рис. 1, *б*) наявні продукти корозії заліза темно-сірого кольору, імовірно магнетиту, що міцно зчеплені з поверхнею труби, окремі дрібні виразки та поперечні тріщини різних розмірів. Імовірно, тріщини утворилися та розвинулися під час транспортування пароводяної суміші. Їх зростання прискорювалося нагріванням зовнішньої поверхні труби під час контакту з нагрітими до високої температури конвертерними газами, зміни температури під час процесу плавлення сталі та механічних напружень (внаслідок конструкційних особливостей екрана, ремонтних робіт шляхом заварювання дефектів). На ділянках, на яких шар наплавленого металу товстіший та є шар, наплавлений впоперек труби з зовнішнього боку, тріщини на внутрішній поверхні мають більшу глибину та розкриття (рис. 1, *б*). З боку зовнішньої поверхні корозія – суцільна, нерівномірна, з боку внутрішньої – у вигляді тріщин [10].

Аналіз відкладень з внутрішньої поверхні труби (рис. 2) показав, що їхньою основною складовою є залізо (43,76 %). Виявлено кремній (0,04 %), марганець (0,85 %), які входять до складу металу труби та потрапили в систему під час експлуатації внаслідок

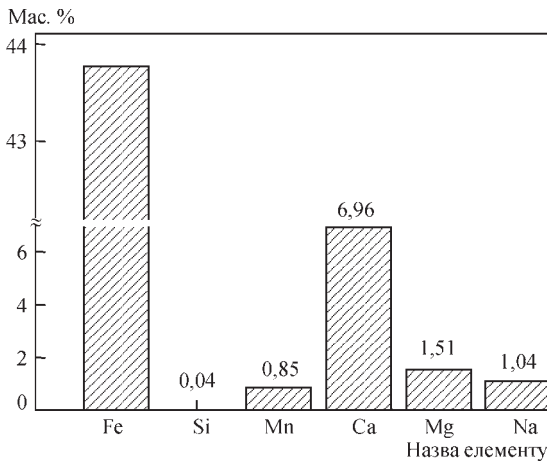


Рис. 2. Хімічний склад відкладень на внутрішній поверхні труби док розчинення. Крім того, наявні кальцій (6,96 %), магній (1,51 %), що утворюють солі твердості, а також цинк (0,96 %), алюміній (0,37 %), мідь (0,07 %) та ін. [2]. Натрій, що наявний у осаді (1,04 %), за високої температури сильно лужного середовища може створювати передумови лужної корозії.

Металографічні дослідження зразка екранної труби. На металографічних шліфах виявлено наскрізні та ненаскрізні (рис. 3) тріщини, які демонструють розвиток корозії з внутрішньої поверхні. Структура металу труби ферито-перлітна, має виражену смугастість. Розмір феритного зерна 0,11...0,138 мкм.

Через тривалий нагрів структура зазнала деяких змін (рис. 4): структура зон, що розташовані ближче до внутрішньої поверхні труби, характеризується зменшенням щільності перлітної складової зі збереженням смугастості (рис. 4, а). У зонах з боку зовнішньої поверхні (рис. 4, в) на границях феритного зерна утворилася вуглецева фаза, її кількість більше, ніж на внутрішній поверхні труби, що призводить до окрихчення металу внаслідок скупчення другої фази на границях зерен.

Виявлені поперечні тріщини крихкого характеру з максимальною глибиною 1,6 мм на внутрішній поверхні розповсюджувалися перпендикулярно до осі труби (рис. 5). Біля стінок тріщини видно

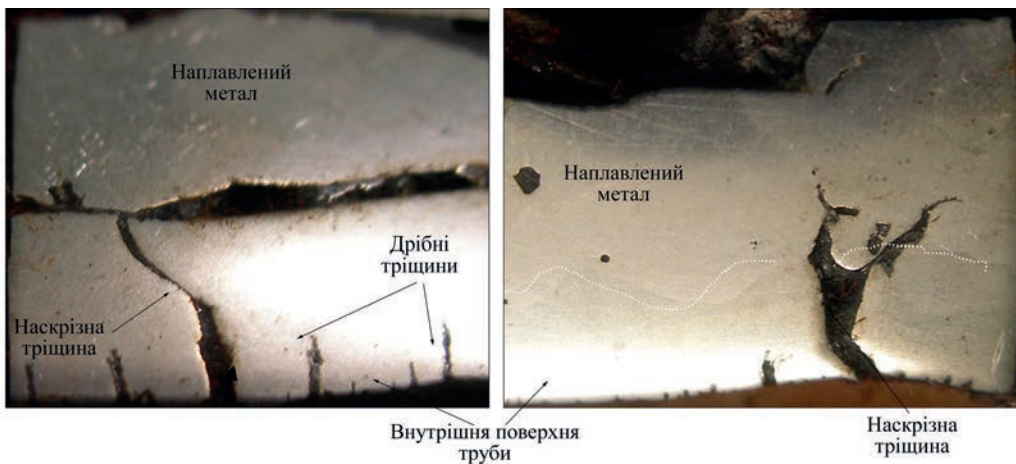


Рис. 3. Зовнішній вигляд тріщин на внутрішній поверхні зразка труби

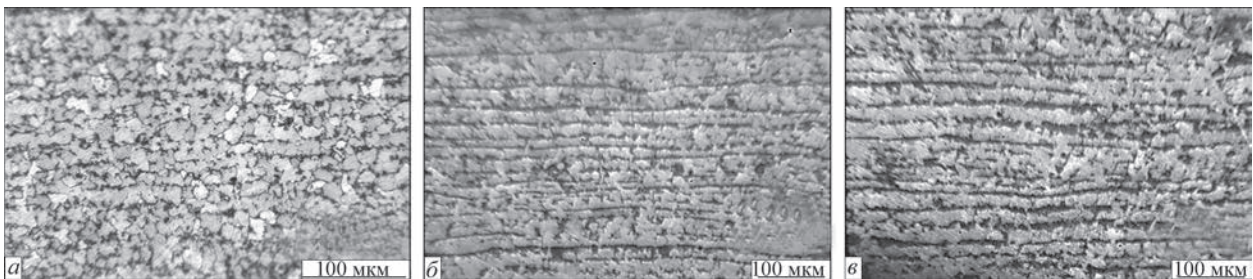


Рис. 4. Мікроструктура зразка труби на ділянках: поряд з ділянкою з тріщинами (а), на віддаленні від ділянок з тріщинами біля внутрішньої (б) та зовнішньої поверхні (в)

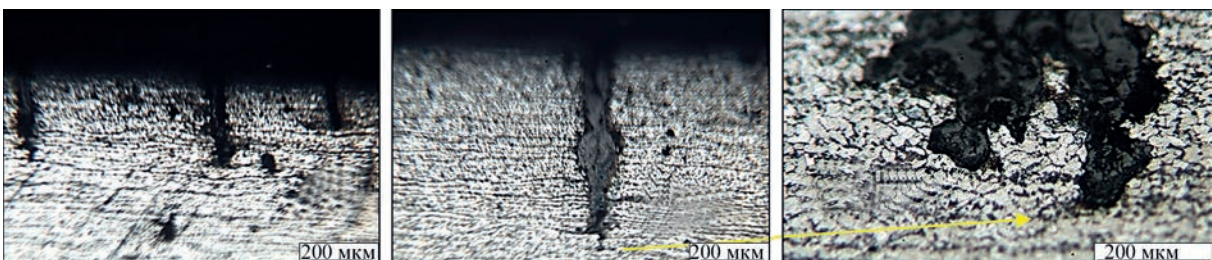


Рис. 5. Тріщини, що утворилися на внутрішній поверхні зразка труби після п'яти років експлуатації

викривлення перлітних смуг, що свідчить про деформування стінки труби, імовірно внаслідок виконання наплавлених шарів металу з зовнішньої сторони. Тріщини розвивалися в глибину та ширину через міжзеренне пошкодження з відокремленням зерен по границі феритної і перлітної складових, очевидно через дію водню. Розтравлення вершини тріщини та її затуплення вказує на перебіг анодних процесів. Таким чином, встановлено, що корозійні пошкодження у вигляді тріщин, розташованих впоперек осі труби, розвивалися з боку внутрішньої поверхні за механізмом міжзеренного руйнування по границях феритної і перлітної складових.

Висновки

Пошкодження металу труб екранних поверхонь котла-охолоджувача конвертерних газів відбулося з боку внутрішньої поверхні внаслідок складної взаємодії чинників під час експлуатації: пароводяної корозії з виділенням водню, що сприяє окрихченню сталі через абсорбцію водню металом у місцях руйнування шару магнетиту; теплових навантажень на стінку труби та механічних напружень, що обумовлені наплавленим шаром на зовнішній поверхні. Причини перебігу пароводяної корозії залежать від гідродинамічних процесів у котлі та мало залежать від водно-хімічного режиму котельного агрегата.

Список літератури

1. Ткаченко С.Й., Степанов, Д.В., Боднар Л.А. (2016) *Котельні установки: навчальний посібник*. Вінниця, ВНТУ.
2. Акользин П.А. (1982) *Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования*. Москва, Энергоиздат.
3. Zhijuan Zhao, Bingqing Cao, Dong Jin (2023) Research on corrosion of carbon steel in simulated boiler steam-water system. *J. of Physics: Conference Series*, **2539**, 012024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2539/1/012024>
4. *Handbook of Industrial Water Treatment Boiler Water Systems. Chapter 19 - Condensate System Corrosion*. <https://www.watertechnologies.com/handbook/handbook-industrial-water-treatment>.

5. <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/vodorodnoe-ohrupchivanie-parogeneriruyushih-trub/Page-2.html>
6. НПАОП 0.00-1.81-18 (2018) *Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском*.
7. Gladkov V.E., Berezin V.M., Bondar K.M. (2009) Физико-химический анализ условий образования и роста поперечных трещин в экранных трубах. *Вестник ЮУрГУ*, **10**, 48–54.
8. Popov, M.S., Belyakov, I.I., Tolstyh, A.D. (2024) Analysis of Damages to Boiler Screen Tubes BKZ-160-100-GM. *International J. of Industrial Engineering*, **2(4)**, 218–223. DOI: <https://doi.org/10.61927/igmin168>
9. Chae, H. (2021) Corrosion failure analysis of condensate pre-heater in heat recovery steam generator. *Corrosion Science and Technology*, **20(2)**, 69–76. DOI: <https://doi.org/10.14773/cst2021.20.2.69>
10. ГОСТ 9.908-85 (1985) *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости*.
11. DSTU 8972:2019 (2019) *Сталі та сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна*.

References

1. Tkachenko, S.Y., Stepanov, D.V., Bodnar, L.A. (2016) *Boiler installations: Training manual*. Vinnytsia, VNTU [in Ukrainian].
2. Akolzin, P.A. (1982) *Corrosion and protection of metal in thermal power equipment*. Moscow, Energoizdat [in Russian].
3. Zhijuan Zhao, Bingqing Cao, Dong Jin (2023) Research on corrosion of carbon steel in simulated boiler steam-water system. *J. of Physics: Conference Series*, **2539**, 012024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2539/1/012024>
4. *Handbook of Industrial Water Treatment. Boiler Water Systems. Chapt. 19 - Condensate System Corrosion*. <https://www.watertechnologies.com/handbook/handbook-industrial-water-treatment>.
5. <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/vodorodnoe-ohrupchivanie-parogeneriruyushih-trub/Page-2.html> [in Russian].
6. НПАОП 0.00-1.81-18 (2018) *Health and safety rules for operating pressurized equipment* [in Ukrainian].
7. Gladkov, V.E., Berezin, V.M., Bondar, K.M. (2009) Physical and chemical analysis of the conditions for the formation and growth of transverse cracks in screen tubes. *Vestnik YuUrGU*, **10**, 48–54 [in Russian].
8. Popov, M.S., Belyakov, I.I., Tolstyh, A.D. (2024) Analysis of damages to boiler screen tubes BKZ-160-100-GM. *Intern. J. of Industrial Engineering*, **2(4)**, 218–223. DOI: <https://doi.org/10.61927/igmin168>
9. Chae, H. (2021) Corrosion failure analysis of condensate pre-heater in heat recovery steam generator. *Corrosion Science and Technology*, **20(2)**, 69–76. DOI: <https://doi.org/10.14773/cst2021.20.2.69>
10. ГОСТ 9.908-85 (1985) *Unified system for protection against corrosion and ageing. Metals and alloys. Methods for determining corrosion and corrosion resistance indicators* [in Russian].
11. DSTU 8972:2019 (2019) *Steels and alloys. Methods for detecting and determining grain size* [in Ukrainian].

INVESTIGATION OF THE CAUSES FOR DAMAGE OF THE WATER-WALL TUBES OF BOILER COOLER OF THE CONVERTER GASES

S.O. Osadchuk, L.I. Nyrkova, L.V. Goncharenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: lnyrkova@gmail.com

The water-wall tubes of boiler cooler for converter gases, which were damaged after five years of operation, have been examined. Optical microscopy revealed that corrosion damages in the form of cracks, oriented perpendicularly to the tube axis on the inner surface, developed through intergranular corrosion along the boundaries of ferritic and pearlitic components. It was established that steam-water corrosion processes occurred on the inner surface of the tube, following the reaction of $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$ with hydrogen release, leading to the formation of small ulcers that developed into cracks due to the loss of integrity of the protective layer under operational thermal loads and mechanical stresses in local areas. The main cause of damage to the water-wall tubes is steam-water corrosion. 11 Ref., 5 Fig.

