

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені Інституту електроварювання ім. Є.О. Патона
НАН України, м. Київ:

Л.М. Лобанов (головний редактор),
О.С. Міленін, С.А. Недосека, В.В. Савицький,
В.О. Троїцький;

В.П. Бабак, Інститут загальної енергетики
НАН України, м. Київ;

Є. Барканов, Інститут високотехнологічних матеріалів
та конструкцій Ризького технічного університету, Латвія;

А. Дудек, Краківський науково-технічний університет
ім. С. Сташица, Краків (Польща); Університет Екс-
Марсель, Марсель (Франція)

В.С. Єременко, Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, НТУУ
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», Україна;

О.М. Карпаш, Харківський національний університет
повітряних сил ім. Івана Кожедуба, Івано-Франківськ,
Україна;

Й. Мірчев, Інститут механіки Болгарської академії наук,
м. Софія, Болгарія;

Г. Мук, Університет Отто фон Герике, м. Магдебург,
Німеччина;

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук, В.М. Учанін, Фізико-
механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,
Львів, Україна;

П.М. Райтер, Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу, Україна;

Г.М. Сучков, Національний університет «Харківський
політехнічний інститут», Україна;

М.Г. Чаусов, Національний університет біоресурсів і
природокористування України, м. Київ.

Журнал зареєстровано Національною радою України з
питань телебачення і радіомовлення 11.09.2025;
ідентифікатор друкованого/онлайн медіа
R30-06489/ R40-06486.

Засновник (реєстрант) — Інститут електроварювання
ім. Є.О. Патона НАН України.

ISSN 3041-2358 print, ISSN 3041-2366 online.
DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk>

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань для
публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями F6, F7, G5, G6, G7 кластеру
«Інформаційні технології та електроніка».
Рекомендовано до друку редакційною колегією
журналу.

Видавець

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»
03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевица, 11
Тел.: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/tdnk

За зміст рекламних матеріалів видавець
відповідальності не несе.

Індекс реклам

ТОВ «Ультракон Сервіс» - I стор. обкладинки;
ТОВ «НВФ Діагностичні прилади» - II стор.
обкладинки, сторінка A4;
ТОВ «Хімлаборреактив», розворот A3, вклейка A4,
III стор. обкладинки, IV стор. обкладинки.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

*Максимов С.Ю., Звірко О.І., Міленін О.С.,
Ниркова Л.І., Чудик І.І., Запужляк В.Б., Рудко В.В.*
Адаптивне управління цілісністю газотранспортної
системи України в контексті парадигми Індустрії 4.0/5.03

*Лобанов Л.М., Шкурат І.Л., Шуткевич О.П.,
Киянець І.В., Савицький В.В.* Автоматизоване
визначення дефектних ділянок багатошарової
тонкостінної конструкції з періодичною структурою
методами лазерної інтерферометрії.....28

*Момот А.С., Якотюк В.С., Лисенко Ю.Ю.,
Галаган Р.М., Мірчев Й.* Автоматизоване розпізна-
вання дефектів на зображеннях магнітопорошкового
контролю на основі моделі YOLO11.....38

Протасов А.Г., Стешенко Я.В. Нейромережева
ідентифікація об'єкта керування в системі автома-
тизованого процесу укладання асфальтобетонного
покриття48

ІНФОРМАЦІЯ

XIV Європейська конференція з неруйнівного контролю ...54

Новини Українського товариства неруйнівного
контролю та технічної діагностики57

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 NAS
of Ukraine, Kyiv:

L.M. Lobanov (Editor-in-Chief), O.S. Milenin,
S.A. Nedoseka, V.V. Savitsky, V.O. Troitskiy;

V.P. Babak, Institute of General Energy of National
Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv;

E. Barkanov, Institute of High-Performance Materials and
Structures of Riga Technical University, Latvia;

A. Dudek, AGH University of Science and Technology,
Krakow (Poland); Aix-Marseille University, Marseille
(France)

V.S. Eremenko, Yu.V. Kyts, A.G. Protasov, NTUU "Igor
Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

O.M. Karpash, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force
University, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Y. Mirchev, Institute of Mechanics of Bulgarian Academy of
Sciences, Sofia, Bulgaria;

G. Mook, Otto von Guericke University, Magdeburg,
Germany;

L.I. Muravsky, Z.T. Nazarchuk, V.M. Uchanin, Karpenko
Physico-Mechanical Institute of NASU, Lviv, Ukraine;

P.M. Raiter, Ivano-Frankivsk National Technical University
of Oil and Gas, Ukraine;

G.M. Suchkov, National University "Kharkiv Polytechnic
Institute", Ukraine;

M.G. Chausov, National University of Life and
Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

The Journal was registered by the National Council of
Ukraine on Television and Radio Broadcasting on
11.09.2025, carrier identifier print/online media R30-06489/
R40-06486.

Founder (registrant) — E.O. Paton Electric Welding
Institute of NAS of Ukraine.

ISSN 3041-2358 print, ISSN 3041-2366 online.
DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk>

The journal belongs to the "Information Technology and
Electronics" cluster and publishes articles in the following
fields: F6, F7, G5, G6, G7.

Recommended for publishing Editorial Board of the
Journal.

Publisher

"PATON PUBLISHING HOUSE" LLC;
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Street,
tel.: (38044) 205-23-90, E-mail: journal@paton.kiev.ua.

www.patonpublishinghouse.com/egn/journal/tdnk

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

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<i>Maksymov S.Yu., Zvirko O.I., Milenin O.S., Nyrkova L.I., Chudyk I.I., Zapukhliak V.B., Rudko V.V.</i> Adaptive integ- rity management of the ukrainian gas transmission system in the context of industry 4.0/5.0 Paradigm	3
<i>Lobanov L.M., Shkurat I.L., Shutkevych O.P., Kyianets I.V., Savitsky V.V.</i> Automated detection of defective areas of a multilayer thin-walled structure with periodic configuration by laser interferometry methods	28
<i>Momot A.S., Yakotyuk V.S., Lysenko Iu.Yu., Galagan R.M., Mirchev Y.</i> Automation of the defects detection process in magnetic particle inspection images	38
<i>Protasov A.G., Steshenko Y.V.</i> Neural network iden- tification of control object in the system of automated asphalt concrete laying process	48

INFORMATION

XIV ECNDT 2026.....	54
News of the Ukrainian society for non-destructive testing	57

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ЦІЛІСНІСТЮ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ПАРАДИГМИ ІНДУСТРІЇ 4.0/5.0

С.Ю. Максимов¹, О.І. Звірко², О.С. Міленін¹, Л.І. Ниркова¹, І.І. Чудик³, В.Б. Запихляк³, В.В. Рудко⁴

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5. E-mail: olha.zvirko@gmail.com

³Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.
E-mail: i.chudyk@nung.edu.ua

⁴АТ «Укртрансгаз». 01021, м. Київ, Кловський узвіз, 9/1.

У роботі розвинуто науково обґрунтовану концепцію адаптивного управління цілісністю газотранспортної системи України в умовах переходу до парадигми Індустрії 4.0/5.0 та ускладнення експлуатаційних факторів, включаючи воєнні впливи, декарбонізацію енергетичного сектору та перспективне транспортування газоводневих сумішей. Запропоновано системний підхід до аналізу життєвого циклу об'єктів газотранспортної системи, що інтегрує фізично обґрунтоване моделювання, імовірнісні методи оцінювання надійності та інноваційні технології відновлення технічного стану. Розглянуто багаторівневу архітектуру управління, яка охоплює системний рівень оптимізації режимів експлуатації, індивідуалізований аналіз дефектних ділянок на основі скінченно-елементного моделювання, методів Вейбулла та Монте-Карло, а також прогнозування деградаційних процесів як важливу частину предикативного обслуговування. Особливу увагу приділено адаптації ремонтних технологій до поточного технічного стану конструкцій із урахуванням корозійно-водневих механізмів руйнування та локальних напружено-деформованих станів. Бібліогр. 36, табл. 1, рис. 23.

Ключові слова: газотранспортна система, адаптивне управління цілісністю, Індустрія 4.0, Індустрія 5.0, предикативне обслуговування, скінченно-елементне моделювання, воднева деградація, корозійне розтріскування, ремонт

Вступ. Газотранспортна система (ГТС) України є одним із найбільших інфраструктурних комплексів Європи та виконує стратегічну функцію забезпечення енергетичної безпеки держави, підтримки стабільності енергетичних ринків і розвитку транскордонної енергетичної інтеграції. Водночас сучасні умови функціонування газотранспортної інфраструктури суттєво відрізняються від тих, для яких проектувалася переважна більшість магістральних газопроводів (МГ) та інших об'єктів. Зміна режимів транспортування природного газу, використання реверсних потоків, зростання ролі підземних сховищ газу як елементів балансування енергетичних систем, необхідність забезпечення стійкості до техногенних і воєнних впливів (рис. 1), а також перспективи транспортування сумішей природного газу та водню формують нові вимоги до надійності, довговічності та безпеки експлуатації об'єктів ГТС.

Традиційно забезпечення роботоздатності як МГ, так і ГТС у цілому базувалося на нормативно-регламентованій парадигмі управління технічним станом, що ґрунтується на детерміністичних проєктних припущеннях, стандартизованих коефіцієнтах запасу міцності, регламентованих ін-

тервалах технічного обслуговування та уніфікованих критеріях прийняття технічних рішень. Проте його фундаментальною особливістю є орієнтація на описання найнесприятливіших експлуатаційних сценаріїв і використання консервативних припущень для компенсації невизначеностей щодо фактичного технічного стану. Останніми роками стає дедалі очевиднішим, що можливості традиційної нормативної парадигми поступово вичерпуються. Старіння інфраструктури, зростання неоднорідності експлуатаційних умов, підвищення вимог до економічної ефективності та екологічної відповідальності, а також необхідність адаптації ГТС до нових вимог ставлять під сумнів доцільність використання виключно стандартизованих підходів до оцінювання технічного стану та технологічних заходів підтримки надійності. За таких умов головним обмеженням стає не відсутність нормативної бази, а недостатня здатність існуючих методів враховувати індивідуальні особливості деградації конкретних об'єктів і реальний рівень ризиків їхньої подальшої експлуатації.

Одночасно з цим відбувається суттєвий розвиток фундаментальних досліджень у галузях матеріалознавства, механіки руйнування, технологій діагностування та ремонту. Сучасні наукові результати демонструють, що процеси деградації трубних сталей визначаються складною вза-

© Максимов С.Ю., Звірко О.І., Міленін О.С., Ниркова Л.І., Чудик І.І., Запихляк В.Б., Рудко В.В., 2026.

Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



Рис. 1. Пошкоджені трубопроводи внаслідок воєнних дій

ємодією структурних, механічних, корозійних і водневих факторів, які розвиваються на різних масштабних рівнях – від мікроструктурного розвитку матеріалу до формування макроскопічних дефектів і зміни роботоздатності трубопровідної системи в цілому. Внаслідок цього управління цілісністю дедалі більше потребує інтеграції мультимасштабних уявлень про деградацію матеріалів із процесами прийняття інженерних рішень та управлінням життєвим циклом об'єктів критичної інфраструктури.