Keywords: carbon steel, water-wall tubes, boiler cooler, inner corrosion, steam-water corrosion

Отримано 29.05.25

Отримано у переглянутому вигляді 18.08.25

Прийнято 22.09.25

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СУМІЩЕНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПРЯМИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО–АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ІМПУЛЬСНИМ НАМАГНІЧУВАННЯМ

Г.М. Сучков, М.Е. Кальницький, А.В. Донченко, О.І. Курандо, А.Г. Алексіїв, О.М. Бороденко, О.І. Бутенко, А.О. Рибалко

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

На сьогодні відома велика кількість різноманітних конструкцій електромагнітно–акустичних перетворювачів, призначених для вимірювань, контролю якості та діагностики матеріалів і виробів. Такі перетворювачі збуджують і приймають імпульси всіх відомих ультразвукових хвиль у металовиробах як феромагнітного, так і неферомагнітного класу. Останнім часом інтенсивно розробляються перетворювачі, що використовують потужні імпульсні магнітні поля. З одного боку вони, за однакових інших умов, складніші за конструкцією, а з другого боку – мають суттєву перевагу при вимірюваннях характеристик феромагнітних об'єктів, оскільки для них практично відсутня сила взаємного притягання перетворювача та об'єкта контролю. Складність конструкцій електромагнітно–акустичних перетворювачів з імпульсним намагнічуванням обумовлює необхідність дослідження їхніх раціональних параметрів та використання нових методів функціонування з врахуванням одночасної взаємодії динамічного магнітного та високочастотного електромагнітного полів у поверхневому шарі металовиробу як при збудженні, так і при прийомі імпульсів ультразвукових хвиль. Особливо важливим є врахування такої взаємодії для широко використовуваних вимірювальних суміщених ультразвукових прямих електромагнітно–акустичних перетворювачів з імпульсним намагнічуванням. Причому доцільно виконати обов'язкові експериментальні дослідження для встановлення раціональних параметрів, оскільки відомі теоретичні роботи не дають достатньо точних результатів, необхідних для створення технологій і конструювання нових засобів вимірювань і контролю при імпульсному намагнічуванні. Бібліогр. 19, табл. 5, рис. 9.

Ключові слова: експериментальні дослідження, феромагнітний виріб, ультразвукові імпульси, електромагнітно–акустичний, вимірювання, контроль, діагностика, магнітне поле, електромагнітне поле, імпульсне намагнічування

Вступ. Ультразвукові методи вимірювань, контролю якості та діагностики є найпоширенішими в неруйнівному контролі (НК) [1, 2]. Традиційний контроль із використанням контактної рідини є не завжди прийнятним, оскільки вимагає постійних витрат на зачистку поверхні об'єкта досліджень і на контактну рідину [3, 4]. Також погіршується стан довкілля [2, 4].

Значно покращити ситуацію дозволяє використання електромагнітно–акустичних (ЕМА) методів і засобів НК [5–9]. Проте використання ЕМА перетворювачів (ЕМАП) з постійним намагнічуванням [5, 10] при дослідженні якості феромагнітних об'єктів контролю (ОК) призводить до пошкодження ЕМАП за рахунок сильного взаємного притягання та збудження когерентних завад від феромагнітних частинок, наприклад окалини. Вирішити вказані проблеми дозволяють ЕМАП з імпульсними магнітними полями [11–17]. Але такі прилади мають свої недоліки [15, 17]: недостатньо

досліджено динамічну взаємодію імпульсного магнітного поля та високочастотного магнітного поля в часі й просторі; недостатньо вивчено конструктивні та технологічні параметри ЕМА перетворювачів і засобів їх живлення, які суттєво впливають на результати контролю; не встановлено раціональні значення конструктивних і технологічних параметрів, у першу чергу, експериментальними методами. Особливо це важливо для приладів з портативними суміщеними прямими ЕМАП для товщинометрії та контролю імпульсами зсувних ультразвукових хвиль [9, 15] феромагнітних ОК, як при їх виготовленні, так і при експлуатації на підприємствах і в польових умовах [17].

Мета досліджень – підвищення ефективності ЕМАП для портативних ультразвукових приладів при збудженні та прийомі імпульсів зсувних ультразвукових хвиль нормально до поверхні феромагнітних ОК за рахунок імпульсного намагнічування.

Сучков Г.М. – <https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>, Кальницький М.Е. – <https://orcid.org/0009-0000-5056-2085>,
Донченко А.В. – <https://orcid.org/0009-0006-0559-0160>, Курандо О.І. <https://orcid.org/0009-0008-6687-3126>,
Алексіїв А.Г. – <https://orcid.org/0009-0001-1878-526X>, Бороденко О.М. – <https://orcid.org/0009-0001-1878-526X>,
Бутенко О.І. – <https://orcid.org/0009-0009-9636-8734>, Рибалко А.О. – <https://orcid.org/0009-0003-9560-4404>

© Г.М. Сучков, М.Е. Кальницький, А.В. Донченко, О.І. Курандо, А.Г. Алексіїв, О.М. Бороденко, О.І. Бутенко, А.О. Рибалко, 2025

Експериментальні дослідження засобу імпульсного намагнічування в складі макету суміщеного прямого ЕМАП для збудження та прийому зсувних пакетних ультразвукових імпульсів нормально до поверхні феромагнітного металовиробу. У [18] було показано, що при використанні джерела постійного магнітного поля, виготовленого у вигляді паралелепіпеда, його раціональна висота повинна бути близько 60 мм, а розмір полюса, поверненого до ОК, повинен знаходитися в діапазоні $30 \times 30 \dots 50 \times 50$ мм². Відповідно в [14] шляхом моделювання показано, що при імпульсному намагнічуванні при забезпеченні квазістаціонарного часу дії магнітного поля впродовж заданого проміжку можна використати результати [18] щодо розмірів осердя імпульсного магніту. Але такі висновки необхідно підтверджувати експериментально. Для цього було розроблено спеціальний стенд [19], який передбачає регулювання основних характеристик ЕМАП з імпульсним намагнічуванням у процесі дослідження. При цьому високочастотна частина стенду залишається такою ж, як і для ЕМА перетворювача з постійним магнітним полем [3, 5, 18].

Реалізувати запропонований підхід можливо за допомогою дослідного портативного приладу, спрощений макет якого наведено на рис. 1, де: 1 – імпульсний магніт; 2 – шихтоване осердя імпульсного магніту, виготовлене з ізолюваних між собою феромагнітних пластин з високою індукцією насичення; 3 – котушка намагнічування; 4 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 5 – феромагнітний електропровідний металовиріб; 6 – локальна ділянка поверхневого шару металовиробу, в якій збуджуються ультразвукові імпульси та відповідно приймаються з ОК; 7 – синхронізатор; 8 – блок живлення котушки намагнічування 3; 9 – регулятор встановлення часу початку дії імпульсу намагнічування; 10 – регулятор встановлення часу завершення дії імпульсу намагнічування; 11 – генератор потужних високочастотних пакетних імпульсів струму живлення високочастотної котушки індуктивності 4; 12 – регулятор часового положення високочастотних пакетних імпульсів струму живлення високочастотної котушки індуктивності відносно часу початку дії імпульсу намагнічування; 13 – ультразвукові імпульси, які розповсюджуються в об’ємі ОК 5; 14 – посилювач прийнятих ультразвукових імпульсів 13; 15 – блок обробки, реєстрації та відображення інформації; L – відстань від ділянки 6 поверхні зі збудженим імпульсним магнітним полем до кінця зони ультразвукового контролю в об’ємі ОК 5; I –

струм у котушці 3 імпульсного магніту 1; B – індукція імпульсного магнітного поля; D – дефект в об’ємі феромагнітного електропровідного металовиробу, що контролюється.

Враховуючи викладене вище, виберемо розміри шихтованого осердя імпульсного магніту $36 \times 36 \times 60$ мм³ із наведеного вище діапазону. При цьому слід звернути увагу на те, що виготовлення осердя імпульсного магніту шихтованим призводить до зменшення коефіцієнта його заповнення металом. Відповідно цей фактор призведе до зменшення величини індукції магнітного поля, що формується. Виникає протиріччя – з одного боку, наближення шихтованого осердя магніту до плоскої високочастотної котушки індуктивності має збільшити індукцію магнітного поля в поверхні ОК, а з другого – шихтування осердя призводить до зменшення індукції магнітного поля. Вплив цього фактора необхідно додатково дослідити експериментально.

У [11] показано, що для зменшення часу наростання імпульсу намагнічування, а, відповідно, й зменшення енергетичних витрат індуктивна складова імпульсного магніту повинна бути мінімальною. Виникає ще одне протиріччя. З одного боку, збільшення об’єму металу магнітного осердя та кількості витків котушки намагнічування [17] підвищують індуктивність котушки магніту, а з другого – для зменшення індуктивності джерела магнітного поля доцільно зменшити кількість витків котушки намагнічування. Оскільки з геометричними розмірами осердя імпульсного магніту ми визначилися, то змінювати його параметри можливо тільки за рахунок параметрів котушки намагнічу-

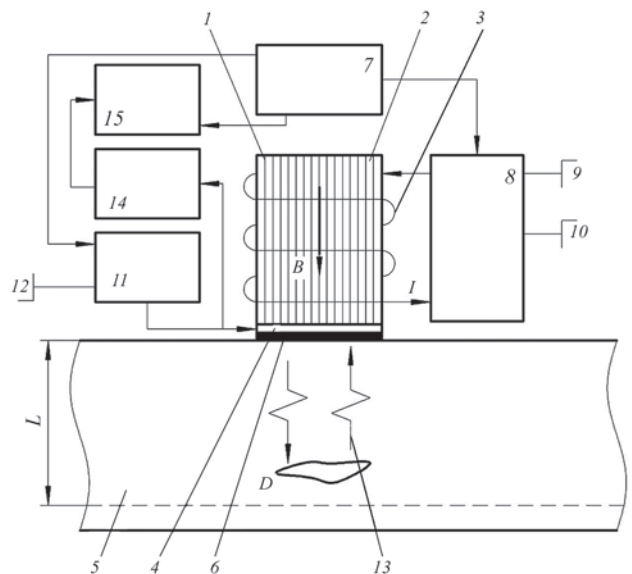


Рис. 1. Спрощений макет портативного ультразвукового приладу для дослідження характеристик ЕМАП та його елементів

вання, її розташування на осерді та характеристиками імпульсного струму живлення. Але тут також є протиріччя. У [12] вказано, що котушка намагнічування повинна охоплювати осердя по всій його висоті в 60 мм. З іншого боку, згідно з результатами [11], осердя магніту повинне охоплюватися котушкою намагнічування частково, що зменшує індуктивність джерела імпульсного магнітного поля. Таке протиріччя вимагає перевірки експериментальними дослідженнями висоти розташування котушки намагнічування по відношенню до висоти осердя при інших однакових умовах.

Таким чином, необхідно експериментально дослідити вплив на ефективність ЕМАП: параметрів котушки намагнічування; напруги живлення імпульсного магніту; відносних часових зв'язків імпульсу намагнічування та високочастотного сигналу тощо.

Методика проведення експериментальних досліджень. На першому етапі на осердя імпульсного магніту дротом діаметром 1,2 мм з лаковим покриттям намотувалася котушка до заповнення по всій висоті. Потім кількість витків зменшувалася, як це показано на рис. 2.

Всього було виготовлено мідним дротом діаметром 1,2 мм імпульсні магніти з кількістю витків котушки 45, 30, 15, 9 і 6 шт. Причому при



Рис. 2. Імпульсний магніт для ЕМАП з шихтованим осердям $36 \times 36 \times 60 \text{ мм}^3$ з обмоткою 45 та 15 витків мідним дротом діаметром 1,2 мм

зменшенні кількості витків вони розташовувалися в нижній, по відношенню до ОК, частині осердя, як це пропонувалося в [11]. Дослідження проводилися на зразку зі сталі 09Г2С розмірами $100 \times 100 \times 40 \text{ мм}^3$ без зачистки поверхонь від окалини. Ступінь максимальної шорсткості поверхонь зразка в деяких місцях досягала 0,5 мм.

Основними критеріями ефективності імпульсного магніту визначалися: величина магніторушійної сили [17] і тривалість квазіпостійної величини магнітного поля, достатньої для збудження та прийому ультразвукових імпульсів із феромагнітного зразка заданої товщини. У свою чергу, значення та тривалість квазіпостійної величини магнітного поля однозначно визначалася силою струму в котушці намагнічування.

При дослідженнях імпульсний магніт площиною одного полюса розташовували на поверхні зразка через лавсанову прокладку завтовшки 0,2 мм. На котушку намагнічування через електронний ключ подавалася напруга 30 В імпульсом тривалістю 400 мкс. Струм у ланцюгу вимірювався за допомогою шунта з ніхрому діаметром 1 мм з опором 0,13 Ом.

Приклади форми та величини сили струму в котушці намагнічування при різних напругах живлення розрядного ключового ланцюга наведено на рис. 3.

Аналіз даних, наведених на рис. 3, дозволяє зробити наступні висновки. При зменшенні кількості витків обмотки імпульсного магніту, по-перше, поступово формується «полиця» з часовою тривалістю, достатньою для вимірювання, контролю та діагностики ОК, а по-друге – швидкість наростання струму в котушці суттєво збільшується. Тобто є можливість скоротити тривалість імпульсу намагнічування і, відповідно, зменшити витрати енергії живлення батареї приладу та оптимізувати температурний режим імпульсного магніту.

Слід зауважити, що скоротити тривалість імпульсу намагнічування за рахунок зменшення ємності розрядних конденсаторів недоцільно, оскільки

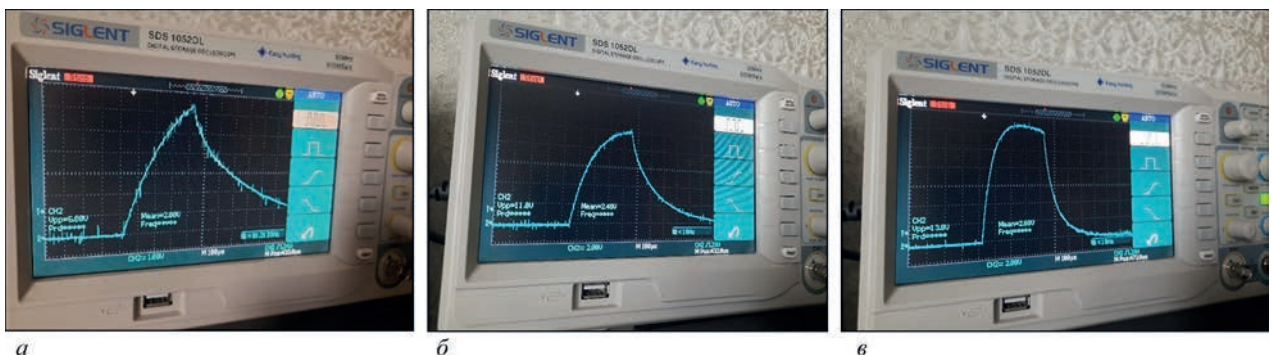


Рис. 3. Сигнали, еквівалентні струму в котушках імпульсного магніту залежно від кількості витків дроту діаметром 1,2 мм у нижній частині осердя: а – 15 витків, б – 9 витків, в – 6 витків

ки потрібно формувати робочу «полицю» з часовою тривалістю, достатньою для виконання вимірювань параметрів ОК. Тоді зменшення індуктивності котушки намагнічування можливе практично тільки за рахунок зменшення витків котушки магніту, при інших однакових умовах, і не можливе за рахунок зменшення об'єму металу осердя магніту оскільки це визначено [3, 5, 19] розмірами робочої ділянки височастотної котушки індуктивності ЕМАП, яка повинна бути максимально можливою [5].