Додаткового значення ця проблема набуває в контексті енергетичного переходу та перспективного використання існуючих ГТС для транспортування сумішей природного газу та водню. На відміну від традиційних умов експлуатації, водень здатний суттєво впливати на механізми деформування та руйнування трубних сталей, змінювати характеристики тріщиностійкості, прискорювати розвиток пошкоджуваності та формувати нові джерела експлуатаційного ризику. За цих умов традиційні критерії оцінювання технічного стану, сформовані переважно для транспортування природного газу, потребують переосмислення на основі сучасних знань про фізичні механізми водневої деградації матеріалів.

Зазначені тенденції збігаються з глобальною трансформацією промислових систем у межах парадигм Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0. У контексті газотранспортної інфраструктури значення Індустрії 4.0 полягає не лише у впровадженні цифрових технологій, а, насамперед, у створенні можливостей для переходу від періодичного контролю до

безперервного моніторингу технічного стану, прогностичної аналітики та ризик-орієнтованих підходів до прийняття рішень. Водночас Індустрія 5.0 розширює цю концепцію шляхом інтеграції принципів людиноцентричності, стійкості та сталого розвитку. Для ГТС це означає перехід від управління окремими елементами до управління життєвим циклом інфраструктурних активів, від планово-передбачувального до адаптивного обслуговування за фактичним станом, від капіталомісткої заміни елементів до науково обґрунтованого продовження строку їхньої безпечної експлуатації, інноваційного відновлення роботоздатності, а також від автоматизації процесів до науково-обґрунтованої підтримки прийняття інженерних рішень.

Наразі інтеграція парадигм Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0 у виробничі системи нафтогазової галузі залишається несистемною та фрагментарною. У науковій літературі показано, що впровадження технологій Індустрії 4.0 у транспортування газу забезпечує суттєве підвищення ефективності та безпеки експлуатації, одночасно формуючи основу для більш сталого управління активами через моніторинг у режимі реального часу, прогностичну аналітику, цифрові двійники та підходи прозорості на основі блокчейн-технологій [1–4]. Водночас у низці оглядових досліджень підкреслюється, що перехід до Індустрії 5.0 перебуває на ранній стадії розвитку, а практичні впровадження суттєво відстають від концептуальних і теоретичних розробок [5], особливо у контексті повномасштабних людиноцентричних моделей та моделей циркулярної економіки. Залишаються невирішеними

системні бар'єри, зокрема високі економічні витрати впровадження (особливо для операторів поза глобальними корпораціями), обмежена сумісність із застарілою інфраструктурою, недостатній рівень цифрових компетенцій персоналу, зростаючі ризики кібербезпеки внаслідок розширення IoT-екосистеми та фрагментованість управління, що призводить до реалізації ізольованих пілотних проєктів замість цілісних трансформаційних стратегій [6–7]. Водночас у сучасних дослідженнях дедалі більше підкреслюється, що ефективність цифрової трансформації визначається не лише технологічними факторами, але й узгодженням цифрових ініціатив із довгостроковими бізнес- і сталими цілями розвитку [8–9]. Отже, перехід від суто технологічно орієнтованої парадигми до збалансованого підходу, що поєднує продуктивність із суспільними та екологічними пріоритетами, залишається ключовою, але ще недостатньо реалізованою складовою концепції Індустрії 5.0.

Таким чином, сучасні виклики зумовлюють необхідність формування нової парадигми управління цілісністю ГТС, яка поєднує досягнення фундаментального матеріалознавства, мультимасштабне моделювання процесів деградації, ризик-орієнтовані методи оцінювання роботоздатності, цифрові технології Індустрії 4.0 і принципи людиноцентричності, стійкості та сталого розвитку Індустрії 5.0. На відміну від традиційної нормативно-орієнтованої моделі, така парадигма передбачає науково-обґрунтоване та адаптивне управління цілісністю, у межах якої кожен інфраструктурний об'єкт розглядається як унікальна система з індивідуальною історією деградації, експлуатації та залишкового ресурсу. У контексті повоєнного відновлення України особливого значення набуває формування нових науково обґрунтованих парадигм управління критичною інфраструктурою, орієнтованих не на просте відтворення довоєнного стану, а на якісну трансформацію принципів її проєктування, експлуатації й технічного обслуговування. Відновлення ГТС у таких умовах має розглядатися як можливість переходу до принципово нового рівня технологічної зрілості, що базується на інтеграції цифрових технологій, ризик-орієнтованого управління цілісністю та сучасного фундаментального матеріалознавства. Це передбачає відмову від відновлення інфраструктури за принципом «як було» на користь створення адаптивної, стійкої та інтелектуально керованої системи, здатної функціонувати в умовах підвищеної невизначеності, змінних режимів навантаження та нових енергетичних сценаріїв, включаючи транспортування водневмісних

сумішей. За такою логікою повоєнна реконструкція набуває характеру довгострокової науково-технологічної модернізації, де ключовим критерієм ефективності стає не лише відновлення пропускної здатності, а й підвищення рівня безпеки, ресурсу та екологічної стійкості інфраструктури на основі принципів Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0.

Метою роботи є узагальнення доробку авторського колективу та розвиток науково обґрунтованої концепції адаптивного управління цілісністю ГТС України в умовах переходу до парадигми Індустрії 4.0/5.0, що охоплює змінні експлуатаційні та екстремальні впливи (зокрема воєнного характеру), процеси декарбонізації енергетики та перспективне транспортування газоводневих сумішей, на основі інтеграції фізично обґрунтованого моделювання, імовірнісних методів аналізу та інноваційних технологій ремонту.

Системне управління ГТС як основа науково обґрунтованого прийняття рішень і підвищення адаптивності. Одним із фундаментальних принципів парадигми Індустрії 4.0/5.0 є адаптивність складних технічних систем, яка передбачає їхню здатність безперервно змінювати режими функціонування відповідно до поточного технічного стану, зовнішніх впливів і прогнозованих сценаріїв розвитку. Для критичної енергетичної інфраструктури це означає перехід від жорстко регламентованих режимів експлуатації до науково обґрунтованого управління, заснованого на інтеграції фізичного моделювання, цифрових технологій, прогнозування технічного стану та ризик-орієнтованого аналізу. В умовах воєнних викликів саме адаптивність стає визначальною характеристикою ГТС України, забезпечуючи її здатність підтримувати роботоздатність за умов суттєвої зміни структури потоків газу, пошкодження окремих елементів інфраструктури, зміни режимів експлуатації.

Таким чином, інтенсивні воєнні дії стали каталізатором докорінної зміни принципів функціонування української ГТС. Припинення транзиту природного газу до країн Європейського Союзу, перехід до реверсних режимів транспортування, нерівномірне завантаження МГ, зміна режимів роботи компресорних станцій та суттєве зростання ролі підземних сховищ газу сформували нові вимоги до управління системою. За таких умов традиційний підхід, у межах якого окремі трубопроводи, компресорні станції чи підземні сховища розглядаються як незалежні об'єкти, вже не забезпечує необхідної ефективності та стійкості. ГТС доцільно розглядати як єдиний багаторівневий

технічний комплекс, що об'єднує МГ, компресорні станції, підземні сховища газу, свердловини, системи автоматизації та технічної діагностики в інтегровану мережу взаємопов'язаних елементів. Зміна режиму роботи будь-якої складової неминуче впливає на розподіл потоків газу, рівні тиску, циклічність навантаження обладнання, напружено-деформований стан (НДС) конструкцій та темпи накопичення експлуатаційної пошкодженості. Саме тому об'єктом оптимізації повинні бути не окремі споруди, а газотранспортна система загалом.

Науково обґрунтоване системне управління набуває особливої актуальності в умовах можливого пошкодження окремих елементів інфраструктури. Втрата окремих компресорних станцій, зміна режиму роботи підземних сховищ газу чи локальне пошкодження МГ повинні розглядатися не як ізолювані аварійні ситуації, а як один із можливих сценаріїв функціонування системи. Це потребує використання адаптивних алгоритмів управління, здатних у реальному часі прогнозувати наслідки зміни конфігурації мережі, визначати оптимальні режими транспортування газу та мінімізувати технічні й експлуатаційні ризики.

Так, пропускна здатність ГТС є важливим показником ефективності її роботи та визначається взаємодією лінійних ділянок і компресорних станцій як єдиної мережі послідовно та паралельно з'єднаних елементів. Вона залежить від параметрів кожної ділянки та режимів транспортування, причому навіть для простого однопоточного газопроводу її визначення є ітераційною задачею через залежність гідравлічного опору, температури та стисливості від витрати. Для складних багатокомпонентних систем задача суттєво ускладнюється необхідністю узгодження характеристик усіх елементів і визначення єдиної робочої точки системи. У системному підході це реалізується через суміщення характеристик лінійної частини та компресорних станцій із подальшим уточненням параметрів із урахуванням реальних режимів роботи. Для спрощення розрахунків багатопоточної системи часто зводяться до еквівалентного однопоточного газопроводу методом еквівалентного діаметра з подальшим ітераційним уточненням характеристик ГТС довільної конфігурації. Пропускна здатність еквівалентного газопроводу визначається на основі основного рівняння газопроводів, записаного для зони жорстких труб турбулентного режиму [10]:

$$Q = 1,64 \cdot 10^{-6} d_b^{2,6} \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\Delta z T_{cp} L}}, \quad (1)$$

де P_H, P_K – тиск на початку та в кінці ділянки з довжиною L ; T_{cp}, z – середня температура та коефіцієнт стисливості, d_b – внутрішній діаметр газопроводу.

У подальшому здійснюється розподіл витрати газу між паралельними нитками системи з урахуванням їхніх діаметрів і коефіцієнтів гідравлічного опору, які для кожної нитки залежать від витрати. Ітераційний процес побудований на основі загального основного рівняння газопроводів і класичних залежностей параметрів:

$$Q = 0,326 \cdot 10^{-6} d_i^{2,5} \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda_i \Delta z T_{cp} L}} \\ \lambda_i = 0,067 \left(\frac{158}{Re_i} + \frac{2K_i}{d_i} \right)^{0,2} \\ Re_i = 1,81 \cdot 10^3 \frac{Q_{\Delta}}{d_i \eta} \quad (2)$$

де λ_i – коефіцієнт гідравлічного опору i -го газопроводу; Re – число Рейнольдса; η – коефіцієнт динамічної в'язкості.

У результаті характеристика лінійної ділянки складної ГТС на основі (2) може бути представлена рівнянням:

$$P_{H_j} - P_{K_j} = c_j Q^2 \quad (3)$$

де $c_j = \frac{\lambda_j \Delta z T_j L_j}{(0,326 \cdot 10^{-6} d_j^{2,5})^2}$; j – номер ділянки.

На основі характеристик компресорних станцій і лінійних ділянок складної ГТС розроблено математичну модель квазістаціонарного режиму, яка дозволяє визначати пропускну здатність системи та параметри її експлуатації. Показано, що регулювання продуктивності ГТС може здійснюватися шляхом виведення з роботи окремих компресорних станцій (КС), а також встановлено кількісний вплив їхніх параметрів на загальний режим функціонування системи. Запропонована модель може бути використана для прогнозування роботи ГТС у взаємодії з підземними сховищами газу.

В умовах неповного завантаження ГТС її фактична продуктивність може бути суттєво нижчою за пропускну здатність, що зумовлює задачу оптимального регулювання режимів роботи за критерієм мінімізації енерговитрат. Одним із механізмів такого регулювання є поетапне відключення окремих компресорних станцій. У разі відключення КС- j у стаціонарному режимі тиски на вході та виході станції вирівнюються. Це дозволяє визначати пропускну здатність системи при різних конфігураціях її роботи; при цьому відключення КС-1 фактично призводить до зупинки системи через недопустиме зниження тиску на вході КС-2 [11].

Як приклад виконано розрахунки для газопроводу «Союз» на ділянці в межах України за умови закриття міжниткових перемичок із трансукраїнською ГТС. Встановлено, що його пропускна здатність за максимальної гідравлічної ефективності та паспортних характеристик газоперекачувальних агрегатів (ГПА) на ділянці Новопсков–Хуст становить 92,219 млн м³/добу. Подальший аналіз відключення компресорних станцій (від КС-12 «Борова» до КС-22 «Хуст») показав нерівномірний вплив на зниження пропускної здатності: відключення КС «Борова» (№ 2) зменшує її на 14,2 %, КС «Першотравнева» (№ 3) – на 9,7 %, КС «Маківка» (№ 4) – на 7,2 %, тоді як для КС «Бар» (№ 10), «Гусятин», «Богородчани» та «Хуст» зниження становить 2,5...2,2 % (рис. 2). Це свідчить, що вплив відключення компресорних станцій зменшується зі збільшенням їхнього порядкового номера в системі, що підтверджує можливість керованого регулювання режимів роботи ГТС шляхом вибіркового виведення КС із експлуатації [11].

Додатково досліджено вплив зміни швидкості обертання роторів нагнітачів на КС-1 «Новопсков», КС-2 «Борова» і КС-3 «Першотравнева». Встановлено, що зниження відносної швидкості обертання в діапазоні 1,0...0,8 призводить до зменшення пропускної здатності системи на 7,2; 6,4 та 5,6 % відповідно (рис. 3). Отримані результати свідчать, що ефективність такого способу регулювання є вищою для КС, розташованих ближче до початку системи [11].

Зниження енерговитрат на транспортування природного газу може бути досягнуте шляхом раціонального використання підземних сховищ газу (ПСГ), які виконують функції як проміжних джерел, так і споживачів у ГТС.

Оптимізація режимів роботи МГ містить визначення пропускної здатності, розрахунок раціональних режимів при заданій продуктивності та формування стратегій розвитку системи. Вона

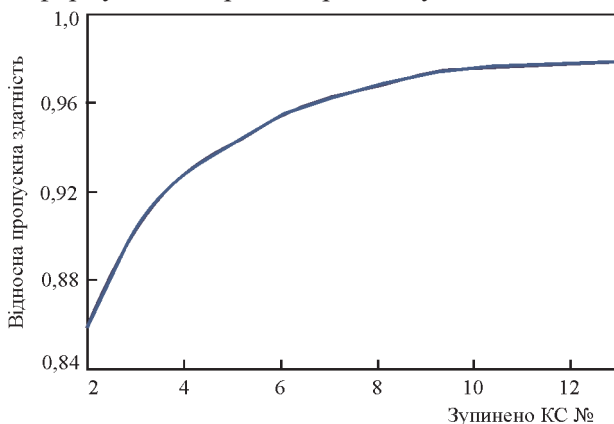


Рис. 2. Вплив відключення КС на пропускну здатність системи

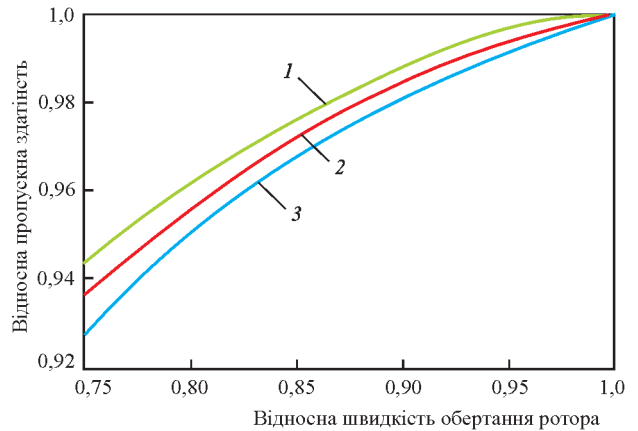


Рис. 3. Регулювання продуктивності системи шляхом зміни швидкості обертання ротора нагнітача: 1 – КС-3, 2 – КС-2, 3 – КС-1

базується на поєднанні проєктних даних, експлуатаційної статистики та прогнозних оцінок і реалізується через змішані математичні моделі, що поєднують методи динамічного програмування та теорії надійності. Це дає змогу визначати оптимальні режими роботи КС, склад газоперекачувальних агрегатів і розподіл навантаження з мінімізацією витрат на перекачування.

Математичне описання процесів транспортування газу ґрунтується на стаціонарних і нестаціонарних моделях. Стаціонарні моделі встановлюють зв'язки між параметрами елементів системи, тоді як нестаціонарні, засновані на диференціальних рівняннях у частинних похідних, описують динаміку зміни тисків і витрат у часі. Їхня побудова базується на рівняннях збереження маси, енергії та імпульсу з подальшою ідентифікацією параметрів за експериментальними даними.

Повна математична модель містить залежності для КС і лінійних ділянок:

– для КС

$$F_1(P_{Bi}, P_{Hi}, Q_i, R_i, n_i, N_i) = 0$$

– для лінійних ділянок

$$F_2(P_{Hi}, P_{Bi+1}, Q_i) = 0$$

де P_{Hi} , P_{Bi} – тиски на вході та виході i -ї КС, продуктивність якої Q_i ; R_i – кількість ГПА на i -й КС, працюючих з обертами ротора n_i , загальною потужністю N_i .

Критерієм оптимальності є мінімізація енерговитрат при забезпеченні заданого рівня надійності газопостачання. Задача оптимального керування формулюється як дискретне динамічне програмування з розбиттям добового циклу на інтервали, для кожного з яких визначається оптимальна конфігурація роботи ГПА. Мінімізація сумарних витрат здійснюється за принципом Беллмана з урахуванням витрат на переходи між станами системи. Побудована модель

інтегрує енергетичні витрати та втрати від ненадійності постачання, а її точність визначається якістю статистичних даних. Порівняння розрахункових і фактичних режимів експлуатації ГПА показує задовільну збіжність результатів, що підтверджує практичну придатність підходу для прогнозування та оптимізації режимів роботи ГТС [12].

Індивідуалізований аналіз технічного стану елементів ГТС на основі скінченно-елементного та ймовірного підходів. Перехід від системного управління ГТС до реалізації адаптивних стратегій її функціонування неминуче вимагає переходу до індивідуалізованого аналізу технічного стану її елементів. У цьому контексті важливо підкреслити, що індивідуалізація прийняття рішень є невід'ємною складовою парадигми Індустрії 5.0, яка доповнює принципи Індустрії 4.0 переходом від суто цифрової та автоматизованої оптимізації до людиноцентричного, контекстно-залежного та фізично обґрунтованого управління складними технічними системами. Для критичної інфраструктури це означає необхідність урахування унікальних умов кожного елемента системи, його фактичного технічного стану, історії навантаження та деградаційних процесів при формуванні управлінських рішень. На рівні ГТС це призводить до принципового висновку: глобальна адаптивність і стійкість ГТС визначається сукупністю локальних станів її конструктивних елементів. Саме в зонах геометричних аномалій, зварних з'єднань, корозійних уражень та експлуатаційної деградації формуються умови, які визначають граничний стан трубопроводів. Тому ефективне управління цілісністю системи можливе лише за умови індивідуалізованого аналізу кожного критичного елемента з урахуванням реальних умов його експлуатації.

У реальних інженерних умовах дефекти мають складну просторову геометрію, а їхній вплив на несучу здатність конструкцій є суттєво нелінійним та локалізованим. Додаткову складність створює стохастичний характер механічних властивостей матеріалів, зумовлений мікроструктурною неоднорідністю, технологічною спадковістю (зокрема монтажним зварюванням) та експлуатаційною деградацією, включаючи корозійно-водневі процеси. Це ускладнює адекватне оцінювання граничних станів у межах виключно детерміністичних або нормативно усереднених моделей. У зв'язку з цим формується необхідність інтегрованого підходу, у якому скінченно-елементне моделювання (СЕМ) використовується як базовий інструмент відтворення локального напружено-деформованого та пошкодженого станів у зонах дефектів складної ге-

ометрії, у тому числі, в околі монтажних чи ремонтних зварних з'єднань. СЕМ дозволяє врахувати реальні умови навантаження, просторову концентрацію напружень і взаємодію конструктивних елементів, що є важливим для коректного опису механіки руйнування в експлуатованих трубопроводах.

Першим етапом чисельного дослідження технічного стану трубопровідного елемента (ТЕ) є прогнозування розвитку температурного поля в процесі зварювального нагрівання. Розподіл температур у часі та просторі визначається процесами кондуктивного поширення, для яких зв'язок між моментом часу τ і полем температур $T = T(r, \beta, z)$ (рис. 4) описується тривимірним рівнянням теплопровідності. Джерелом тепла в розглянутому випадку є зварювальна дуга (або інше концентроване джерело теплової енергії) з потужністю q_f . Розподіл енергії в плямі нагрівання для характерних технологій зварювання може бути описаний за допомогою нормального закону розподілу. Стік тепла з поверхні розглянутої конструкції відбувається променистим теплообміном, відведенням тепла в навколишню атмосферу та оснащення. Відповідно потік енергії з поверхні виробу через випромінювання та конвекцію в атмосферу залежить від температури поверхні та навколишнього середовища та кількісно описується законами Стефана-Больцмана та Ньютона-Ріхмана відповідно [13].

Докритичне руйнування трубопроводів і посудин тиску з характерних сталей пов'язане з пластичним деформуванням металу конструкції, тому в якості критеріїв зародження руйнування доцільно розглядати деформаційні підходи. За відсутності гострих геометричних концентраторів напружень (зокрема для бездефектного стану ТЕ або в разі наявності локальних втрат металу) переважаючим механізмом порушення цілісності матеріалу є в'язке руйнування, яке полягає в зародженні рівномірно розподілених пор. Для прогнозування їхнього зародження при пластичному плинні матеріалу в неізо-термічних випадках пропонується до використання модифікований критерій Джонсона-Кука, згідно з яким у деякому об'ємі металу з'являється початкова пористість із концентрацією f_0 при перевищенні інтегрального значення інтенсивності пластичної деформації певного граничного рівня [14].

Математичний розгляд об'єднаної задачі кінетики температурного поля, розвитку НДС і формування мікропор базується на скінченно-елементному описанні. Приріст тензора деформацій (з урахуванням наявності та рівномірного розподілу мікропор) може бути представлено у відповідності з наступним виразом [15]:

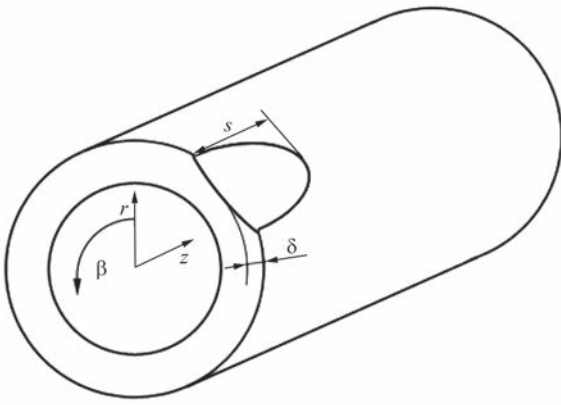


Рис. 4. Схема трубопроводного елемента з локальним дефектом втрати металу на зовнішній поверхні

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} (d\varepsilon_T + df/3), \quad (4)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e$, $d\varepsilon_{ij}^p$, $\delta_{ij}d\varepsilon_T$, $\delta_{ij}df/3$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності, кінетикою неоднорідного температурного поля та пористістю відповідно.