Розрахунки магніторушійної сили (МРС), яку можливо використати в певному наближенні [17], для наведених варіантів імпульсних магнітів МРС складає: для 45 витків – 1575, для 30 витків – 3090, для 15 витків – 6000, для 9 витків – 5965, для 6 витків – 4800.

При проведенні експериментів встановлено, що розміщення малої кількості витків котушки намаг-

нічування імпульсного магніту по всій висоті осердя дає суттєвий приріст МРС. При цьому котушка намагнічування з не товстого дроту перегрівається навіть при малих кількостях зондувальних імпульсів. Тому для виключення вказаного фактору було виготовлено котушки індуктивності із мідної стрічки завширшки 60 мм і завтовшки 0,5 мм з кількістю витків 8,5 (рис. 4) та із мідної стрічки завширшки 60 мм і завтовшки 0,1 мм з кількістю витків 5,75 шт.

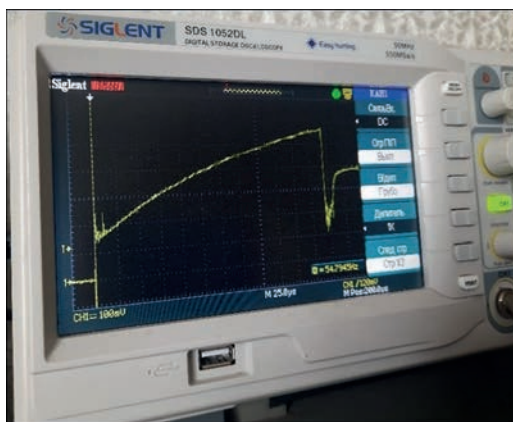
Для вимірювання струму в котушці намагнічування з малим опором було використано спеціально виготовлений шунт з опором 0,4 мОм, який калібрували за допомогою стандартного шунта 75ШСММ3-200-0,5 з опором 0,375 мОм. Опір котушки за рис. 4, що вимірювали на постійному струмі міліометром Е6-15, складав 1,51 мОм. Індуктивність обмотки складає 10 мГн (виміряної приладом Е7-22 на частоті 120 Гц, що можна умовно вважати близьким значенням до основної частоти імпульсного струму). Результати вимірювань сили струму і, відповідно, індукції магнітного поля котушок зі стрічок різної товщини наведено на рис. 5 при використанні шунта 0,4 мОм.

Аналіз даних, наведених на рис. 5, говорить про те, що максимальна МРС для таких котушок намагнічування перевищує 11000. Причому при кількості витків близько 6 робоча «поличка» квазіпостійної індукції магнітного поля формується раніше. Тобто необхідно зменшувати кількість витків котушки намагнічування. Але подальше зменшення кількості витків котушки від 6 шт. веде до зменшення величини МРС. Окрім того, виявився й недолік – погіршився тепловий режим імпульсного магніту, обумовлений недостатньою віддачею тепла внутрішніми витками котушки та його осердям.

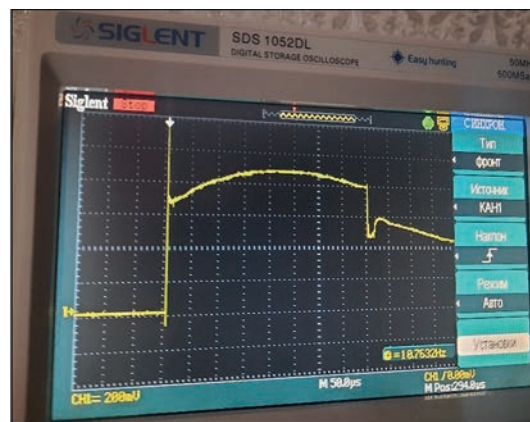
Для збереження МРС, зменшення активного опору та покращення температурного режиму котушка намагнічування була виготовлена з мідної



Рис. 4. Обмотка імпульсного магніту 8,5 витків, що виконана зі стрічки 60×0,5 мм² по висоті шихтованого осердя 60 мм розміром 36×36 мм²



а



б

Рис. 5. Напряга, еквівалентна струму, на шунті 0,4 мОм при обмотці імпульсного магніту: а – 8,5 витків стрічки розміром 60×0,5 мм², б – 5,75 витків стрічки розміром 60×0,1 мм². Напряга живлення розрядного ключа 30 В

шини $10 \times 1 \text{ мм}^2$ (рис. 6). Індуктивність котушки на осерді дорівнювала $0,008 \text{ мГн}$ (виміряна на частоті 1 кГц). Опір котушки для постійного струму – 40 мОм . Така котушка намагнічування була використана для подальших досліджень.

Вплив напруги живлення ключового розрядного каскаду на результати вимірювань струму наведено на рис. 7. Його максимальне значення на робочій ділянці складало $2,5 \text{ кА}$. Відповідно МРС має значення близько 16800 , що значно більше за величину, визначену в [17], як достатньою для проведення контролю.

Порівняльний аналіз результатів, наведених на рис. 5 і 7, дає можливість зробити висновок, що для збільшення МРС кількість витків котушки намагнічування повинно бути близько $5\text{--}6$ шт. Зменшення тривалості імпульсу намагнічування дає можливість економити енергію батарей портативних приладів і зменшувати термічне навантаження на імпульсний магніт. Відкрита поверхня котушки за рис. 6 збільшує тепловіддачу.



Рис. 6. Макет імпульсного магніту з котушкою з мідної шини $10 \times 1 \text{ мм}^2$; 6,75 витків



Рис. 7. Струм у котушці намагнічування, еквівалентний магнітному полю, при живленні ключового каскаду напругою, В: а – 30; б – 20; в – 10. Тривалість імпульсу намагнічування 400 мкс

Проте головною характеристикою ЕМАП з імпульсним намагнічуванням є величина амплітуди інформаційного сигналу [5, 11], за величиною якої визначається якість ОК. Для вимірювання інформаційного (донного) імпульсу ЕМА датчик встановлювався таким чином, щоб напрямок випромінювання ультразвукових імпульсів був перпендикулярним до площини зразка, тобто вимірювання проводилося по товщині 40 мм . Контроль проводився через лавсанову прокладку між ОК і ЕМАП завтовшки $0,2 \text{ мм}$.

При дослідженнях частота ультразвукових коливань складала $2,3 \text{ МГц}$, пакетний високочастотний імпульс зондування мав тривалість у 3 періоди частоти заповнення, сила пікового струму в плоскій високочастотній котушці індуктивності складала 400 А . Напруга живлення ключового каскаду стенду (рис. 1) складала 30 В . Імпульс намагнічування тривав 400 мкс . Результати вимірювань наведено на рис. 8.

Аналіз результатів, наведених на рис. 8, підтверджує високу ефективність збудження та прийому ультразвукових імпульсів ЕМА перетворювачем з імпульсним намагнічуванням. Відношення амплітуди першого донного імпульсу до амплітуди завад перевищує 30 разів, що більш ніж достатньо для ефективного роботи ультразвукового товщиноміра [5] або дефектоскопа [3, 16]. Фіксація значної кількості донних імпульсів говорить про достатню тривалість «робочої ділянки» збудженого в імпульсній котушці сили струму. Слід зазначити, що отримані результати не оброблялися будь-яким методом, тобто є початковими.

При проведенні досліджень встановлено вплив дуже важливого фактора. Прийнятна величина донних імпульсів фіксується осцилографом не відразу після початку дії імпульсу намагнічування. Спочатку донні імпульси, в залежності від запізнення часу збудження високочастотного імпульсу від початку імпульсу намагнічування, відсутні на мінімальному рівні, а потім поступово їхня амплітуда збільшується (табл. 1).

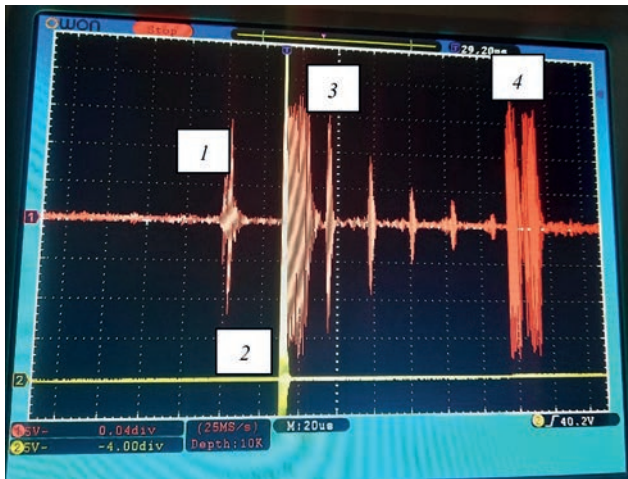


Рис. 8. Часова розгортка з відбитими з ОК донними імпульсами, що отримана при роботі ЕМАП з імпульсним намагнічуванням на екрані двопробеневого осцилографа на зразку зі сталі 09Г2С завтовшки 40 м: 1 – наведений сигнал початку імпульсу намагнічування; 2 – зонduючий високочастотний пакетний імпульс тривалістю 3 періоди частоти заповнення 2,3 МГц; 3 – відбитий зі зразка перший донний імпульс, за яким послідовно фіксуються другий, третій, четвертий та п'ятий перевідбиті в ОК донні імпульси; 4 – наведений сигнал від закінчення імпульсу намагнічування

При проведенні досліджень для котушки намагнічування 5,75 витків розміром 60×1,0 мм² використана напруга живлення розрядного ключа 30 В, шунт 0,4 мОм. Сформована «робоча полиця» струму в котушці імпульсного магніту є ефективною, починаючи від 200 мкс з початку імпульсу намагнічування. Максимальна амплітуда імпульсу високочастотного струму складала 400 А тривалістю 3 періоди заповнення частотою 2,3 МГц.

Таким чином, доцільно вибрати кількість витків котушки намагнічування близько 6 шт. при шихтованому осерді розміром 60×36×36 мм³, виготовленому з трансформаторної сталі пластинами завтовшки 0,5 мм або тонше, що забезпечує відсутність когерентних завад з осердя імпульсного магніту.

З аналізу даних, наведених у табл. 1, також робимо висновок про доцільність зменшення тривалості імпульсу намагнічування, що дає можливість еконо-

мити енергію батареї живлення приладу та покращити температурний режим імпульсного магніту.

Результати впливу напруги живлення ключового каскаду на результати досліджень, при попередніх умовах, наведено в табл. 2. Тривалість імпульсу намагнічування зменшено до 225 мкс. Форма такого імпульсу намагнічування показана на рис. 9.

Аналіз даних, наведених в табл. 2 та на рис. 7, дають підстави стверджувати, що збільшення напруги живлення котушки намагнічування збільшує швидкість наростання імпульсного магнітного поля, що, в свою чергу, дає можливість скорочувати тривалість імпульсу намагнічування. При цьому МРС зростає майже до 13000 ампер-витків.

При виконанні експериментальних досліджень встановлено, що максимум струму намагнічування однозначно корелює з максимумом індукції магнітного поля в поверхневому шарі металу, який визначає максимум амплітуди ультразвукових інформаційних (донних) імпульсів.

Ефективною перевагою ЕМА перетворювачів є можливість вимірювань і контролю через шар діелектричного покриття, наприклад фарбового. Товщина такого покриття, як правило, може досягати 1...2 мм. Тому виконано дослідження впливу діелектричних прошарків між ЕМАП і ОК (табл. 3), а також між осердям імпульсного магніту та високочастотною котушкою індуктивності (табл. 4). Товщина діелектричної основи, в якій вмонтовано високочастотну котушку, складала 3 мм.

Дані, наведені в табл. 3, говорять про те, що вплив відстані між ЕМАП і поверхнею ОК на амплітуду ультразвукових імпульсів доволі суттєвий. Проте при типових товщинах фарбових покриттів 0,1...0,3 мм ЕМАП розробленого типу буде працювати ефективно.