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

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi), \quad (5)$$

де σ – середнє значення нормальних компонентів тензора напружень σ_{ij} , тобто $\sigma = (\sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz} + \sigma_{rr})/3$, $K = (1-2\nu)/E$ – модуль об'ємного стиску.

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

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\Lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma). \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} d\Lambda &= 0, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s, \\ d\Lambda &> 0, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \end{aligned} \quad (7)$$

стан $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимий.

Виходячи зі сказаного вище, природи тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції приросту відповідних складових:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} &= \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma + \Delta\varepsilon_T + \Delta f/3) - \\ &- \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (8)$$

де символ «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування, Ψ – функція стану матеріалу, що визначає умову пластичного плину відповідно до критерію Мізеса з додатковим урахуванням зменшення несучого нетто-перерізу СЕ в результаті формування несущільності в рамках ГТН-моделі [16]:

$$\Psi = \frac{1}{2G},$$

$$\text{якщо } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \sqrt{1 + (q_3 f')^2 - 2q_1 f' \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right)}, \quad (9)$$

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s,$$

стан $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимий.

Критерієм зародження макродфектності матеріалу ТЕ є формування умов пластичної нестійкості пористого матеріалу з урахуванням його обмеженої деформаційної здатності згідно з умовою Маккензі, що математично виражається в такий спосіб [17]:

$$\Psi > \frac{1}{2G} + \frac{\varepsilon_f - \varepsilon^p}{1,5\sigma_i(T, \varepsilon^p)(1 - 2f/3)}, \quad (10)$$

де ε_f – гранична деформація металу, яка, у загальному випадку, залежить від жорсткості напруженого стану.

Крім того, значний розвиток пористості матеріалу за в'язким механізмом викликає істотне збільшення істинних напружень у металі конструкції та, як результат, його руйнування. Тому з метою формулювання коректного та зручного для чисельного аналізу критерію руйнування конструкції до (10) може бути додана наступна умова:

$$\sigma_s \rightarrow 0. \quad (11)$$

З (9) можна оцінити величину критичної об'ємної концентрації пористості, яка еквівалентна граничному переходу (11) і обмежує використання запропонованих моделей умовою неприпустимої дефектності:

$$f' \rightarrow f'_d = \frac{q_1 \cosh\left(\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_T}\right) - \sqrt{q_1^2 \cosh^2\left(\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_T}\right) - q_3^2}}{q_3^2}. \quad (12)$$

У випадку невисокої жорсткості напруженого стану зростання локальних напружень може не супроводжуватися значним пластичним плином, і зародження макроскопічного руйнування буде відбуватися за крихким механізмом мікрорідилоу. Тому додатковою умовою руйнування пористого матеріалу є перевищення інтенсивності істинних напружень величини напружень мікрорідилоу S_K :

$$\frac{\sigma_1}{1 - 2f/3} \geq S_K. \quad (13)$$

Таким чином, умови (10), (12) і (13) формують комплексний критерій крихко-в'язкого руйнування матеріалу з урахуванням зміни його границі текучості в процесі пластичного деформування і докритичного пошкодження.

Разом із тим, детерміністичний результат СЕМ-аналізу не може бути достатнім для оцінювання фактичної надійності, оскільки процес руйнування має ймовірнісну природу. Тому наступним рівнем моделювання є застосування статистичних моделей, зокрема розподілу Вейбулла, який дозволяє описати розкид характеристик міцності, критичних деформацій і параметрів ініціювання руйнування. Це забезпечує фізично обґрунтоване врахування мікроструктурної невизначеності матеріалу та статистичного характеру зародження пошкодження. Рациональним є опис стану конструкцій на основі статистичної інтерпретації НДС, отриманого СЕМ. Для трубопроводів і посудин тиску за відсутності гострих концентраторів ймовірність руйнування може бути визначена через інтегрування поля головних напружень по характерній площі найбільш слабого перерізу S і дозволяє оцінити інтегральну ймовірність руйнування конструкції [18]:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\sigma_1 - A_\sigma}{B_\sigma} \right)^{\eta_\sigma} \frac{dS}{S_0} \right], (\sigma_1 > A_\sigma) \quad (14)$$

де S_0 – константа матеріалу, що вирізняє просторовий масштаб переходу мікропошкодження в макродефект.

Точність ймовірнісної оцінки згідно з (14) визначається адекватністю параметрів розподілу Вейбулла для конкретної задачі. Для спрощення аналізу вводиться припущення, що ймовірнісний характер руйнування проявляється при напруженнях, які перевищують напруження пластичного плину σ_{flow} , що визначається як $\sigma_{flow} = (\sigma_B + \sigma_T)/2$. Параметр η_σ для конструкційних матеріалів у більшості випадків приймається в межах 3...4. Показано, що вплив геометрії ізольованих дефектів на коефіцієнти моделі є незначним у широкому діапазоні варіювання та переважно визначається особливостями скінченно-елементного розбиття. Внаслідок цього коефіцієнт B_σ може розглядатися як властивість матеріалу для заданого напруженого стану та масштабного рівня задачі.

Альтернативний підхід до оцінювання ймовірності руйнування зварних елементів і посудин тиску без гострих концентраторів у режимі інтенсивної пластичної деформації базується на інтегруванні поля інтенсивності пластичних деформацій, тобто [18]:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\varepsilon_i - A_\varepsilon}{B_\varepsilon} \right)^{\eta_\varepsilon} \frac{dS}{S_0} \right], \quad (15)$$

де A_ε , B_ε , η_ε – параметри Вейбулла.

Передбачається, що для конструкційних матеріалів ненульова ймовірність руйнування виникає на початку макроскопічного пластичного деформування, тобто $A_\varepsilon \approx 0,887\sigma_T/E$, що є незначним у порівнянні з інтенсивністю пластичної деформації при граничному стані. Параметр η_ε для описання схильності до руйнування приймається в межах 3...4, що відповідає $\eta_\sigma \approx 5$. Відповідно основною задачею аналізу полів деформацій у дефектній трубі під граничним тиском є визначення параметрів B_ε розподілу Вейбулла (15) з урахуванням властивостей матеріалу.

Практичний інтерес становить порівняння результатів чисельного моделювання з нормативними підходами оцінювання граничного стану кородованих трубопроводів. Зокрема стандарт DNV-RP-F101 (1999) встановлює критеріальні залежності між геометрією корозійно-ерозійних дефектів і граничним тиском, тоді як в Україні застосовується ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008, що базується на оцінюванні залишкового коефіцієнта запасу міцності з урахуванням паспортних і експлуатаційних даних.

Порівняльний аналіз для трубопроводу ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь Х65) з локальним корозійним дефектом ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) показує, що крива $P_{0,002}$ (ймовірність руйнування $p = 0,002$) добре узгоджується з граничними залежностями DNV-RP-F101, тоді як крива P_{max} має суттєво іншу форму та рівні тиску (рис. 5). Водночас, згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008, крива $P_{0,002}$ адекватно описує стан трубопроводу при незначних дефектах стоншення. Для дефектів середньої та критичної категорії відповідні стани лежать у діапазоні між $P_{0,002}$ та P_{max} , що фактично відповідає різним рівням ймовірності руйнування та ступеню консервативності нормативних вимог. Виявлено суттєві розбіжності між чисельною методикою та ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 при глибинах дефектів понад 0,5 від товщини стінки трубопроводу. Це пояснюється тим, що нормативні підходи враховують перехід від в'язкого до крихкого руйнування через критерії інтенсивності напружень, що призводить до підвищеної консервативності оцінок. Порівняння з DNV-RP-F101 показує, що вплив крихкого механізму в ряді випадків може бути переоціненим навіть при високій концентрації напружень. Таким чином, застосовність запропонованої чисельної методики доцільно обмежити дефектами з глибиною до 0,5 від товщини стінки

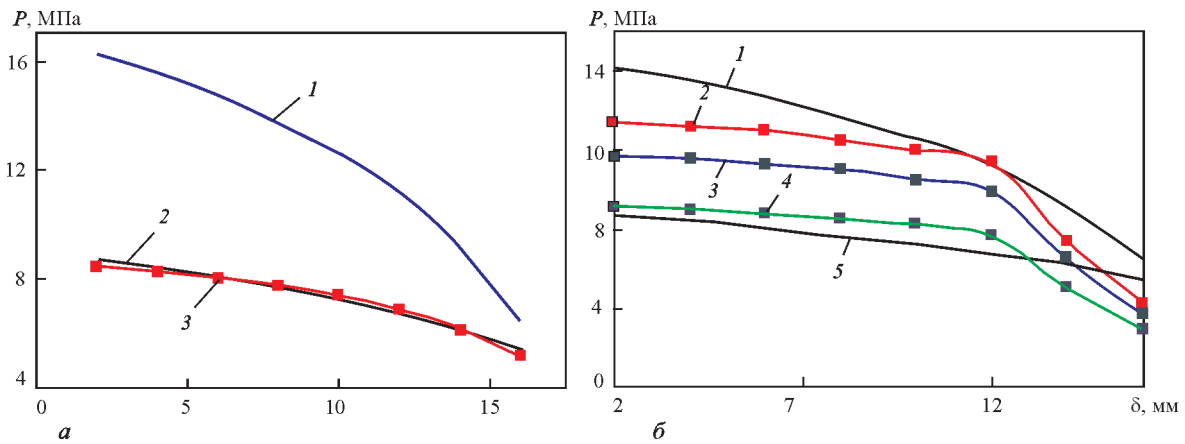


Рис. 5. Порівняння результатів імовірнісного аналізу стану елемента магістрального трубопроводу ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь Х65) з ізолюванням дефектом корозійної втрати металу різної глибини a ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) з вимогами актуальних стандартів: а – DNV-RP-F101, 1 – $P_{\max}$, 2 – $P_{0,002}$, 3 – P_{DNV} ; б – ДСТУ-Н В В.2.3-21: 2008, 1 – $P_{\max}$, 2 – критичний, 3 – значний, 4 – помірний, 5 – $P_{0,002}$

при довжині не менше ніж у п'ять разів більшій за глибину. На основі цього підходу можуть бути побудовані еквіімовірнісні діаграми залежності граничного тиску від геометрії корозійно-ерозійних дефектів (рис. 6).

Подальше узагальнення реалізується через метод Монте-Карло, який забезпечує відтворення множини можливих реалізацій властивостей матеріалу, геометрії дефектів та умов навантаження. У результаті визначається не одичне значення граничного стану, а повний розподіл імовірності руйнування, що є основою для ризик-орієнтованого та індивідуалізованого прийняття рішень. Ймовірність руйнування p визначається як частота досягнення граничного стану в репрезентативній вибірці реалізацій. Поширеним підходом до врахування стохастичних властивостей матеріалів і навантажень є використання розподілу Вейбулла. Вибір значення випадкової величини X для СЕ на кожному кроці чисельного моделювання здійснюється відповідно до заданого закону розподілу (Вейбулла), що забезпечує формування статистич-

но узгоджених реалізацій параметрів системи в межах методу Монте-Карло:

$$X_{ijk} = \left[-\ln(1 - RND) \right]^{\frac{1}{\eta_x}} (B_x - A_x) + A_x, \quad (i, j, k = r, \beta, z), \quad (16)$$

де A_x, B_x, η_x – коефіцієнти Вейбулла для характеристики X ; RND – довільне число з діапазону $[0; 1]$.