При виконанні вищенаведених досліджень частота високочастотних пакетних імпульсів складала 2,3 МГц, частота зондування – 4 Гц, максимальний струм у котушці намагнічування – 2250 А,

Таблиця 1. Залежність амплітуди донних імпульсів A_1 від часу затримки високочастотного пакетного імпульсу по відношенню до початку імпульсу намагнічування тривалістю 400 мкс при живленні вихідного ключового каскаду напругою 30 В

Параметр	Час затримки високочастотного імпульсу відносно початку імпульсу намагнічування							
	50	100	150	200	250	300	350	390
Амплітуда першого донного імпульсу A_1 по відношенню до рівня завад, разів	8	18	26	34	34	34	34	34

Таблиця 2. Залежність амплітуди донних імпульсів A_1 та максимальної сили струму в котушці намагнічування від напруги живлення ключового каскаду при тривалості імпульсу намагнічування 225 мкс

Параметр	Величина параметра					
	5	10	15	20	25	30
Напруга живлення вихідного ключового каскаду, В	2	10	19	28	32	36
Амплітуда першого донного імпульсу A_1 по відношенню до рівня завад, разів	325	775	1100	1600	2000	2250
Максимальна сила струму в котушці намагнічування, А						

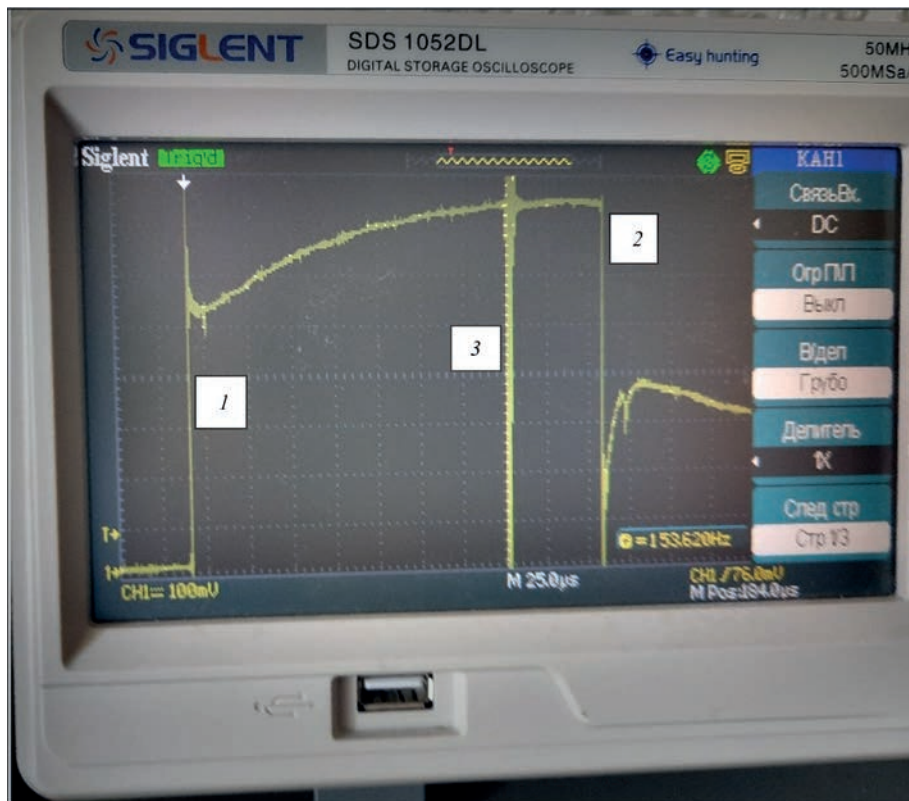


Рис.9. Форма імпульсу намагнічування тривалістю 225 мкс з наведеним високочастотним імпульсом: 1 – початок імпульсу намагнічування; 2 – кінець імпульсу намагнічування; 3 – високочастотний імпульс

Таблиця 3. Вплив товщини діелектричного прошарку на металі на амплітуду першого ультразвукового донного імпульсу

Параметр	Величина параметру			
Товщина діелектричного прошарку між металом і ЕМАП, мм	0,2	1,5	2,2	3,7
Амплітуда першого донного імпульсу A_1 , по відношенню до рівня завод, разів	34	28	26	24

Таблиця 4. Вплив товщини діелектричного прошарку між осердям і високочастотною котушкою індуктивності ЕМАП на амплітуду ультразвукових донних імпульсів

Параметр	Величина параметру						
Товщина діелектричного прошарку між осердям і високочастотною котушкою індуктивності, мм	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,7
Амплітуда першого донного імпульсу A_1 , по відношенню до рівня завод, разів	34	34	32	32	30	30	26

кількість періодів частоти заповнення в пакетному імпульсі – 3, тривалість імпульсу намагнічування – 225 мкс, час затримки високочастотного імпульсу відносно початку імпульсу намагнічування – 175 мкс, напруга живлення вихідного ключового каскаду – 30 В.

Аналіз даних, наведених у табл. 4, дає можливість зробити висновок, що відстань від осердя імпульсного магніту до високочастотної котушки впливає на величину амплітуди ультразвукових імпульсів не сильно. Але цю відстань необхідно встановлювати мінімальною. «Дзвін» після зондуючого високочастотного імпульсу не змінюється при збільшенні відстані від осердя до високочастотної котушки.

Проте при збільшенні товщини діелектричного прошарку між ЕМАП і ОК з 0,2 до 1,7 мм збільшується величина «дзвону» і, відповідно, «мертва зона» з 18 до близько 35 мм. Це є суттєвим для оцінки якості металовиробу, тому необхідно розробляти пристрої для ефективнішого пригнічення амплітуди та тривалості «дзвону».

Ще одним параметром, що може впливати на амплітуду ультразвукових імпульсів, є тривалість високочастотного пакету, який визначається кількістю періодів частоти заповнення. Результати дослідження цього параметру наведено в табл. 5.

Аналіз даних, наведених в табл. 5, говорить про те, що для збудження та прийому ультразвукових імпульсів достатньо використовувати па-

Таблиця 5. Вплив тривалості пакету високочастотного імпульсу на амплітуду донного ультразвукового сигналу

Параметр	Величина параметру					
Кількість періодів частоти заповнення пакетного імпульсу живлення високочастотної котушки, шт.	1	2	3	4	5	6
Амплітуда першого донного імпульсу A_1 , по відношенню до рівня завод, разів	26	34	35	36	36	36

кетний високочастотний імпульс тривалістю 3 або більше періодів заповнення частоти при встановлених вище величині та тривалості імпульсу намагнічування.

Висновки

Розроблено стенд для експериментальних досліджень факторів, які визначають ефективність приладу для ультразвукового контролю феромагнітних матеріалів при імпульсному намагнічуванні ЕМАП.

Виконані дослідження показали, що величина корисного сигналу суттєво залежить від часового положення високочастотного імпульсу по відношенню до початку імпульсу намагнічування. Величина затримки високочастотного імпульсу повинна визначатися експериментально для конкретного феромагнітного матеріалу ОК.

Доведено, що індуктивність імпульсного магніту повинна бути мінімальною, активний опір котушки намагнічування також повинен бути мінімальним. У результаті тривалість імпульсу намагнічування не перевищує 200...300 мкс, з робочою частиною імпульсу намагнічування, яка забезпечує вимірювання, контроль і діагностику феромагнітних сталевих металовиробів завтовшки до 150...200 мм. Для портативних ЕМА приладів витрати енергії живлення будуть мінімальними.

Показано, що ефективний імпульсний магніт ЕМА перетворювача доцільно виготовляти з пластин трансформаторної сталі, так щоб площини пластин були нормальними по відношенню до робочої частини провідників високочастотної котушки. Розмір осердя доцільно вибирати 30×30×60...50×50×60 мм³. При цьому кількість витків котушки імпульсного магніту приблизно повинна складати 6 шт. з розміром провідника 10×1 мм².

Збільшення напруги живлення імпульсного магніту суттєво зменшує час наростання магнітного поля і, відповідно, зменшує тривалість імпульсу намагнічування, що важливо для підтримки температурного режиму ЕМАП.

Список літератури

1. Лютак І.З. (2011) *Контроль пружних властивостей металу стінки магістральних трубопроводів акустичними методами*: дис. ... докт. техн. наук: 05.11.13. Івано-Франківськ.
2. Цапенко В.К., Куц Ю.В. (2010) *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*. Підручник. Київ.
3. Плеснецов С. Ю. (2021) *Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів*: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.11.13. Харків.
4. Карпаш М.О., Рибіцький І.В., Котурбаш Т.Т., Бондаренко О.Г., Карпаш О.М. (2012) *Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі. Монографія*. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ.

5. Десятніченко О.В. (2015) *Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями*: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Харків.
6. Сайт компанії NORDINKRAFT [електронний ресурс]. Режим доступу: www.nordinkraft.de/. (Дата звернення: 08.05.2020).
7. Kogia, M., Gan, T.H., Balachandran, W., Livadas, M., Kappatos, V., Szabo, I., Mohimi, A., Round, A. (2016) High temperature shear horizontal electromagnetic acoustic transducer for guided wave inspection. *Sensors*, 16(4), 582. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16040582>
8. Mirkhani, K., Chaggares, C., Masterson, C., Jastrzebski, M., Dusatko, T., Sinclair, A., Shapoorabadi, R.J., Konrad, A., Papini, M. (2004) Optimal design of EMAT transmitters. *NDT E Int.*, 37, 181–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.09.005>
9. Boughedda, H., Hacib, T., Chelabi, M., Acikgoz, H., Le Bihan, Y. (2015) Electromagnetic Acoustic Transducer for Cracks Detection in Conductive Material. In: *Proc. of 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. pp. 1–4. IEEE Conference Publications. DOI: <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416717>
10. Суворова М.Д. (2019) Розробка намагнічувальних джерел для ЕМА перетворювачів на основі потужних постійних магнітів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*, 1, 63–73. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b622d95b-faa3-4ee4-afce-ae6a33c54c67/content>
11. Буссі Салам (2020) *Електромагнітно-акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів*: дис. ... канд. техн. наук, НТУ «ХПІ».
12. Донченко А.В., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Кропачек О.Ю. (2024) *Накладний суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач з імпульсним намагнічуванням для контролю феромагнітних металовиробів*. Патент України на корисну модель №156088. Заявка №U202304534 від 25.05.2023 р. Опубл. 08.05.2024. Бюл. №19.
13. Fortunko, C.N. Maclauchlan, D. *Pulsed electromagnets for EMATS*. Fracture and Deformation Division National Bureau of Standards Boulder, CO 80303.
14. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плеснецов С.Ю., Кошкарів Ю.Ю., Кальницький М.Е. (2024) Моделювання імпульсних джерел магнітного поля портативних ультразвукових електромагнітно-акустичних перетворювачів для вимірювань, контролю та діагностики. *Метрологія та прилади*, 1, 28–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.1.06>
15. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кошкарів Ю.Ю., Бойко В.М., Донченко А.В. (2023) Стан розвитку портативних електромагнітно-акустичних перетворювачів для вимірювань, контролю та діагностики феромагнітних металовиробів (огляд). *Подільський вісник: сільськогосподарські, технічні, економічні і ветеринарні науки*, 4(41), 54–61. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.8>
16. Сучков Г.М., Донченко А.В. (2023) 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, Вип. 74, сс. 192–194.
17. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плеснецов С.Ю. та ін. (2025) Підвищення чутливості електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю, вимірювання і діагностики феромагнітних металовиробів за рахунок збільшення величини індукції магнітного поля (огляд). *Технічна електродинаміка*, 2, 85–95. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.02.085>
18. Bolyukh, V.F., Suchkov, G.M., Mygushchenko, R.P., Kalnytskyi, M.E. (2025) Determination of parameters of an autonomous source of a constant magnetic field for a portable electromagnetic-acoustic transducer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, 72–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.09>
19. Сучков Г., Кальницький М., Дмитренко М., Бобров О. (2025) Універсальний стенд та обладнання для дослід-

ження електромагнітно-акустичних перетворювачів з імпульсним джерелом поляризованого магнітного поля. *Методи та прилади контролю якості*, 1(54), 13–28. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1\(54\)-13-28](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1(54)-13-28)

References

- Liutak, I.Z. (2011) *Control of elastic properties of the metal wall of main pipelines by acoustic methods*: PhD Thesis: 05.11.13. Ivano-Frankivsk [in Ukrainian].
- Tsapenko, V.K., Kuts, Yu.V. (2010) *Fundamentals of ultrasonic nondestructive testing*. Textbook. Kyiv [in Ukrainian].
- Pliesnetsov, S.Yu. (2021) *Development of methods and means for electromagnetic and acoustic inspection of rod, tube and sheet metal products*: PhD Thesis: 05.11.13. Kharkiv [in Ukrainian].
- Karpash, M.O., Rybitskyi, I.V., Koturbash, T.T., Bondarenko, O.H., Karpash, O.M. (2012) *Acoustic control of structures and equipment in the oil and gas industry*. Monograph. Ivano-Frankivsk, IFNTUOG [in Ukrainian].
- Desiatnichenko, O.V. (2015) *Electromagnetic and acoustic thickness gauge for inspection of metal products with dielectric coatings*: PhD Disc.: 05.11.13. Kharkiv [in Ukrainian].
- NORDINKRAFT. The quality guard. www.nordinkraft.de/. (Application Date: 08.05.2020).
- Kogia, M., Gan, T.H., Balachandran, W. et al. (2016) High temperature shear horizontal electromagnetic acoustic transducer for guided wave inspection. *Sensors*, 16(4), 582. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16040582>
- Mirkhani, K., Chaggares, C., Masterson, C. et al. (2004) Optimal design of EMAT transmitters. *NDTE Int.*, 37, 181–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.09.005>
- Boughedda, H., Hacib, T., Chelabi, M. et al. (2015) Electromagnetic Acoustic Transducer for Cracks Detection in Conductive Material. In: *Proc. of 4th Intern. Conf. on Electrical Engineering (ICEE)*, 1–4. IEEE Conference Publications. DOI: <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416717>
- Suvorova, M.D. (2019) Development of magnetic sources for EMO converters on the basis of powerful permanent magnets. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Elektroenerhetika ta Peretvoriuvalna Tekhnika*, 1, 63–73 [in Ukrainian]. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b622d95b-faa3-4ee4-afce-ae6a33c54c67/content>
- Bussi Salam (2020) *Electromagnetic and acoustic transducers for ultrasonic inspection of metal products*. PhD Thesis, NTU KhPI [in Ukrainian].
- Donchenko, A.V., Myhushchenko, R.P., Suchkov, H.M., Kropachek O.Yu. (2024) *Surface-mounted combined electro-*
- magnetic and acoustic transducer with pulse magnetization for control of ferromagnetic metal products*. Patent UA for utility model 156088. Application U202304534, 25.05.2023. Publ. 08.05.2024 [in Ukrainian].
- Fortunko, C.N., Maclauchlan, D. *Pulsed electromagnets for EMATS*. Fracture and Deformation Division National Bureau of Standards Boulder, CO 80303.
- Suchkov, H.M., Myhushchenko, R.P., Pliesnetsov, S.Yu., Koshkarov, Yu.Yu., Kalnytskyi, M.E. (2024) Modelling of pulsed magnetic field sources of portable ultrasonic electromagnetic-acoustic transducers for measurement, control and diagnostics. *Metrolohiia ta Prylady*, 1, 28–31 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.1.06>
- Suchkov, H.M., Myhushchenko, R.P., Koshkarov, Yu.Yu., Boiko, V.M., Donchenko, A.V. (2023) The state of development of portable electromagnetic-acoustic transducers for measurement, control and diagnostics of ferromagnetic metal products (Review). *Podilskyi Visnyk: Silske Hospodarstvo, Tekhnika, Ekonomika. Silskohospodarski, Tekhnichni, Ekonomichni i Veterynarni Nauky*, 4(41), 54–61 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.8>
- Suchkov, H.M., Donchenko, A.V. (2023) Improvement of electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic quality control of ferromagnetic metal products. In: *Technological, Economic and Technical Aspects of Formation In: Abstr. of Papers of Intern. Sci. Internet Conf.*, 6–7 February 2023, Ternopil-Perevorsk, Issue 74, 192–194 [in Ukrainian].
- Suchkov H.M., Myhushchenko R.P., Pliesnetsov S.Iu., Pliesnetsov Yu.O., Kurando O.I., Aleksiiiv A.H., Borodenko O.M., Butenko O.I., Rybalko A.O. (2025) Increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic transducers for testing, measurement and diagnostics of ferromagnetic metal products via increase in the value of magnetic field induction (overview). *Tekhnichna elektrodynamika*, 2, 85–95 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.02.085>
- Bolyukh, V.F., Suchkov, G.M., Mygushchenko, R.P., Kalnytskyi, M.E. (2025) Determination of parameters of an autonomous source of a constant magnetic field for a portable electromagnetic-acoustic transducer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, 72–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.09>
- Suchkov, H., Kalnytskyi, M., Dmytrenko, M., Bobrov, O. (2025) Universal test bench and equipment for studying electromagnetic-acoustic transducers with a pulsed source of polarizing magnetic field. *Metody ta Prylady Kontroliu Yakosti*, 1(54), 13–28 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1\(54\)-13-28](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1(54)-13-28)

EXPERIMENTAL STUDIES OF MEASURING COMBINED ULTRASONIC STRAIGHT ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS WITH PULSED MAGNETIZATION.

G.M. Suchkov, M.E. Kalnytskyi, A.V. Donchenko, O.I. Kurando, A.H. Aleksiiiv, O.M. Borodenko, O.I. Butenko, A.O. Rybalko

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

At present, a wide variety of designs for electromagnetic-acoustic transducers (EMATs) are known, which are intended for measurements, quality control, and diagnostics of materials and products. Such transducers generate and receive pulses of all known ultrasonic wave types in metal products, both ferromagnetic and non-ferromagnetic. Recently, there has been intensive development of transducers that use powerful pulsed magnetic fields. On one hand, these are structurally more complex under the same conditions, but on the other hand, they offer a significant advantage when measuring characteristics of ferromagnetic objects, since they practically eliminate mutual attraction forces. The complexity of EMAT designs with pulsed magnetization necessitates research into optimal parameters and the application of new operating methods, considering the simultaneous interaction of dynamic magnetic and high-frequency electromagnetic fields in the surface layer of the metal product – during both the excitation and reception of ultrasonic wave pulses. It is especially important to account for such interaction in widely used measuring combined ultrasonic straight EMATs with pulsed magnetization. Therefore, it is advisable to conduct mandatory experimental studies to determine the optimal parameters, as the available theoretical works do not provide sufficiently accurate results needed for the development of technologies and the design of new measurement and control tools operating with pulsed magnetization. 19 Ref., 5 Tabl., 9 Fig.

Keywords: experimental research, ferromagnetic product, ultrasonic pulses, electromagnetic-acoustic, measurement, control, diagnostics, magnetic field, electromagnetic field, pulsed magnetization

Отримано 07.07.25

Отримано у переглянутому вигляді 07.08.25

Прийнято 15.09.25



**НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**
член Європейської федерації з неруйнівного контролю
член Міжнародного комітету з неруйнівного контролю



**Вітаємо нових індивідуальних членів
Українського товариства НКТД**

- **Деменкову Світлану Дмитрівну**
старшу викладачку кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Защепкіну Наталію Миколаївну**
д.т.н., професорку кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Здоренка Валерія Георгійовича**
д.т.н., професора кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Підтвердили членство в УТ НКТД
на новий термін**

- **Балєв Володимир Миколайович**
к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Богдан Галина Анатоліївна**
к.т.н., доцентка кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Галаган Роман Віталійович**
к.т.н., доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Горкунов Борис Митрофанович**
д.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Григоренко Ігор Володимирович**
д.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Григоренко Світлана Миколаївна**
к.т.н., доцентка кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Дроздова Тетяна Василівна**
к.т.н., доцентка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»

- **Зайцева Лілія Василівна**
к.т.н., доцентка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Кубай Микола Михайлович**
керівник відділу ТзОВ «Кипер-Пласт», м. Львів
- **Лисенко Юлія Юріївна**
к.т.н., доцентка кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Момот Андрій Сергійович**
PhD, старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Нижник Олександр Ігорович**
к.т.н., доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Павловський Олексій Михайлович**
к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Паренюк Дмитро Володимирович**
PhD, старший викладач кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Повшенко Олександр Анатолійович**
Ph.D., асистент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Старовойт Ярослав Іванович**
к.т.н., доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Плєснецов Сергій Юрійович**
д.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Плєснецов Юрій Олександрович**

к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Львов Сергій Геннадійович**

к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Лисенко Володимир Валерійович**

к.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Смолін Юрій Олександрович**

к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Хомяк Юрій Валентинович**

к.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Чуніхіна Тетяна Віталіївна**

к.т.н., доцентка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»

Технології та засоби для НК

ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛУ В ЗОНІ ЗВАРНОГО ШВА

Троїцький В.О., д.т.н., проф.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Відомо дуже багато методів оцінки внутрішніх напружень у металах, у тому числі залишкових. Усі види зварювальних дефектів є концентраторами напружень. Тому всі способи виявлення дефектів можуть давати певну інформацію й про внутрішні напруження. З магнітних методів найбільш чутливим і затребуваним для відповідальних завдань є магнітооптичний метод (МОМ) оцінки залишкових напружень. Схему МОМ показано на рис. 1.

Магнітооптичний контроль базується на візуалізації топографії магнітного поля поверхні за допомогою ферит-гранатової плівки, в якій структура магнітних доменів чутлива до незначних зовнішніх магнітних полів. Були досліджені способи магнітооптичного контролю

прокату та зварних з'єднань як за наявності високочастотного намагнічування (класика) і проміжного носія інформації (нікелевої стрічки), так і без них, тобто безпосередньо за допомогою тільки ферит-гранатової плівки (рис. 1). В обох випадках магнітооптичний метод дозволив виявляти слабкі магнітні поля на поверхні, які «не бачать» інші методи НК. За допомогою МОМ відновлюються, наприклад, зрізані зашпакльовані номери стволів гармат, агрегатів, автомобілів тощо, при вибиванні яких виконувався наклеп. Такі локальні напружені стани можна вимірювати й за допомогою рухомих пристроїв при відповідному їх укомплектуванні засобами МОМ, наприклад, як показано на рис. 2. Тут рухомі намагнічувальні пристрої (НУ) типу ТВА обладнані датчиками МОМ. Вони вимірюють внутрішні напруження, магнітні поля, наприклад, у пришовній зоні, де ці поля створюють тріщини, підвищені залишкові напруження (ЗН), втомні магнітні поля.

Усі елементи МОМ у схемах на рис. 1, 2 дуже мініатюрні та мають розміри, що не перевищують розмірів інших засобів, що монтується на платформах ТВА для виконання візуально-вимірювального контролю. Використання магнітооптичного методу за схемою рис. 2 може бути використано при оцінці стану пришовної зони в нитці розкритого газопрово-

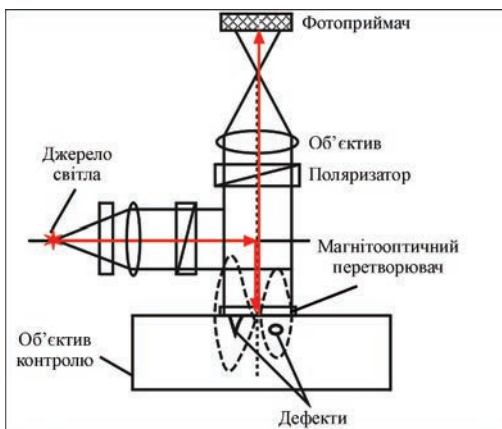


Рис. 1. Схема МОМ

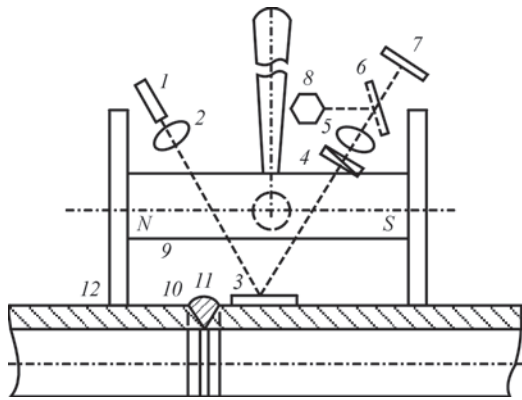


Рис. 2. Схема МОМ на базі НУ (9) типу ТВА, призначеного для оцінки напруженого стану пришовних зон (10) монтажних (11) і поздовжніх (12) швів газопроводів; 1 – джерело поляризованого світла; 2 – формувач пучка світла; 3 – плівка магнітооптична; 4 – аналізатор; 5 – оптична система; 6 – дзеркало; 7, 8 – фотоприймачі

ду (що вибухнув), коли треба знайти повноцінну трубу, до якої всі нерозкриті, але «втомлені» труби повинні бути замінені. Це схоже на виявлення «втомлених» артилерійських стволів. Метал стволів після певної кількості пострілів «втомлюється» і тому стволи розриваються. Реальний ресурс кожного ствола свій, що залежить від передісторії та структури металу. Стан стволів треба перевіряти.

Зварювання є ключовою технологією при виготовленні конструкцій, а зварні шви і прилегла до них зона – областю пікових залишкових напружень. Існуючі методи оцінки залишкових напружень мають свої позитивні та негативні сторони, але не всі з них придатні для роботи в зоні зварних швів. Над тріщинами, «втомленими» зонами (без тріщин) на поверхні об'єкта з'являються магнітні поля розсіювання. Тоді спрацьовує особливість структури плівки 3, яка реагує на слабкі магнітні поля. Джерело поляризованого світла 1 через формувач пучка світла 2 освітлює плівку 3. Світло, відбите від бездефектних ділянок, гаситься аналізатором 4. Світло від дефектних зон змінює свою поляризацію й не затримується аналізатором 4. Після оптичної системи 5 світло, що несе інформацію про стан об'єкта, через дзеркало 6 потрапляє на фотоприймачі 7 і 8. Далі за допомогою комп'ютерних програм на моніторі відображається зображення їх нормальних складових. Подібна система МОМ для зварних з'єднань описана в патенті України № 36299 «Спосіб магнітооптичної дефектоскопії трубопроводу» і в журналі ТДНК № 2, 2018.

За даними А.А. Антонова і к.т.н. І.Ю. Уткіна, існує багато інших методів оцінки залишкових напружень (ЗН), включаючи руйнівні методи. Нижче вони коротко викладені в порівнянні. Одним з істотних недоліків зварювання плавленням, крім різноманітності дефектів, є високий рівень ЗН.

Безпосередньо виміряти величину напруження неможливо. Тому всі методи оцінки ЗН мають непрямий характер. Вимірюється ознака, що залежить від напруженого стану, яку можна виміряти. Далі проводиться перерахунок величини вимірюваної ознаки у величину та знак механічних напружень. Методи оцінки ЗН активно розвиваються, з'являються все нові й нові. Загальна риса цих методів – потрібне попереднє отримання тарирувальної кривої, що пов'язує величину будь-якої фізичної ознаки та величини напружень.

Метод шумів Баркгаузена (магнітошумовий метод). Заснований на створенні магнітного поля, що плавно змінюється. Доменни, що опинилися під впливом цього поля, прагнуть повернути напрямок своєї магнітної орієнтації слідом за зовнішнім магнітним полем. Цей поворот супроводжується рухом меж між доменами. Переміщення доменної стінки всередині кожного зерна, рухи доменної стінки викликають електричні імпульси в котушці, розташованій на досліджуваному матеріалі. Сума всіх електричних імпульсів, викликаних загальними рухами доменної стінки, являє собою шумоподібний сигнал, відомий як шум Баркгаузена. На рис. 3 представлені такі прилади: Інтроскан (Білорусь), Rollscan і Stresscan (США). Мінімальна база вимірювання – близько 30 мм. Для проведення вимірювань потрібна тарирувальна крива.

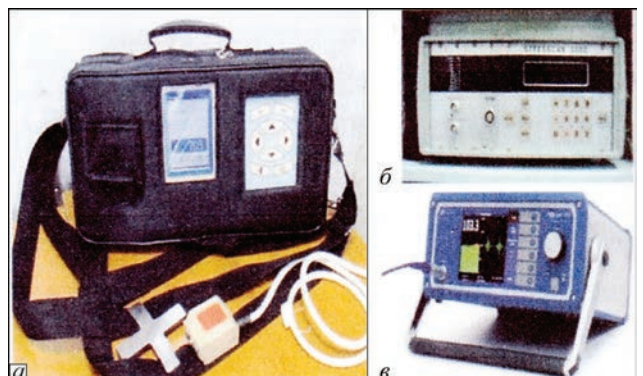


Рис. 3. Магнітошумові прилади: Інтроскан (а); Rollscan (б); Stresscan (в)

Магнітоанізотропний метод принципово відрізняється від інших магнітних методів. Його кінцевим результатом є не величина двох компонент плоского напруженого стану, а різниця головних механічних напружень (РГМН). Показано, що згідно з третім критерієм міцності (критерій Треска) руйнування матеріалу відбувається, коли $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \leq k$, де τ_{\max} – максимальне дотичне напруження; σ_1, σ_3 – найбільше та найменше напруження в середовищі. Магнітні властивості феромагнетика залежать від головного магнітного напрямку. Це явище отримало назву «магнітна анізотропія» (МА), яка може виникнути через: магнітопружні деформації; зовнішні та внутрішні напруження (наведена магнітна анізотропія); анізотропію форми зразка. Прилади працюють з перетворювачами, які являють собою два П-подібних магнітопроводи, на одному з яких розташовується обмотка збудження, на іншому – вимірювальні обмотки.