Як приклад застосування розробленого чисельного підходу розглянуто сталевий ТЕ ($D = 1420$ мм, $t = 20$ мм) з ізолюванням дефектом локального стоншення напівеліптичної форми на зовнішній поверхні труби ($2s = 20$ мм, $2c = 20$ мм, $a = 20$ мм). Матеріал – сталь 17Г1С-У ($E = 206$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 365 \dots 490$ МПа, $S_K = 800 \dots 1000$ МПа). Як зазначалося вище, критерій зародження пор в'язкого руйнування базується на деформаційному підході, за яким ініціювання пошкодження відбувається при перевищенні інтегральною інтенсивністю пластичних деформацій критичного значення ϵ_c , що відповідає появі рівномірно розподіленої несучільності з початковою концентрацією $f_0 = 0,001 \dots 0,010$. У межах

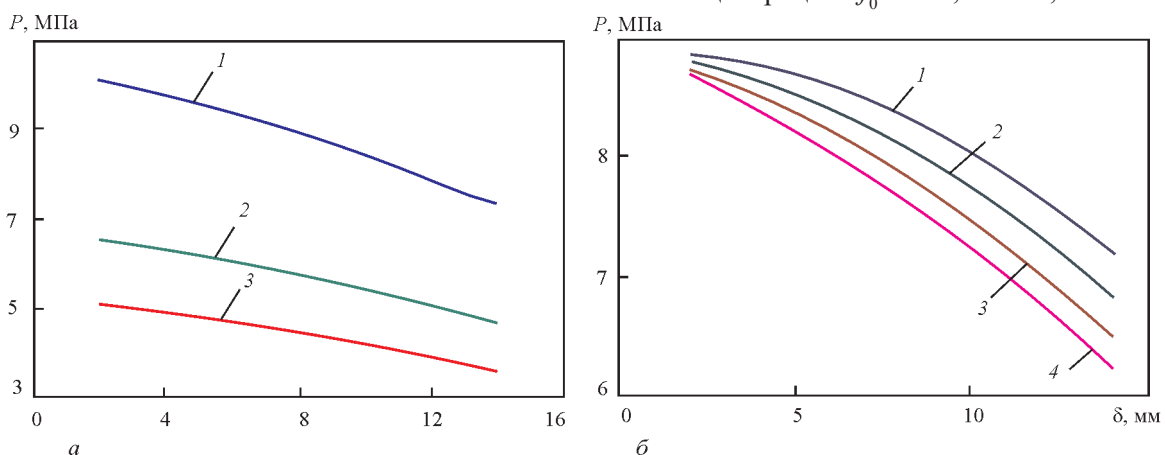


Рис. 6. Еквіімовірнісні криві допустимості дефекту локального стоншення стінки ТЕ ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У): а – у залежності від критичної величини ймовірності руйнування ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм), 1 – $p = 0,03$, 2 – $p = 0,01$, 3 – $p = 0,005$; б – у залежності від довжини дефекту стоншення ($p = 0,01$, $2u = 50$ мм), 1 – $2s = 25$ мм, 2 – $2s = 50$ мм, 3 – $2s = 75$ мм, 4 – $2s = 100$ мм

прийнятих діапазонів параметрів вхідні характеристики матеріалу описуються розподілом Вейбулла: для σ_T ($A_\sigma = 365$, $B_\sigma = 450$, $\eta_\sigma = 4$), для f_0 ($A_f = 0,001$, $B_f = 0,0052$, $\eta_f = 2$), для S_K ($A_S = 800$, $B_S = 937$, $\eta_S = 4$).

Порівняння детерміністичного та стохастичного підходів до оцінювання НДС показує, що максимальні значення напружень у дефекті є близькими, однак стохастична модель (Монте-Карло) формує значно вищі локальні градієнти напружень через просторову варіацію механічних властивостей, насамперед границі текучості (рис. 7). Оскільки в'язке руйнування має локалізований характер, урахування просторової невизначеності суттєво впливає на оцінку граничного тиску P_r , зменшуючи розбіжність між прогнозом і реальним станом конструкції. Таким чином, поєднання СЕМ, статистики Вейбулла та методу Монте-Карло забезпечує перехід від нормативно усереднених підходів до індивідуалізованого, фізично обґрунтованого та ризик-орієнтованого аналізу елементів газотранспортної системи. У межах парадигми Індустрії 5.0 саме така індивідуалізація прийняття рішень стає важливим принципом управління критичною інфраструктурою.

Часовий вимір управління цілісністю: предиктивне обслуговування та прогнозування стану ГТС. У рамках парадигми Індустрії 4.0/5.0, де адаптивність, дані в реальному часі та інтелектуальна підтримка рішень розглядаються як базові системоутворюючі принципи, часовий вимір управління цілісністю ГТС набуває визначального значення.

Сучасні підходи до предиктивного обслуговування ґрунтуються на інтеграції фізично обґрунтованих моделей деградації матеріалів, результатів неруйнівного контролю, даних експлуатаційного моніторингу. У контексті МГ це означає перехід до моделі безперервного оновлення оцінок залишкового ресурсу, де кожне нове вимірювання змінює картину розвитку пошкодженості. Водночас у логіці Індустрії 5.0 предиктивне обслуговування набуває додаткового виміру – індивідуалізації прийняття рішень. Це означає, що прогнозуван-

ня стану елементів ГТС не зводиться до усереднених моделей, а враховує унікальні особливості кожного об'єкта: історію експлуатації, локальні умови навантаження, просторову неоднорідність властивостей матеріалу, результати діагностики конкретних дефектів, а також критичність елемента в структурі системи. Таким чином, формується концепція персоналізованого інженерного об'єкта, для якого стратегія обслуговування визначається не загальними регламентами, а індивідуальною траєкторією деградації, для чого було розвинено відповідні аналітичні та інструментальні підходи.

Відомо, що під час тривалої експлуатації підземних МГ можливий розвиток різних видів пошкоджень з боку зовнішнього середовища, зокрема: відшарування захисних покривів, утворення дефектів у стінці труби, у тому числі корозійних. Найнебезпечнішим явищем, яке важко прогнозувати та попереджати, є корозійне розтріскування (КР). За результатами аналізу статистичних даних різних фахівців частка відмов магістральних трубопроводів, спричинених КР, є досить вагомою та становить 24...36 %. Враховуючи небезпеку та масштабність КР, розглянута проблема залишається актуальною, а вивчення механізму процесів, що спричиняють його розвиток, має наукове та практичне значення. Важливість детальнішого вивчення КР МГ обумовлює актуальність проведення фундаментальних досліджень і пошук нових підходів до визначення ймовірності його розвитку.

Для дослідження закономірностей процесу КР МГ розроблено та застосовано унікальний науковий підхід, який ґрунтується на моделюванні в лабораторних умовах, тотожних умовам експлуатації, чинників КР. Цей підхід базується на новій методології оцінювання схильності трубних сталей до КР в умовах моделювання комплексу зовнішніх і внутрішніх чинників, для чого запропоновано використовувати коефіцієнт K_S , який враховує зміну пластичних властивостей металу в корозивному середовищі у порівнянні з його властивостями у повітрі [19]:

$$K_S = \frac{\Psi_{II}}{\Psi_P} = \left(\frac{s_0 - s_1^{II}}{s_0} \right) / \left(\frac{s_0 - s_1^P}{s_0} \right) \quad (17)$$

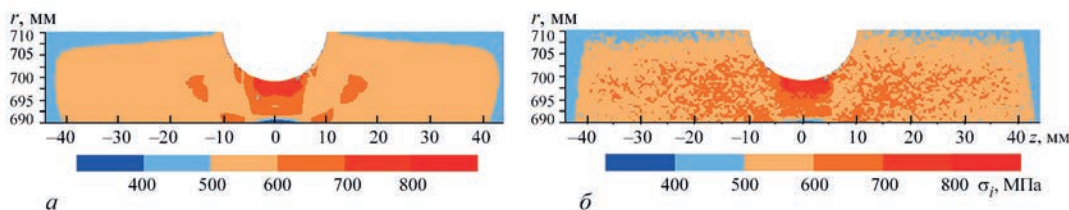


Рис. 7. Приклади розподілу еквівалентних напружень у трубопроводі ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) із зовнішнім корозійним дефектом ($2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$ мм) при граничному внутрішньому тиску 14,0 МПа: а – скінченно-елементний розрахунок, б – розрахунок згідно з алгоритмом Монте-Карло

де ψ_{Π} і ψ_p – відносне звуження зразків у повітрі та у розчині; S_0 – площа поперечного перерізу зразків до випробувань, мм²; S_1^{Π} та S_1^p – площа поперечного перерізу зразків у місті руйнування після випробувань у повітрі та у розчині, мм².

Зміна механічних властивостей в умовах комплексного впливу чинників КР може бути оцінена за коефіцієнтами втрати властивостей F_x (відносного подовження при розриві F_{δ} , границі міцності F_{σ_b} та границі текучості F_{σ_T}) відносно аналогічних показників у повітрі:

$$F_x = \frac{F^{\Pi} - F^p}{F^{\Pi}} 100 \% \quad (18)$$

де F^p та F^{Π} – середні значення показників у розчині та у повітрі.

Для кількісної оцінки схильності трубних сталей до КР було проведено низку лабораторних досліджень, в умовах яких було виконано фізичне моделювання чинників КР, які можуть бути присутніми на ділянці МГ (корозивне середовище – модельний ґрунтовий електроліт, розчин NS4 (neutral soil solution), а саме: захисний потенціал, накопичені цикли змін напруження, концентратор напружень, періодичне змочування розчином, наявність полімерних покривів різних типів) [20]. Випробування зразків зі сталі Х70 методом деформації з малою швидкістю показали, що при зміщенні потенціалу в катодну область ($E_{\text{кор}} \rightarrow -1,0 \text{ В} \rightarrow -2,0 \text{ В}$) збільшується площа поперечного перерізу зразків після руйнування порівняно з повітрям (зразки 1, 2, 12), що свідчить про підвищення схильності сталі до крихкого руйнування.

Водночас за потенціалу $-1,0 \text{ В}$ можуть проявлятися деякі відмінності у схильності до корозійного розтріскування сталей Х70, які мають певні структурні особливості. Зокрема руйнування зразка з труби Б супроводжувалося пластичною деформацією (рис. 8, а, крива 3), його площа поперечно-

го перерізу менша (рис. 8, б, фото 3), ніж труби А, 4,35 мм² та 6,07 мм² відповідно, K_s дорівнюють 1,31 та 1,7. Тобто металу з меншою забрудненістю неметалевими включеннями та меншим розміром перлітної структурної складової властива нижча схильність до КР за інших однакових умов.