Перетворювачі використовують анізотропію магнітних властивостей, що виникає у феромагнетиках при навантаженні зовнішньою силою. Обладнання для даного методу випускається серійно (рис. 4).

Метод магнітної пам'яті металу (рис. 5) заснований на реєстрації розподілу залишкової намагніченості вздовж поверхні металу, що склалася під дією робочих і залишкових напру-

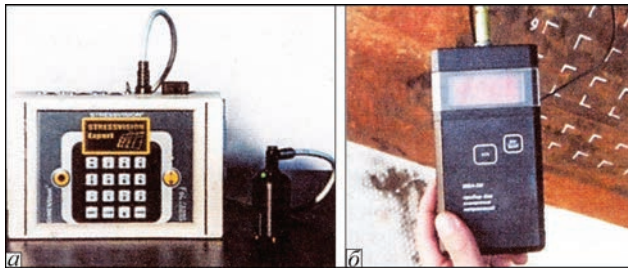


Рис. 4. Сканери-дефектоскопи: Stressvision (а); MBH-3М (б)



Рис. 5. Прилад для вимірювання концентрації напружень

жень. Цей метод не вимагає спеціальних намагнічувальних пристроїв. Місця концентрації напружень від робочих навантажень заздалегідь невідомі. Вони визначаються в процесі контролю. Не потрібна будь-яка підготовка контрольованої поверхні. Використовуються прилади вимірювання концентрації напружень, що мають малі габарити, автономне живлення.

Метод АФЧХ-тестування реалізується шляхом пропускання електричного струму змінної частоти через досліджувану ділянку. Переносний модуль керує в автоматичному режимі частотою вимірювального сигналу. За вимірними електричними величинами можна визначити величину середніх напружень і дійсні напруження. Метод АФЧХ-тестування представлений приладами (рис. 6, а) серії СИТОН (скан-індикатор технологічних і залишкових напружень). Приклад отриманих епюр залишкових напружень наведено на рис. 6, б.

Метод акустичної тензометрії. Основою всіх акустичних методів визначення напруженого стану є пружноакустичний ефект – лінійна залежність швидкості пружних хвиль від напружень. Зазвичай визначають одно- і дво-вісні напруження, що діють у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвиль, напрямків головних напружень.

Усі **механічні методи** базуються на законі Гука: $F = k\Delta l$, що лінійно пов'язує напруження та деформації. Модуль пружності k – вели-

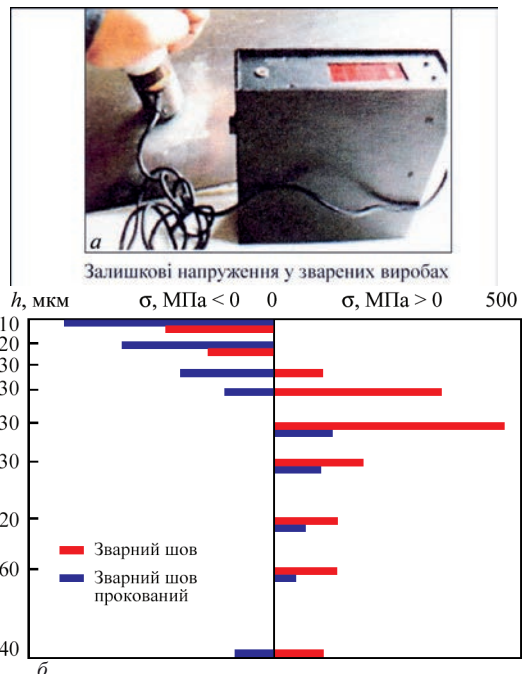


Рис. 6. Прилад серії СИТОН (а) та епюра напружень за методом АФЧХ-тестування (б)

чина таблична, для матеріалів даного класу він змінюється дуже мало, наприклад, для сталей $190 < k < 210 \cdot 10^{12}$ Па. Механічні методи не вимагають тарировальної кривої. Але щоб виміряти деформацію поверхні й потім знайти наявні залишкові напруження, треба цю деформацію створити: розрізати конструкцію на окремі елементи; видалити певний обсяг металу, а це порушує цілісність конструкції, що часто неприпустимо.

Метод визначення напружень за мікротвердістю ґрунтується на встановленій залежності між значенням мікротвердості та характеристикою напруженого стану. Цей метод застосовується досить часто.

Метод крихких покриттів дозволяє візуалізувати траєкторії головних напружень. При цьому на поверхню зразка наносять спеціальний лак з товщиною шару 0,05...0,10 мм, який при висиханні утворює крихке покриття. У процесі прикладання навантаження в покритті виникають тріщини, перпендикулярні до дії головних розтягуючих напружень (рис. 7). Отримані тріщини є траєкторіями головних напружень. За послідовністю появи тріщин судять про характер зміни напруженого стану в процесі навантаження в найбільш напружених зонах.

Поляризаційно-оптичний метод заснований на використанні пружно-оптичного ефекту (ПО-ефект) для оцінки ЗН або напружень від зовнішніх навантажень. ПО-ефект полягає у появі в прозорих матеріалах подвійного заломлення під дією напружень. Досліджуваний об'єкт поміщають між поляризатором і аналізатором, навантажують робочими навантаженнями. Аналіз отриманої картини дозволяє визначити області з максимальними деформаціями, тобто області з максимальним рівнем напружень.

Руйнівні механічні методи. До них можна віднести розрізання виробу на окремі елементи або створення надрізів на поверхні виробу. Розташування вимірювальних баз і схеми розрізання пластини при визначенні залишкових напружень представлені на рис. 8. Для тонкостінних труб існує метод кілець і смужок (рис. 9). З тонкостінної труби вирізають вузькі

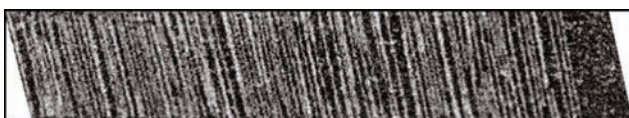


Рис. 7. Тріщини в лаковому шарі на поверхні зразка

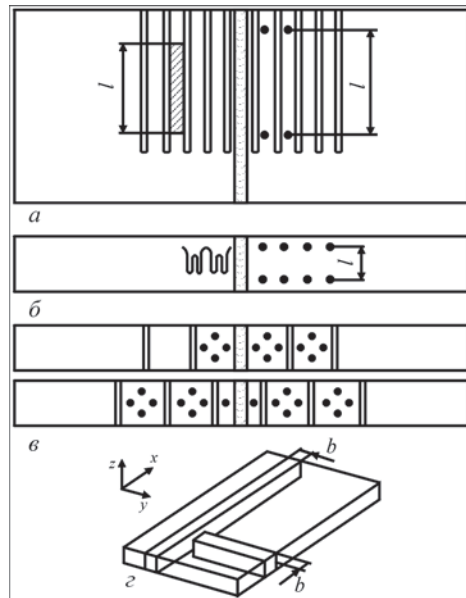


Рис. 8. Розрізання пластини: «гребінкою» (а); на поперечні смуги (б); на квадрати (в); уздовж головних напружень (г)

кілця і смужки, далі проводиться розріз кільця в радіальному напрямку і послідовне зняття шарів: у кільці вимірюється зміна його діаметра; у смужці вимірюють прогини. Визначення ЗН тонкостінних циліндрів ($R/h > 3$, де R – середній радіус; h – товщина стінки) за методом Давиденкова полягає в розрізанні досить довгої ділянки циліндра з подальшим розрізанням по твірній і далі зі зняттям циліндричних шарів травленням (рис. 10, а). Особливість порожнистих або суцільних циліндричних деталей при визначенні ЗН полягає в тому, що крім окружних і радіальних, в них можуть існувати й осеві ЗН. Для визначення ЗН за методом Закса з деталі вирізається циліндричний зразок і проводиться його засвердлювання (рис. 10, б). Крім зазначених вище методів, існують: вирізання зразка у вигляді стовпчика, створення прямолінійної неглибокої канавки тощо. Істотною перевагою всіх руйнівних механіч-

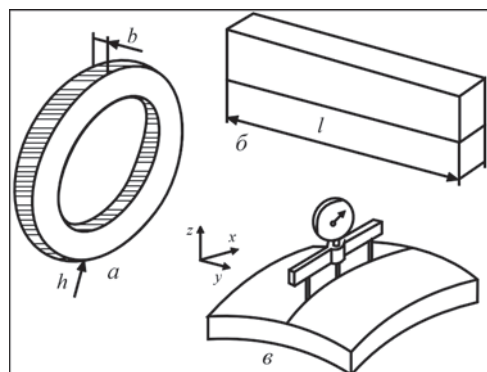


Рис. 9. Методи визначення ЗН: кілець (а); смужок (б); вимірюванням прогину (в)

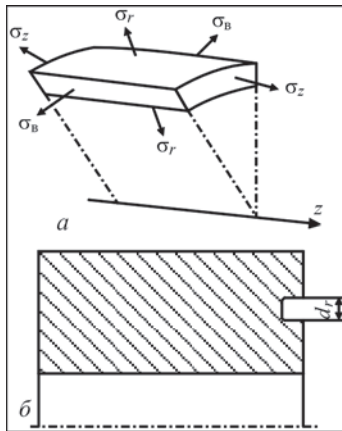


Рис. 10. Методи визначення ЗН тонколистових циліндрів: Давиденкова (а); Закса (б)

них методів є їхня достовірність. Для кожного з них розроблені математичні моделі, що пов'язують виміряні деформації і напружений стан. Питання тільки в точності вимірювання деформацій. Але недоліком цих методів є руйнування досліджуваної конструкції, або, як мінімум, виведення конструкції з ладу.

Малоруйнівні механічні методи передбачають локальний вплив на конструкцію, обсяг якого не призводить до виходу конструкції з ладу. Можливості цих методів практично аналогічні можливостям руйнівних методів.

Променеві методи. Серед променевих методів можна відокремити рентгенівський метод і метод нейтронної дифракції. Променеві методи ґрунтуються на визначенні величини деформації кристалічної решітки, що виникла в результаті дії поля ЗН. З одного боку, застосування променевих методів не призводить до руйнування або порушення цілісності, а з іншого боку, ці методи також мають основу в законі Гука, як і механічні, більш достовірні методи. Це дозволяє відмовитися від отримання тарирувальної кривої. Ці методи поєднали в собі все найкраще з фізичних і механічних методів. Однак і тут є проблеми.

Рентгенівський метод (рис. 11) дозволяє зробити оцінку ЗН на локальних ділянках конструкції в шарі завглибшки 20...25 мкм за вимірюваною деформацією кристалічної решітки.

Метод ґрунтується на явищі розсіювання монохроматичних рентгенівських променів під час проходження через регулярну кристалічну решітку матеріалу. При такому розсіюванні відбувається інтерференція променів, їх інтенсивність збільшується тільки в певних напрямках. Похибка вимірювання ЗН для різних сплавів

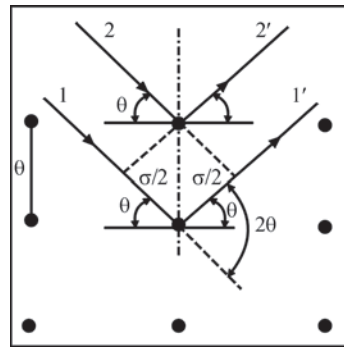


Рис. 11. Дифракція рентгенівських променів на атомних площинах металу

різна і становить 10...30 %. До недоліків рентгенівського методу можна додати той факт, що поле ЗН оцінюється в тонкому поверхневому шарі. Цей шар відрізняється за своїми характеристиками від відносно глибших шарів.

Метод нейтронної дифракції дозволяє виділити макронапруження та отримати інформацію про напружений стан на глибині до декількох сантиметрів у сталі, але вимагає наявності пучка нейтронів, який можна отримати тільки в атомному реакторі. Крім того, визначення величини трьох головних компонентів напруженого стану для однієї точки в тривимірному просторі може зайняти кілька днів. Слід виділити кілька особливостей визначення залишкових напружень в зоні зварного шва (ЗШ).

1. Наявність високого градієнта напружень. Класична еюра розподілу напружень у стиковому ЗШ для вуглецевих сталей передбачає досягнення границі плинності за наявності розтягуючих напружень у зоні ЗШ. У зоні лінії сплавлення еюра переходить через нуль і на прилеглих до ЗШ шарах основного металу стає від'ємною. По краях шва напруження близькі до нуля, в центрі шва вони досягають границі плинності, тобто зміна напружень від нуля до границі плинності відбувається на довжині не більше 10 мм, градієнт напружень в ЗШ може досягати 200 МПа/мм. Для фізичних методів база вимірювання/усереднення становить 20...50 мм і більше, відповідно застосування фізичних методів не дозволяє отримати правильну картину розподілу ЗН.

2. Необхідність отримання тарирувальних кривих. Структурно-фазові зміни в зоні термічного впливу (ЗТВ), області основного металу, що прилягає до ЗШ, є такими, що тарирувальні криві, отримані на основному металі, стають непридатними, недостовірними для роботи в області ЗТВ.

3. Якість поверхні зварного шва. Поверхня зварного шва має лускату, геометрично складну форму. Більшість методів оцінки напружень вимагає якісної установки датчика, що на ЗШ неможливо.

Отже, для роботи в зоні ЗШ не підходять фізичні та променеві методи. На даний час найбільш оперативним, найменш шкідливим визнано метод створення глухого отвору, який створює пошкодження, аналогічні поверхневим порам.