Згідно з ДСТУ 4219:2003 нормоване значення захисного поляризаційного потенціалу знаходиться в діапазоні $-0,85 \dots -1,15 \text{ В}$ (відносно мідносульфатного електрода порівняння, м.с.е.), що відповідає $-0,75 \dots -1,05 \text{ В}$. Корозійно-механічні властивості сталі Х70 дослідили за потенціалу, наближеного до максимального захисного ($-1,00 \text{ В}$) за різних комбінацій чинників КР. Руйнування зразків за потенціалу $-1,00 \text{ В}$ (рис. 8, а) при повному зануренні у розчин NS4 (крива 2), при періодичному змочуванні розчином (крива 6), після циклічних навантажень і при періодичному змочуванні розчином (крива 7), у присутності шару полімерної ґрунтовки та при періодичному змочуванні розчином (крива 9), після циклічних навантажень у присутності полімерної ґрунтовки та при періодичному змочуванні розчином (крива 10) відбувалося практично без пластичної деформації. Для всіх зразків властиве збільшення площі поперечного перерізу на 52...66 % порівняно з поперечним перерізом зразків у повітрі. Значення коефіцієнта K_s становили 1,7 (зразок 2) і 2,15 (зразки 6 і 7), 2,07 (зразок 8), 1,75 (зразок 10) та 1,7 (зразок 9).

На кривих руйнування зразків у розчині, після попередньої дії на зразок циклічних навантажень (крива 4), наявна коротка область в'язкого руйнування. Площа поперечного перерізу цих зразків порівняно із зразками у повітрі більша на 65 %, значення коефіцієнта $K_s = 1,65$. Криві руйнування зразків із концентратором напружень відрізняються від розглянутих вище значно меншим видовженням (рис. 8, а, криві 5, 8). Площа поперечного

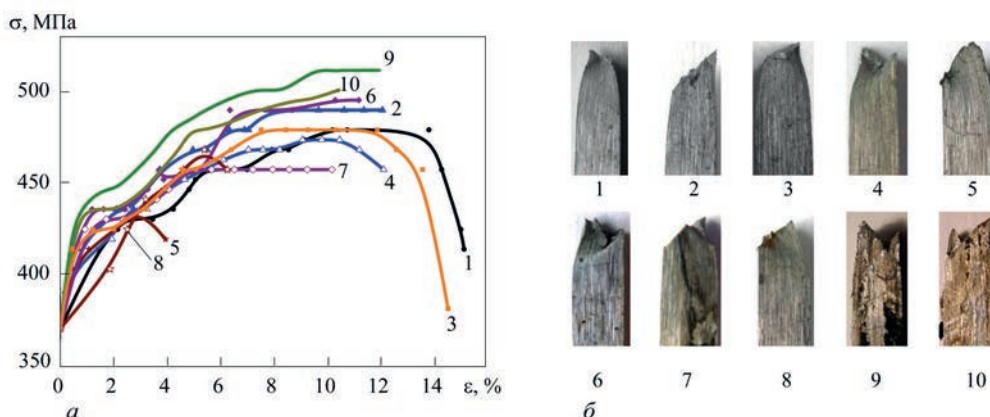


Рис. 8. Діаграми руйнування зразків трубної сталі Х70 у повітрі та у NS4 за потенціалу $-1,0 \text{ В}$ за впливу чинників КР (а), фото зламів зразків (б), швидкість деформації 10^{-6} с^{-1}

перерізу зразків після руйнування більша (зразки 5, 8), ніж для зразків 2, 6, 7, 9, 10, 40 мм², значення коефіцієнта схильності до КР K_s дорівнюють 1,87 і 2,07 відповідно. Слід підкреслити, що за потенціалу $-1,0$ В у зламах зразків (крім зразка 3) при різній комбінації чинників КР, є крихка складова (рис. 8, б, фото 2, 4–10), її частка більша, ніж за потенціалу корозії. Значення коефіцієнта K_s змінюються від 1,65 до 2,15. Найінтенсивніше на схильність до КР за цього потенціалу впливають наявність КН та періодичне змочування розчином.

Зразки з номерами 2–7 під час випробувань зазнавали пластичного деформування, внаслідок чого відбулося характерне утягування в області руйнування, при цьому злам мав в'язкий характер, а значення коефіцієнта K_s змінювалися від $\sim 1,04$ до $\sim 1,56$. Злами зразків 8–15 відрізняються від вищенаведених: візуально можна зазначити меншу частку пластичного деформування, і, як наслідок – збільшення коефіцієнта K_s до $\sim 1,6 \dots 3,5$. Під час проведення робіт із встановлення причин руйнування МГ розміром $1420 \times 15,7$ мм на прилеглій до корозійної тріщини ділянці руйнування залишкова товщина стінки труби становила близько $\sim 35 \dots 40$ % від номінальної, і характер зламу (рис. 9) за багатьма ознаками був схожий на той, що спостерігали у лабораторних умовах. Це відповідає значенню коефіцієнта $K_s = 1,6$.

Швидкість корозії сталі X70 у розчині після витримання в ньому покритті за температури 20°C впродовж 1 місяця зростає майже на 13 % (від $0,089$ мм/рік у вихідному розчині до $0,101$ мм/рік у розчині, що контактував з покриттям), а у розчині, що контактував з покриттям впродовж 2,5 місяців – зменшується на 76 % – до $0,021$ мм/рік (рис. 10). За температури 60°C закономірності зміни швидкості корозії сталі X70 подібні: збільшення до



Рис. 9. Злам труби зі сталі X70 біля осередку корозійної тріщини, що утворилася під час експлуатації МГ розміром $1420 \times 15,7$ мм

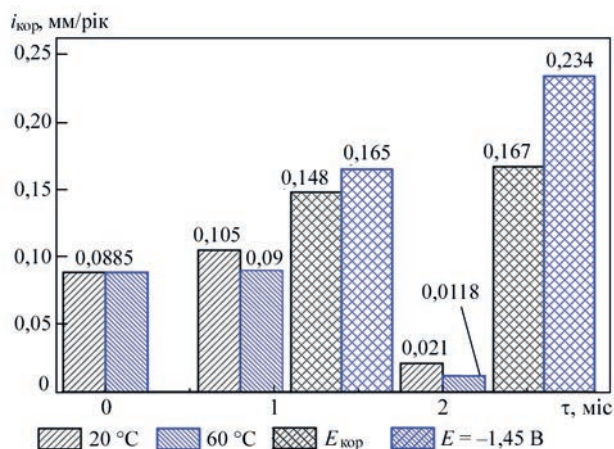


Рис. 10. Швидкість корозії сталі X70 у NS4 після витримання в ньому стрічкового покриття при 20 та 60°C і після випробувань методом катодного відшарування за потенціалу корозії та за потенціалу поляризації $-1,45$ В

$0,09$ мм/рік через 1 місяць з наступним зменшенням до $0,012$ мм/рік – через 2,5 місяці.

Для визначення впливу катодної поляризації на властивості покриття було проведено дослідження методом катодного відшарування на спеціалізованому лабораторному стенді (рис. 11). За потенціалу $-1,45$ В процес деградації перебігає інтенсивніше, ніж за потенціалу корозії, що підтверджено збільшенням радіуса відшарування покриття від основи (від $11,0$ мм при $E_{\text{кор}}$ до $17,0$ мм при $-1,45$ В). Під час відшарування покриття при катодній поляризації приблизно на 15 % зросло рН розчину (від $9,6$ при $E_{\text{кор}}$ до $11,0$ при потенціалі $-1,45$ В), втричі збільшилася його електропровідність (від $2,2 \cdot 10^{-3}$ до $6,6 \cdot 10^{-3}$ См/см відповідно), підвищилася корозивність відносно сталі X70 (швидкість корозії зросла від $0,167$ до $0,234$ мм/рік).

На основі комплексу проведених досліджень розроблено новітню концепцію, згідно з якою необхідними й достатніми умовами початку та розвитку КР МГ є наявність на ділянці, що обстежується, трьох основних чинників певної ін-

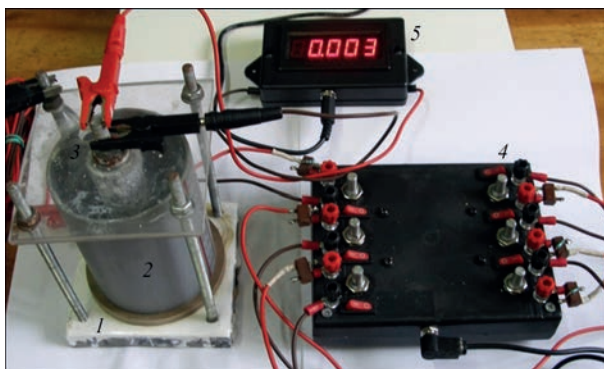


Рис. 11. Лабораторний стенд для дослідження катодного відшарування захисних покриттів: 1 – сталева пластина з покриттям, 2 – електрохімічна комірка, 3 – анод; 4 – потенціостатичний пристрій; 5 – мікроамперметр

тенсивності, які прийняті основними та умовно названі: «корозія» – C_i ; «захист від корозії» – Z_i ; «механічні напруження» – N_i . На кожний з основних чинників впливають додаткові. Інтенсивність впливу основного й додаткових чинників на ділянці МГ є різною, тому кожному чиннику поставлено у відповідність рекомендовані чисельні значення, які обрано з урахуванням схильності трубною сталі до корозійного розтріскування за впливу досліджених в цій роботі чинників. Мета обстеження полягає у виявленні наявних на ділянці МГ чинників і визначенні рівнів інтенсивності їхнього впливу. Згідно з методикою визначення потенційно корозійно-небезпечних ділянок МГ передбачає проведення таких заходів: аналіз проектної, виконавчої та експлуатаційної документації; виявлення зовнішніх і внутрішніх чинників заданими наземного технічного діагностування та лабораторних досліджень; аналіз результатів та оцінювання ймовірності КР ділянки МГ; ранжування потенційно корозійно-небезпечних ділянок МГ за ступенем схильності до КР; технічне обстеження МГ у шурфах; розроблення рекомендацій щодо ремонту ділянки МГ із тріщиноподібними дефектами. Під час проведення обстеження МГ виконують комплекс робіт із визначенням умов і чинників, що сприяють КР відповідно до вищеведених алгоритмів.

Запропоновано ймовірність корозійного розтріскування на i -й ділянці МГ обчислювати з урахуванням чисельних значень показників основних і додаткових чинників за формулою:

$$R_i = r_{C_i} r_{Z_i} r_{N_i} = \prod_{j=1}^n r_{ji} \left(1 - \sum_{k=1}^m G_{ki} \right), \quad (19)$$

де R_i – ймовірність корозійного розтріскування на i -й ділянці МГ; r_{C_i} , r_{Z_i} , r_{N_i} – чисельні значення показників основних незалежних чинників, r_{ji} – чисельне значення показника основного незалежного чинника; j – поточний номер одного з незалежних основних чинників; n – кількість основних незалежних чинників; G_{ki} – чисельні значення додаткових чинників, які впливають на відповідний основний чинник на i -й ділянці; k – поточний номер додаткового чинника; m – кількість додаткових чинників, що впливають на відповідний основний чинник.

Науково обґрунтований вибір технологій відновлення та ремонту МГ. У парадигмі Індустрії 4.0/5.0 технічне обслуговування розглядається як система індивідуалізованого прийняття рішень, що забезпечує одночасне досягнення критеріїв безпеки, надійності, економічної ефективності та екологічної сталості. Особливого значення набувають

технології ремонту без припинення транспортування газу, які усувають необхідність скидання природного газу в атмосферу, зменшують матеріалоємність і тривалість ремонту, скорочують обсяги робіт і ризики для персоналу. Таким чином, ремонт під тиском повністю відповідає принципам сталого розвитку та людиноцентричної концепції Індустрії 5.0. Ефективність таких технологій визначається не лише їхніми конструктивними особливостями, а й науково обґрунтованим вибором для конкретного дефекту. Прийняття рішення повинно базуватися на комплексному аналізі НДС, механізмів руйнування, деградації матеріалу, залишкового ресурсу та умов експлуатації. За цих умов СЕМ стає інструментом не тільки оцінювання роботоздатності, а й оптимізації технології ремонту, дозволяючи визначати ефективність різних способів відновлення, геометричні параметри підсилюючих конструкцій, режими багатопрохідного наплавлення та допустимі умови виконання робіт без зупинки трубопроводу.