Глухий отвір призводить до локального виникнення деформацій і переміщень точок на поверхні в районі зондувального отвору. Вимірювання деформації може відбуватися або шляхом наклеювання розетки тензорезисторів навколо центру майбутнього отвору, або за допомогою методу лазерної інтерферометрії. Наклеювання тензорезисторів – це контактний метод. На шов наклеїти тензорезистор неможливо. Тому таким методом можна вивчати напружений стан тільки в основному металі, в тому числі і в областях, прилеглих до зварного шва. Лазерна інтерферометрія – безконтактний

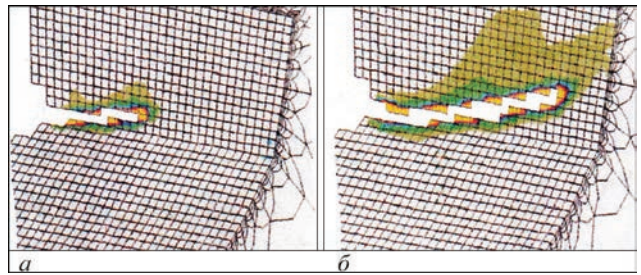


Рис. 12. Результати моделювання впливу ЗН на швидкість зростання тріщини при 1000 циклах навантаження: зростання тріщини при нульових ЗН (а); зростання тріщини при наявності розтягуючих ЗН (б)

метод. Для нього неважлива початкова форма поверхні. Тому даний метод можна рекомендувати для дослідження полів напружень у зоні зварного шва.

Оцінювати напружений стан важливіше, ніж знаходити всі дефекти металоконструкції. При розтягуючих залишкових напруженнях відбувається швидке зростання тріщин (рис. 12) (Махненко В.І. (2006) Ресурс безпечної експлуатації зварних з'єднань. Київ, Наукова думка).


JUNE 15TH/19TH
VERONA (ITALY)

14th

ECNDT 2026

EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING

Рік 2007

(на основі архівних матеріалів Інформаційного бюлетеня УТ НКТД «НК-Інформ»)

Зимова науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2007» у Славську

З 19 по 24 лютого 2007 р. у селищі Славське Львівської області відбулася традиційна зимова Науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2007». Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів», організована Західним регіональним відділенням УТ НКТД, Фізико-механічним інститутом ім. Г.В. Карпенко НАН України (Львів) та Центром «Леотест-Медіум» (Львів).

Учасники конференції розмістилися на базі «Бойківщина», розташованій на в'їзді до Славського біля підніжжя гори Кремінь в оточенні мальовничих хвойних дерев.

У конференції взяли участь понад 50 спеціалістів, які представляли понад 30 організацій, серед яких: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України (Львів), ІЕЗ ім.Є.О. Патона НАН України (Київ), Івано-Франківський НТУ нафти і газу, Дніпродзержинський державний університет, Об'єднання «Комунар» (Харків),

СКБ «Полісвіт» (Харків), «Прикарпаттрансгаз» (Івано-Франківськ), «Євро-Стандарт» (Запоріжжя), «Техдіагаз» (Київ), УкрНДІТМ (Дніпропетровськ), ДДАП «РАКС» (Дніпродзержинськ), НВФ «Ультракон-Сервіс» (Київ), «Підводтрупровід» (Київ), ТОВ «МІТ» (Дніпродзержинськ), НВФ «Зонд» (Івано-Франківськ), «РОЗЕН» (Київ), «Мотор-Січ» (Запоріжжя), ТОВ «Інтрон-СЕТ» (Донецьк), «Шерл» (Київ), Навойський гірничо-металургійний комбінат (Узбекистан), НАРС, ІАЕА (Австрія), «ЕКОРОЛ-JRL» (Польща).

На 4-х пленарних засіданнях конференції було представлено близько 40 доповідей. Найбільше доповідей підготовлено вченими Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка (Львів).

Як завжди на таких конференціях, певну частину часу було присвячено неформальному спілкуванню учасників на снігових карпатських схилах.



15-а Міжнародна конференція з НК в Ялті

З 1 по 5 жовтня 2007 р. у м. Ялта відбулася 15-та Ювілейна міжнародна конференція та виставка «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики», організована Українським інформаційним центром «Наука. Техніка. Технологія» (Київ) та НВП «Машинобудування» за підтримки Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики України і Дніпропетровського національного університету. Генеральний спонсор конференції – МЧТПП «Оніко» (Київ), спонсор – компанія «Сперанца» (Жовті Води).

У роботі конференції взяли участь понад 240 фахівців: з України, Німеччини, Чехії, Латвії, Казахстану, Словаччини та ін. Слід зазначити, що 110 учасників конференції представляли промислові підприємства, 48 – НДІ, КБ та ВНЗ, 61 – незалежні науково-виробничі фірми, 22 – експертні та діагностичні центри.

Відкрив конференцію академік НАН України, заступник директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона

НАН України Л.М. Лобанов. Учасників конференції вітали від Європейської федерації з НК та Німецького товариства НК пані Х. Вессель, від Чеського товариства НК – докт. В. Макаров, від Латвійського товариства НК – проф. В.В. Кожарінов. Про роботу Українського товариства НКТД у 2007 р. та про плани на 2008 р. розповів заступник голови О.В. Мозговой.

На конференції було заслухано 11 пленарних, 55 секційних та 45 стендових доповідей про останні результати досліджень і розробок з широкого спектру проблем НК: діагностування та прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, визначення фізико-механічних характеристик матеріалів, підготовки та сертифікації фахівців НК, розробки нових і вдосконалення існуючих нормативних документів з НК та інших актуальних питань.

Великий інтерес в учасників конференції викликали презентації фірм, що брали участь у виставці, серед яких: МЧТПП «Оніко» (Київ),





компанія «Сперанца» (Жовті Води), НВП «Машинобудування» (Дніпропетровськ), Асоціація «ОКО» (Київ), НВФ «Ультракон» (Київ), НВФ «Діагностичні прилади» (Київ), ТОВ «Карл Цейсс» (Київ), НВП «Інтрон-Сет» (Донецьк), ТОВ «Шерл» (Київ) та ін.

На одностайну думку, конференція пройшла успішно. Оргкомітет зробив усе можливе, щоб її учасники змогли інтенсивно, з користю для себе попрацювати, обмінятися думками, інформацією, дізнатися нове.

Про поїздку делегації УТ НКТД на 4-ту Міжнародну конференцію з НК у Греції та участь представників УТ НКТД у Нараді учасників Європейського проєкту «Long-Range Ultrasonic Testing Condition Monitoring» (LRUCM)

Дивовижна та гостинна країна, оспівана у міфах та легендах, батьківщина великої античної цивілізації; країна богів і героїв, один із центрів християнства, земля, на якій зосереджено таку велику кількість пам'яток, що для знайомства з усіма з них тут треба оселитися. У цій країні не тільки великі та відомі, але навіть невеликі міста та численні острови мають свої пам'ятки античної та середньовічної культури, свою багату подіями історію, свою легенду, свій міф. Той, хто хоч раз побував тут, напевно, запам'ятав неповторну блакитність неба, м'який клімат, тепле море, безліч різномовних туристичних груп, які штурмують всесвітні архітектурні шедеври.

Йдеться про Грецію, де з 11 по 14 жовтня 2007 р. відбулася 4-та Міжнародна конференція з неруйнівного контролю. Для участі у заходах, що відбулися в рамках конференції, УТ НКТД організувало чергову міжнародну поїздку українських фахівців з НК.

Склад делегації налічував трохи більше 20 фахівців, які представляли Дніпропетровський національний університет, НВФ «Дніпрочерметавтоматика» (Дніпропетровськ), ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, «Київоблгаз» (Біла Церква), НВФ «Колоран» (Київ), ДНВП «Комунар» (Харків), НВФ «Машинобудування»

(Дніпропетровськ), НТ СКБ «Полісвіт» (Харків), НВФ «Промсервісдіагностика» (Київ), ПНВП «Пульсар» (Донецьк), УкрНДІпроєкт (Київ), ДП «Харківстандартметрологія».

За словами організаторів конференції, їх метою було зібрати разом науковців та інженерів із різних країн і дати їм можливість обмінятися досвідом, отриманим під час проведення власних досліджень і технологічних розробок у галузі неруйнівного контролю.

У конференції, окрім грецьких фахівців та компаній, взяли участь представники з Німеччини, Англії, Австрії, Італії, Іспанії, США, Болгарії, України та інших країн. Загалом у роботі конференції як доповідачі та слухачі брали участь близько 300 фахівців. На конференції було зроблено 117 усних та стендових доповідей, більше половини з яких було представлено зарубіжними авторами. 20 компаній представили свої розробки та продукцію світових брендів у виставці засобів неруйнівного контролю.

Докладний звіт про поїздку делегації Товариства на конференцію в Грецію доступний в архівних матеріалах сайту УТ НКТД за посиланням: https://usndt.com.ua/documents/News_Greece-2007.pdf.

15–16 жовтня 2007 р. в Афінах (Греція)



відбулася робоча нарада учасників Європейського проекту «Long-Range Ultrasonic Testing Condition Monitoring» (LRUCM), присвячена підсумкам робіт протягом 24-х місяців. Проект присвячений розробці технологій та апаратури далекодіючого ультразвукового контролю протяжних об'єктів з обмеженим доступом до їх поверхні та впровадження їх у практику неруйнівного контролю.

У нараді брали участь Peter Mudge – координатор проекту, Chiraz Ennaceur, (TWI, Англія), Giuseppe Nardoni (I&T Nardoni Institute, Італія), Sergio Ghia (AIPnD – Італійське товариство з НК), Hannelore Wessel (DGZfP – Німецьке товариство з НК), Rodolfo Rodriguez

(AEND – Іспанське товариство з НК), Matt Gallaher (EFNDT – Європейська федерація з НК), Patrick Karlsson (Компанія «Zenon», Греція), Liudas Mazeika, Rymantas Kazys (Каунаський технічний університет, а також представники компаній ISQ (Португалія), Nexus (Болгарія), Coaxial Power Systems Ltd (Велика Британія), RARI (Португалія), ATG (Чехія), KCC (Велика Британія), Isotest (Італія).

У нараді з презентацією робіт, що виконуються УТ НКТД та ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в галузі створення антен для порушення спрямованих хвиль та популяризації даної технології серед фахівців з України, виступив проф. В.О.Троїцький.



Науково-практичні семінари УТ НКТД у Міжнародному виставковому центрі

З 26 по 28 вересня 2007 р. на території Міжнародного виставкового центру проходив 5-й Міжнародний форум «Паливно-енергетичний комплекс України: сьогодні та майбутнє». У рамках Форуму відбувся Науково-практичний семінар «Сучасні методи та технології неруйнівного контролю та технічної діагностики у паливно-енергетичному комплексі». Організатором семінару виступило УТ НКТД за участю Департаменту стратегічної політики та перспективного розвитку ПЕК Мінпаливенерго України, НАК «Нафтогаз України», НАК «Енергетична компанія України». На семінарі, в якому взяли участь понад 40 спеціалістів, було заслухано 14 доповідей, які були об'єднані за такими темами:

- Метод та технічні засоби далекодіючого ультразвукового контролю протяжних трубопроводів.
- Технології та обладнання для моніторингу технічного стану трубопроводів, визначення координат витоків продуктів із трубопроводів.

- Комп'ютерні системи обробки радіографічних плівок, цифрові технології та обладнання для радіаційного контролю.

З 27 по 30 листопада 2007 р. у Міжнародному виставковому центрі проходив 6-й Міжнародний промисловий форум. У рамках форуму відбувся Науково-практичний семінар «Технології неруйнівного контролю промислових об'єктів на основі фазованих решіток УЗК, радіографії та вібродіагностики». Семінар організували УТ НКТД спільно з ДП «Укрметр-тестстандарт». На семінарі було заслухано 11 доповідей. У його роботі взяли участь понад 30 представників підприємств із Харкова, Сум, Дніпропетровська, Сєверодонецька та Києва.

Особливу цікавість викликала доповідь І.І. Михайлова «Застосування ультразвукових фазованих решіток у стаціонарних, мобільних та переносних системах контролю». Доповідач зупинився на особливостях використання фазованих ґрат в ультразвукових дефектоскопах на прикладі дефектоскопа «OmniScan»



виробництва компанії Olympus NDT під торговою маркою R/D Tech. На стенді УТ НКТД на виставці було продемонстровано роботу зазначеного дефектоскопа у дії, що дозволило учасникам семінару докладніше ознайомитися з умовами його експлуатації.

Є.О. Давидов у своїй доповіді розповів про особливості вимірювання розмірів внутрішніх тріщиноподібних несучильностей за допомогою хвиль дифракції.

Про стан робіт за проектом Європейського Союзу для моніторингу технічного стану протяжних об'єктів з використанням методу та засобів далекодуючого ультразвуку спрямованими хвилями (проект LRUCM) виступив О.Г. Бондаренко.

Значний інтерес викликала серія доповідей щодо використання вібродіагностичного

методу контролю технічного стану машин та механізмів. З доповідями з цієї тематики виступили О.О. Стеценко «Визначення технологічного стану активних частин ДПА-25 з вібродіагностичних характеристик», Н.Н. Овчинников «Досвід оцінки технічного стану машин та механізмів виробничого обладнання», М.А. Дьомін «Технічні засоби та технології вібродіагностики для оцінки технічного стану машин та механізмів виробничого обладнання». Останній розповів також про особливості застосування балансувальних технологій у виготовленні, ремонті та обслуговуванні виробничого обладнання.

Про роботи ДП «Укрметрестандарт» з метрологічного забезпечення засобів вібрації, неруйнівного контролю та технічної діагностики доповіли А.П. Іващенко та Д.І. Суботін.



Правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики з глибоким сумом повідомляє, що 15 грудня 2024 року у віці 99 років пішов із життя Валентин Павлович Малайчук – доктор технічних наук, професор, відомий фахівець у галузі інформаційно-вимірювальних технологій, багаторічний завідувач кафедри радіоелектронної автоматики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

В.П. Малайчук розпочинав роботу в Дніпровському національному університеті у 1976 р. на кафедрі радіоелектронної автоматики, у 2012 р. став її завідувачем. Протягом свого довгого та плідного професійного життя Валентин Павлович здійснював підготовку інформації для візуально-аналітичного аналізу та підтримки прийняття управлінських рішень і займався обробкою вимірювань і сигналів неруйнівного контролю.