Зокрема багатопрохідне наплавлення забезпечує компенсацію корозійної втрати металу без виведення МГ із експлуатації. Після попереднього підігрівання ризик холодного розтріскування практично усувається, а визначальним фактором технологічної міцності стає пластична нестійкість локально перегрітого металу під дією внутрішнього тиску. Водночас локальний нагрів може спричинити залишкові пластичні деформації та формування випину, що знижує несучу здатність конструкції. Тому оптимізація технології ремонтного наплавлення повинна забезпечувати одночасне виконання критеріїв технологічної міцності під час ремонту та допустимості залишкових деформацій відновленої конструкції.

Дослідження особливостей стану ділянки МГ із виявленим зовнішнім дефектом локального корозійного стоншення стінки в процесі ремонтного наплавлення проводилося на характерному прикладі трубопроводу діаметром $D = 1420$ мм із товщиною стінки $t = 20$ мм зі сталі Х65 ($\sigma_T = 490$ МПа, $\sigma_B = 590$ МПа) з максимальним експлуатаційним тиском $P = 7,4$ МПа. Був розглянутий дефект втрати металу ($2s \times u \times \delta = 70 \times 70 \times 10$ мм) на зовнішній поверхні труби. З урахуванням етапу контрольованого шліфування його форма може бути прийнята напівеліптичною. Для усунення такого дефекту достатньо двох наплавлювальних шарів (за винятком контурного), схему розкладання валиків наведено на рис. 12. Передбачалося, що область ремонту попередньо підігрівали до температури $T_{np} = 100$ °С, щоб уникнути появи холодних

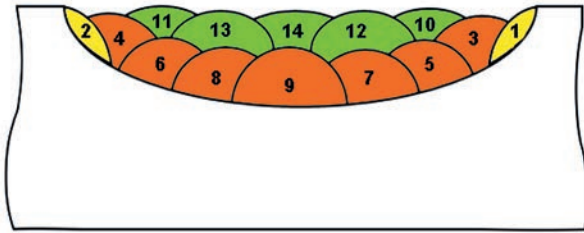


Рис. 12. Схема наплавлення дефекту стоншення на зовнішній поверхні трубопроводу

тріщин. Технологічні параметри дугового наплавлення згідно з рекомендованими існуючими стандартами вибрані наступними: зварювальний струм $I_{зв} = 80$ А, швидкість зварювання $v_{зв} = 2$ мм/с, тиск у трубопроводі при ремонті $P_r = 4$ МПа. Відповідно параметрами ремонту є зварювальний струм $I_{зв}$, внутрішній тиск у трубопроводі при напавленні P_r , а також час між напавленням кожного з валиків, що забезпечує підтримку максимальної температури металу не нижче за необхідну $T_{min} \geq T_{mi}$.

Розрахунок залишкового НДС конструкції після напавлення показав суттєво нелінійний розподіл залишкових напружень, що пояснюється поступовою формозміною конструкції у міру напавлення валиків в області дефекту, а також складними температурними циклами в металі, що вирізняються повторним нагріванням та охолодженням. У процесі заварювання дефекту на трубопровід під тиском спільна дія зовнішніх зусиль і локального нерівномірного термодформування (й інтенсивного пластичного плину металу) викликає формування локального поля пошкодження. Слід підкреслити, що в розглянутому випадку інтенсивність зростання зароджених мікропор в'язкого руйнування характерно невелика, що пояснюється невеликою жорсткістю напруженого стану в зоні локального нагрівання. Як результат, згідно із законом Райса-Трейсі, швидкість зростання зароджених пор невелика. При цьому збільшення внутрішнього ремонтного тиску P_r (або тепловкладення при напавленні) прогнозовано викличе зростання інтенсивності накопичення пластичних деформацій, відповідне зростання пор в'язкого руйнування та збільшення схильності конструкції до макроруйнування. Розроблена методика оцінки схильності металу зварних трубопроводів до в'язкого руйнування дозволяє дослідити вплив різних параметрів ремонту на технологічну міцність МГ та його робоздатність. У залежності від ступеня прогрівання ТЕ в процесі ремонту та величини внутрішнього тиску в області усуненого дефекту локального стоншення формується дефект форми різного розміру. Припустимість такого дефекту визначає можливість подальшої експлуатації від-

ремонтованої ділянки МГ. Такі дані можуть бути представлені у вигляді двовимірних діаграм, зокрема у координатах «ремонтний тиск–зварювальний струм», приклад яких для розглянутого випадку наведений на рис. 13.

Криві на наведених діаграмах являють собою границю, що розділяє області допустимого й недопустимого станів трубопроводу при багатопрхідному напавленні дефекту та наступній експлуатації: область параметрів, розташована нижче кривих 1 відповідає виконанню вимог допустимості дефекту форми в області ремонту, тоді як область під кривою 2 відповідає параметрам, що гарантують виконання критеріїв опору матеріалу в'язкому руйнуванню згідно з результатами комплексу чисельних розрахунків кінетики стану МГ при напавленні [21]. Із цих даних можна зробити висновок про те, що при істотному тепловкладенні переважаючим механізмом, що обмежує застосування напавлення, є ризик пластичної нестійкості, тоді як при відносно невеликих потужностях локального нагрівання та високих тисках небезпечним є надлишкове залишкове деформування конструкції.

Поряд із ремонтним зварюванням дедалі більшого поширення набувають технології встановлення підсилювальних конструкцій різного типу, композитних бандажів, металевих муфт і комбінованих ремонтних систем (рис. 14) [22]. Їхня ефективність визначається не лише міцністю самих елементів підсилення, але й характером перерозподілу навантаження між пошкодженою конструкцією та ремонтною системою. Тому оптимізація геометрії підсилення, властивостей матеріалів і параметрів монтажу також потребує використання чисельного моделювання та багатокритеріального аналізу. Крім того, необхідно забезпечити належну надійність зварних з'єднань, які часто є слабкими місцями в системі контактної пари «трубопровід–підсилювальна конструкція», гарантувавши робоздатність і безпеку обслуговуючого персоналу.

На підставі проведених досліджень і випробувань для механізованого дугового зварювання в захисних газах рекомендовано застосування порошкових газозахисних дротів діаметром 1,2 мм і самозахисних дротів діаметром 1,6...2,0 мм. Зварювальні матеріали повинні забезпечувати механічні властивості зварних з'єднань, що відповідають вимогам до основного металу труб: тимчасовий опір розриву має бути не нижчим за нормативне значення для труби, ударна в'язкість металу шва при -20 °С – не менше ніж 34 Дж/см², кут статичного вигину – не менше ніж 120°, а твердість металу шва та зони термічного впливу – не більше за 300

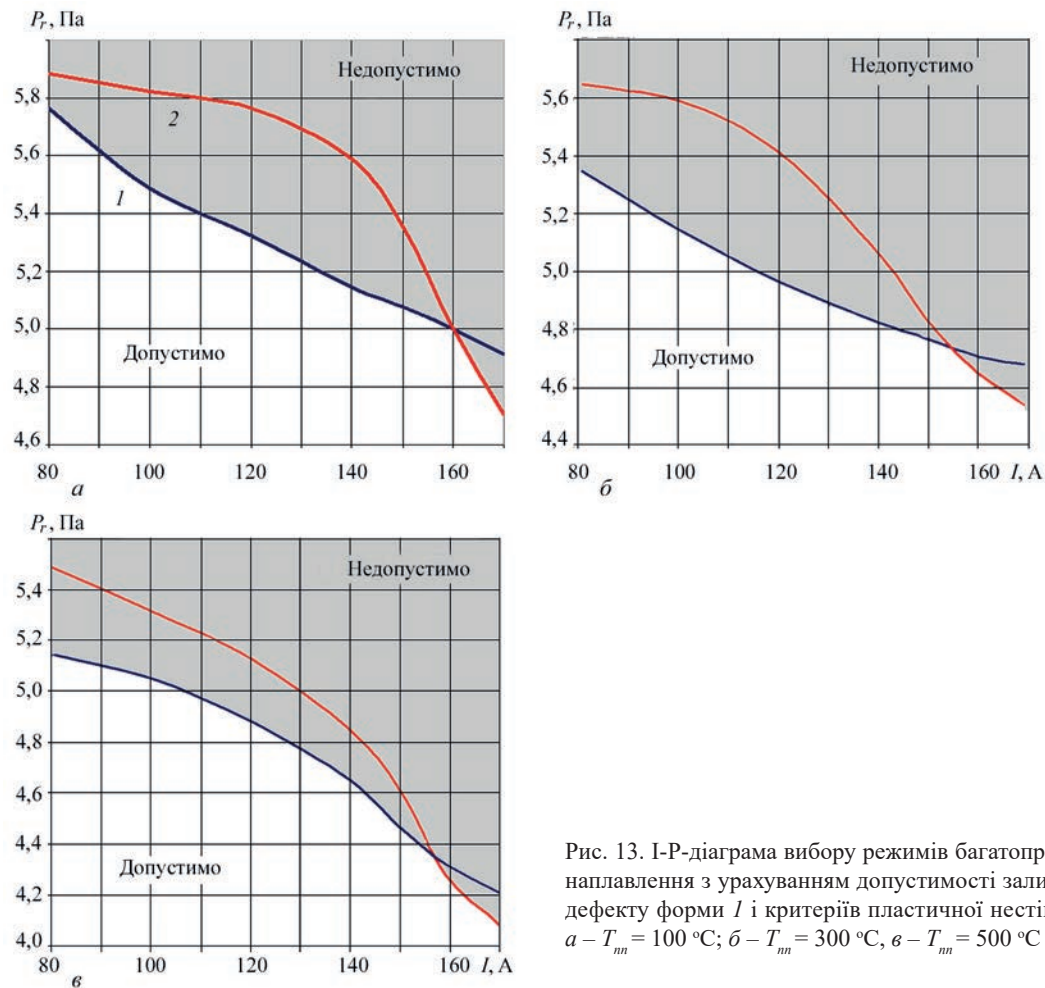


Рис. 13. I-P-діаграма вибору режимів багатопрохідного наплавлення з урахуванням допустимості залишкового дефекту форми 1 і критеріїв пластичної нестійкості 2: а – $T_{mn} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $T_{mn} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$; в – $T_{mn} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

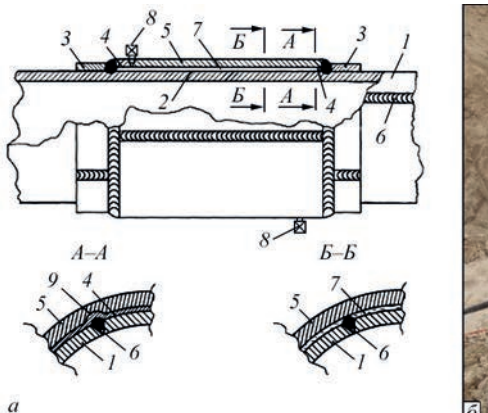


Рис. 14. Схема компаундної муфти для підсилення дефектних ділянок МГ (а) та приклад її встановлення (б)

HV_{10} для труб класу міцності до K55 включно і 325 HV_{10} для труб класів понад K55 до K60 включно.