Він був засновником і керівником потужної наукової школи ДНУ з комп'ютерно-інтегрованих інформаційних технологій оброблення експериментальних вимірів у задачах проектування, дослідження, контролю, діагностики, моніторингу, прогнозування стану та якості технічних, адміністративних, соціальних, біологічних об'єктів і систем в умовах апріорної невизначеності їхніх статистичних закономірностей, впливу перешкод та обмеження на обсяг вимірів.

Валентин Павлович Малайчук – керівник наукових проєктів та автор чисельних наукових праць і посібників, серед яких: «Основи теорії виявлення змін параметрів дискретних випадкових сигналів», «Теоретичні основи радіолокації», «Математичні основи психометричних досліджень», «Математична дефектоскопія», «Математичне забезпечення системи менеджменту якості ракетно-космічної продукції» тощо.

До останнього дня Валентин Павлович працював на кафедрі, продовжуючи наукову роботу та навчання магістрів та аспірантів, для яких був чуйним наставником

20 червня 2024 року відбулася Генеральна Асамблея Європейської федерації з неруйнівного контролю (EFNDT)

Засідання проходило в дистанційному (на платформі ZOOM) форматі. В Асамблеї взяли участь 24 представники національних товариств НК із 18 європейських країн. Українське товариство неруйнівного контролю представив заступник голови Михайло Казакевич.

Президент EFNDT Fermín Gómez розповів про свою участь в засіданні ICNDT під час Пан-Американської конференції з НК. Бухгалтер EFNDT René Klieber (Швейцарія) надав фінансовий звіт за 2024 р. і представив бюджет на 2025 р. Від імені Оргкомітету Laura Giordano (Італія) презентувала актуальну інформацію щодо підготовки 14-ї Європей-

ської конференції з НК в Вероні.

Далі відбулися презентації потенційних господарів і організаторів у 2030 р. 15-ї Європейської конференції з НК: національних товариств з неруйнівного контролю Греції, Іспанії та Великої Британії. Відповідно містами-кандидатами на проведення конференції були: Афіни, Севілья і Глазго. У результаті двотурового голосування містом-господарем ECNDT-2030 було обране старовинне іспанське місто Севілья.

Наступна Генеральна Асамблея відбудеться у Вероні 23 вересня цього року.

Організаційний комітет 14-ї Європейської конференції з неруйнівного контролю (ECNDT 2026) відкрив етап прийому тез доповідей для усних та постерних презентацій



Заявки необхідно подавати виключно через онлайн-систему, доступну на офіційному веб-сайті заходу <https://www.ecndt2026.org/programme/call-for-abstracts-special-sessions/>.

Автори мають обрати до трьох тем для кожної презентації, а також бажаний варіант для її представлення (усний або постерний). Остаточне рішення залишається за Науковим комітетом.

Текст тез можна редагувати до кінцевого терміну подання, а саме до **15 листопада 2025 р.** включно.

Про рішення стосовно прийняття тез авторів буде повідомлено до **31 січня 2026 р.**

Автори прийнятих тез повинні зареєструва-

тися на конференцію до **15 березня 2026 р.**

Прийняті тези в скороченому варіанті будуть включені до збірки тез, яку буде розповсюджено серед учасників конференції.

Остаточні версії прийнятих розширених тез або повних статей, поданих на конференцію, будуть у вільному доступі в Архіві відкритого доступу **NDT.net** у спеціальному випуску електронного журналу неруйнівного контролю (ISSN 1435-4934).

Автори також можуть подати повні статті до міжнародних журналів і видавництв-партнерів ECNDT 2026:

- NDT & E International (Elsevier)
- STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SAGE Publications)

Тематика конференції:

ТРАДИЦІЙНІ МЕТОДИ

- ✓ вихрострумний
- ✓ мікрохвильовий, ТГц
- ✓ guided waves (контроль спрямованими хвилями)
- ✓ радіографічний
- ✓ ультразвуковий
- ✓ широкорадіація
- ✓ томографія
- ✓ інфрачервона термографія
- ✓ інші

ЗАСТОСУНКИ

- ✓ промислові технології та процеси
- ✓ енергія та навколишнє середовище
- ✓ транспорт
- ✓ цивільна та культурна спадщина
- ✓ агропродовольча галузь
- ✓ втрати води
- ✓ дрони
- ✓ біомедичні технології
- ✓ катодний захист
- ✓ інші

НОВІ МЕТОДИ

- ✓ NDE 4.0
- ✓ штучний інтелект та машинне навчання
- ✓ управління на основі даних
- ✓ автоматизація та робототехніка
- ✓ характеристика матеріалів
- ✓ чисельне моделювання та симуляція
- ✓ моделі з відкритим кодом
- ✓ статистика та надійність
- ✓ ймовірність виявлення
- ✓ моніторинг структурного здоров'я
- ✓ прогнозування
- ✓ інші

ЛЮДСЬКИЙ ФАКТОР

- ✓ кваліфікація, сертифікація, стандарти та навчання
- ✓ професійна етика та деонтологія
- ✓ етичне використання штучного інтелекту
- ✓ інше

Лист Американського товариства з НК (ASNT) членам Міжнародного комітету з НК (ICNDT) щодо участі в 17-й Азіатсько-Тихоокеанській конференції з неруйнівного контролю з 11 до 15 травня 2026 року в Гонолулу (Гаваї)

Dear ICNDT Member Organization,

ASNT is excited to announce that registration is now open for the **17th Asia Pacific Conference on Nondestructive Testing (APCNDT)**, taking place 11–15 May 2026 in Honolulu, Hawaii. If you plan to travel internationally, we encourage you to begin the visa application process as early as possible.

Under the theme **Breaking Barriers: NDT Solutions for a Changing World**, APCNDT 2026 will bring together nondestructive testing (NDT) professionals, researchers, and innovators from across the globe to share breakthroughs, explore practical applications, and shape the future of NDT.

Whether you're presenting research, exploring new technologies, or expanding your professional network, APCNDT 2026 offers something for every NDT professional.

- Four days of technical sessions, panels, and industry talks
- A dynamic exhibition with top-tier NDT technologies and solutions
- Inspiring keynote speakers and thought leadership opportunities
- Unforgettable networking, including a beachside luau and oceanfront events

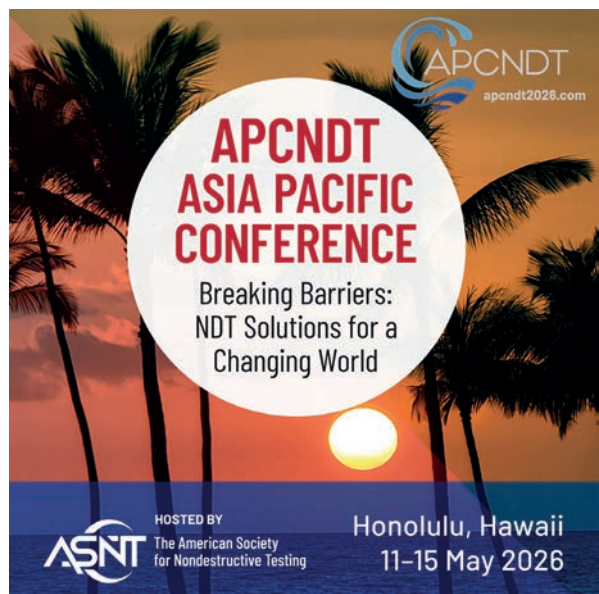
APCNDT 2026 will be held at the **Hilton Ha-**

waiian Village Waikiki Beach Resort, in Honolulu, Hawaii. Located on the widest stretch of beach, the 22-acre paradise features the best pools and waterlides in Waikiki, as well as the only saltwater lagoon!

We hope you will join us in Hawaii for this event. Please share this invitation with your members.

Regards,

Debbie Segor, CAE, PCM, CDMP
Marketing and Communications Director
American Society for Nondestructive Testing



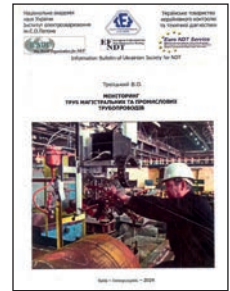
✓ Персонал Органу із сертифікації УТ НКТД продовжує роботи щодо приведення системи сертифікації Товариства у відповідність з вимогами Європейського стандарту EN ISO 9712 редакції 2022 року з метою повторної акредитації в Національному агентстві акредитації України (НААУ). Укладено відповідні договори з НААУ.

✓ Для науково-практичного семінару «Зварювання та неруйнівний контроль в нафтогазовій галузі», що відбудеться в Міжнародному виставковому центрі в рамках 9-ї Міжнародної спеціалізованої виставки «НАФТОГАЗЕКС-ПО-2025» УТ НКТД підготовлено та видано брошуру «Моніторинг труб магістральних та промислових трубопроводів», яка буде видаватися безкоштовно діючим членам УТ НКТД, які прийматимуть у часті у семінарі.

✓ Закінчується підготовка короткого учбового посібника англійською мовою «Main Directions of Defectoscopy and Monitoring. Album of Educational Posters on NDT» для подальшого поширення серед зарубіжних колег українських спеціалістів з метою встановлення ділових відносин УТ НКТД із організаціями західноєвропейських країн-потенційних партнерів в майбутніх проектах з післявоєнного відновлення промислових і цивільних об'єктів в Україні. Членів Товариства, що зацікавлені в отриманні посібника запрошуємо звертатися до Секретаріату УТ НКТД (т. 044 205-22-15).

✓ Вітаємо проф. В.О. Троїцького з отриманням 3-х патентів України в галузі військових розробок:

- Міношукач самохідний широкозахватний напівавтоматичний (№ 156672).
- Багатофункціональний наземний дрон високої прохідності (№ 160063).
- Вантажопідіймальний пристрій для транспортування військових та промислових об'єктів (№ 160010).



КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ ТА ВИСТАВОК

06–09 жовтня 2025	Орlando, США	ASNT 2025 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
11–13 листопада 2025	Литомишль, Чехія	55 th NDE for Safety 2025 / Defectoscopy 2025 55-а Міжнародна конференція та виставка з НК	Czech Society for NDT
18–21 листопада 2025	Сяминь, Китай	World Conference on Electromagnetic Nondestructive Testing – WCEMNT 2025 (Всесвітня конференція з електромагнітних методів НК)	Chinese Society for NDT
26–27 листопада 2025	Магдебург, Німеччина	Drohnen in der Zerstörungsfreien Prüfung (Дрони в неруйнівному контролі)	German Society for NDT
11–13 грудня 2025	Мумбаї, Індія	35 th Annual Conference & Exhibition on Non-Destructive Evaluation (NDE 2025) (35-а щорічна конференція та виставка з неруйнiвної оцінки)	Indian Society for NDT
10–13 лютого 2026	Лінц, Австрія	15 th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2026 (15-а Конференція з промислової комп'ютерної томографії)	University of Applied Sciences Upper Austria
26–27 лютого 2026	Мюнстер, Німеччина	Fachtagung Bauwerksdiagnose (Конференція з діагностики будівель)	German Society for NDT
17–19 лютого 2026	Ерфурт, Німеччина	Technical conference on NDT in the railway industry (Технічна конференція з НК на залізниці)	German Society for NDT
11–14 травня 2026	Гаваї, США	17 th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (17-а Азійсько-Тихоокеанська конференція з НК)	American Society for NDT
19–21 травня 2026	Ліон, Франція	COFREND Days 2026 (Щорічна конференція Французького товариства з НК)	France Society of NDT
15–19 червня 2026	Верона, Італія	The 14 th European Conference on Non-Destructive Testing (14 th ECNDT) (14-а Європейська конференція з НК)	Italian Society for NDT
07–10 липня 2026	Тулуза, Франція	12 th European Workshop on Structural Health Monitoring (12-й Європейський семінар з моніторингу технічного стану конструкцій)	France Society of NDT
12–15 жовтня 2026	Коламбус, США	ASNT 2026 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
15–19 травня 2028	Буенос-Айрес, Аргентина	21 st World Conference on Non-Destructive Testing 2028 (21-а Всесвітня конференція з НК)	Argentine Society for NDT



Центр сертифікації при Українському товаристві
неруйнівного контролю та технічної діагностики
Атестаційний центр неруйнівного контролю
при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона

ЗАПРОШУЮТЬ СПЕЦІАЛІСТІВ

що працюють в сфері неруйнівного контролю
пройти підготовку, атестацію та сертифікацію
з різних методів неруйнівного контролю:

рентгенографічного (RT)	магнітного (MT)
ультразвукового (UT)	капілярного (PT)
акустико-емісійного (AT)	контролю герметичності (LT)
теплового (TT)	візуального (VT)
вібродіагностичного (VA)	вихрострумового (ET)

Ми здійснюємо підготовку, атестацію та сертифікацію спеціалістів, що працюють в галузі неруйнівного контролю, на 1, 2 і 3 рівні кваліфікації у відповідності до вимог національних та міжнародних стандартів:

- ДСТУ EN ISO 9712 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу НК»,
- SNT-TC-1A "Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing",
- НПАОП 0.00-1.63-13 "Правила сертифікації фахівців з неруйнівного контролю"

в 12 виробничих секторах:

сектори за типом продукції: литво, поковки, зварні вироби, труби та трубопроводи, прокат.

промислові сектори: виробництво та оброблення металів, контроль перед введенням та в процесі експлуатації, залізничний транспорт та обладнання для нього, авіакосмічна продукція, продукція суднобудування, обладнання для атомної енергетики, бурове обладнання.

**Ви отримаєте сертифікат компетентності фахівця від Центру сертифікації
Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики**

Три кроки до сертифікату:

1. На сайті www.usndt.com.ua в розділі «Сертифікація→Форми» знайдіть, заповніть і надішліть на e-mail: usndt@ukr.net і acnk@ukr.net форми «Заявка на сертифікацію» та «Особова карта фахівця»;
2. Ми підготуємо проект договору про надання послуг з підготовки (за необхідності), атестації і сертифікації;
3. Після підписання договору з боку Замовника ми погодимо з Вами терміни підготовки, екзаменів, а також інші питання стосовно сертифікації.

м. Київ, вул. Казимира Малевича, 23 (корпус 6 ІЕЗ ім. Є.О. Патона)
м. Київ-38, 03038, а.с. 20 (для листування)
тел. (044) 205-22-49, 200-81-40; e-mail: usndt@ukr.net, acnk@ukr.net