Приклади стикових з'єднань при відпрацюванні техніки зварювання в різних просторових положеннях на імітаційних зразках розміром 350×100×16 і 250×151×2 мм наведені на рис. 15, 16. При розробці технології механізованого дугового зварювання в захисних газах підсилювальних конструктивних елементів основна увага була приділена відпрацюванню техніки зварювання стикових і нахльостково-стикових з'єднань у різ-

них просторових положеннях. При цьому намагалися визначити такі режими зварювання, які, з одного боку, забезпечували б якісне формування багатопрохідних зварних швів, а з іншого – не вимагали б суттєвого корегування зміни просторового положення.

Технологія виконання багатопрохідних кільцевих нахльостково-стикових з'єднань передбачає ведення процесу зварювання в напрямку знизу вгору по секторах. При ширині обробки крайок $l \geq 15$ мм усі шари треба виконувати методом

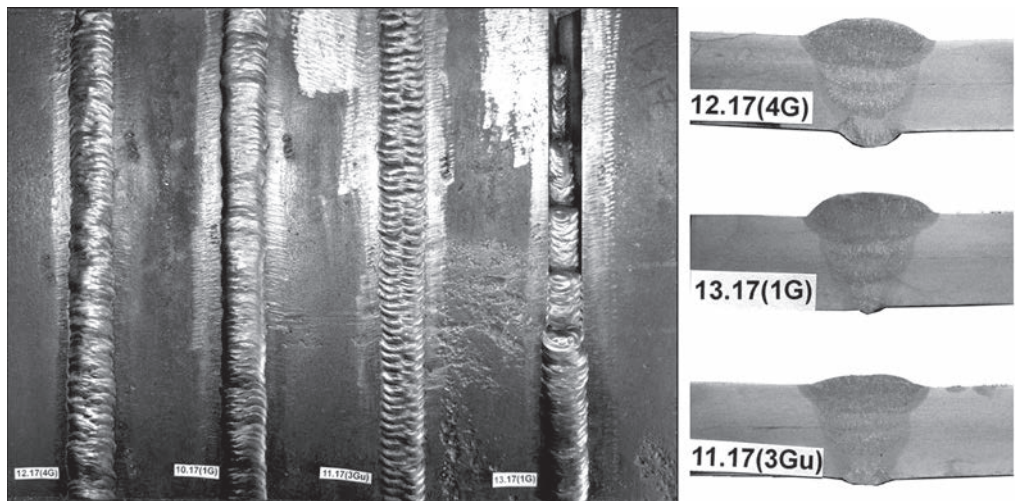


Рис. 15. Зразки стикових з'єднань, що зварені в стельовому (4G), нижньому (1G), вертикальному (3Gu) просторових положеннях із використанням дроту суцільного перерізу

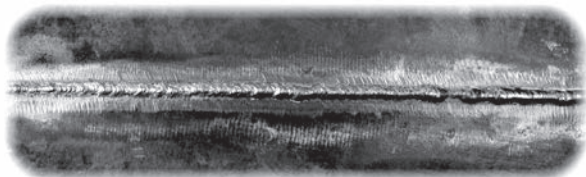


Рис. 16. Кореневий шов зі зворотного боку зварного стикового з'єднання, виконаного на вертикалі

«один шар за два проходи». Це дозволяє подрібнити структуру металу шва та додатково підвищити значення його ударної в'язкості. При ширині обробки крайок $l < 15$ мм перший шар виконують методом «один шар за один прохід», а починаючи з другого шару – методом «один шар за два проходи». Облицювальний шар нахльостково-стикового з'єднання слід виконувати методом «шар за прохід» або «шар за два проходи» залежно від величини l . Загальна кількість шарів у нахльостково-стикових з'єднаннях визначається товщиною стінки конструктивних підсилюючих елементів. Для гарантованого сплавлення крайок із трубопроводом зварювання в стельовому положенні слід виконувати в положенні електрода «кутом назад». Режими зварювання наведені у таблиці.

Особливої уваги вимагає міцність зварних з'єднань муфти з наповнювачем. Принцип використання ремонтної конструкції такого типу полягає в заповненні регулярної міжстінкової щілини між муфтою та трубопроводом рідким компаундом, що

дозволяє забезпечити відповідний рівень гідростатичного тиску та знизити рівень напружень у стінці дефектної труби. Але ремонт МГ за допомогою муфт із компаундним наповнювачем має свої обмеження, які пов'язані з особливостями монтажу підсилювальної конструкції на трубі, а саме, з геометрією зварного з'єднання. При наявності технологічного кільця, що забезпечує необхідну величину проміжку між стінками, у зоні примикання утворюється тріщиноподібна щілина, тобто таке зварне з'єднання відноситься до так званих «щілинних» з'єднань, розрахунок яких виконується на основі підходів механіки руйнування тіл із тріщинами. Граничний стан для такого типу зварних з'єднань формулюється з умови, що прилегла гостра порожнина перебуває в полі напруженого стану, при якому можливе її спонтанне зростання. Для оцінки граничного стану може бути використаний апробований метод R6, заснований на двопараметричному критерії крихко-в'язкого руйнування, який співвідносить параметр чисто крихкого руйнування у вершині тріщини $K_r = K_I/K_{IC}$ з параметром чисто в'язкого руйнування для даної тріщини $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_T$. Розрахункове визначення величин K_I і σ_{ref} для зварних з'єднань щілинного типу зручно виконувати, попередньо розрахувавши згинальний момент M_L і перерізуючу силу Q_r , які діють у зоні зварного з'єднання на одиницю його довжини (по колу), використовуючи наступні залежності [23]:

Рекомендовані режими зварювання нахльостково-стикового з'єднання, звареного із застосуванням дротів DW-A55 та Св-08Г2С (захисний газ 82 % Ar + 18 % CO₂)

Параметр	Прохід при заповненні розробки	
	Заповнювальний	Облицювальний
Швидкість подачі дроту, м/хв	(8,0...9,1)/(4,0...4,1)	(7,4...8,0)/(3,7...3,8)
Зварювальний струм, А	(190...220)/(135...140)	(180...200)/(125...130)
Напруга на дузі, В	(26,5...27,0)/(19,5...20,5)	(26,0...26,5)/(18,0...18,5)
Виліт дроту, мм	(12...23)/(12...23)	(10...16)/(10...16)
Примітка. Чисельник – для дроту DW-A55, знаменник – для дроту Св-08Г2С		

$$K_I = \frac{0,5369}{\sqrt{h}} \left(Q_r \cos \varphi + \frac{8M_L}{h} \right);$$

$$\sigma_{ref} = \sqrt{\left(\frac{4M}{h^2} + \frac{Q_r \cos \varphi}{h} \right)^2 + 3 \left(\frac{Q_r \sin \varphi}{h} \right)^2} \quad (20)$$

де h – мінімальний розмір від вершини гострої порожнини у зварному шві до вільної поверхні (рис. 17); для розглянутого випадку їх два – h_1 і h_2 . Більш консервативним є розмір h_1 :

$$h_1 = t_M \cos \varphi = t_M (1 + \beta^2)^{-0,5}; \quad \beta = \frac{t_M + \Delta - \delta_M}{a_M}. \quad (21)$$

З викладеного випливає, що граничний стан крихко-в'язкого руйнування (спонтанне зростання «тріщини» – гострої порожнини, пов'язаної з кільцевим зварним швом) визначається згинальним моментом M_L і перерізуючою силою Q_r , обумовленими внутрішнім тиском у трубі P і в наповнювачі P_{fill} , геометричними розмірами перерізу, тобто величинами D , t , δ_{mk} , c_M , a_M , b_M , Δ , t_M , а також відповідними характеристиками матеріалу K_{IC} , σ_T , σ_B зварного з'єднання у перерізах h_1 і h_2 .

Для отримання відповідних кількісних результатів була використана чисельна методика скінченно-елементного прогнозування НДС, викладена раніше. Момент M_L і перерізуюча сила Q_r у вершині гострої порожнини обчислювали-

ся за нормальними напруженнями σ_{zz} у перерізі, що відповідає вершині гострої порожнини, для її зростання по h_1 або h_2 . Величина моменту M_L має вигляд різниці $M_L = M_1 - M_2$, де:

– для випадку поширення тріщини по променю h_1

$$M_1 = \int_{-t_M/2}^{t_M/2} \sigma_{zz} \xi d\xi, \quad M_2 = \int_{\frac{t+\Delta}{2}}^{\frac{t+\Delta}{2}} \sigma_{zz} \xi d\xi; \quad (22)$$

– для випадку поширення тріщини по променю h_2

$$M_1 = \int_{\frac{t_M+\Delta}{2}}^{\frac{t_M+\Delta}{2}} \sigma_{zz} \xi d\xi, \quad M_2 = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{zz} \xi d\xi. \quad (23)$$

Відповідні результати розрахунку для трубопроводу зі сталі X70 при $D = 1420$ мм, $t = 20$ мм і робочому тиску $P = 7,5$ МПа наведені нижче для муфти завдовжки 1400 мм і завтовшки $t_M = 14$ мм і $\delta = 20$ мм при ремонтному тиску $P_r = 7,5$ МПа, і $t_M = 14$ мм при $P_r = 0,7P = 5,25$ МПа. Розміри технологічних кілець – δ_{mk} і c_M приймалися наступними: $\delta_{mk} = t_M$, $c_M = 140$ мм. Величина зазору Δ регулювалася додатковими кільцями розмірами по ширині $b_M = 30$ мм.

На основі значень M_L і Q_r розраховано K_I , σ_{ref} а потім при $K_{IC} = 1500$ МПа·мм^{1/2}, $\sigma_T = 440$ МПа і 360 МПа – коефіцієнт запасу міцності n . З наведених даних видно, що зміна границі текучості від 440 до 360 МПа (сталі X70 і X60) при $P_r = P = 7,5$ МПа і $P_r = 0,7P$ не виявляє помітного впливу на припустимий тиск у наповнювачі $[P_{fill}]$ при коефіцієнтах безпеки $n \approx 2,0$. Помітний вплив виявляє величина щілини Δ : зі збільшенням Δ від 3 до 12 мм $[P_{fill}]$ знижується від 4,3 до 2,3 МПа при $P_r = P$ і від 3,5 до 1,7 МПа при $P_r = 5,25$ МПа. Підвищення тиску P_{fill} вище зазначеного, що допускається $[P_{fill}]$, небажане, тому що при цьому помітно знижується величина коефіцієнта запасу міцності (рис. 18).

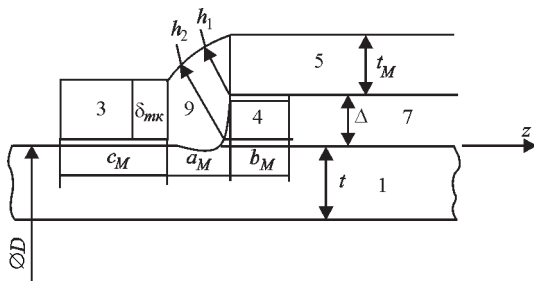


Рис. 17. Схема перерізу кільцевого з'єднання монтажного вузла кріплення герметичної муфти з компаундним наповнювачем до трубопроводу

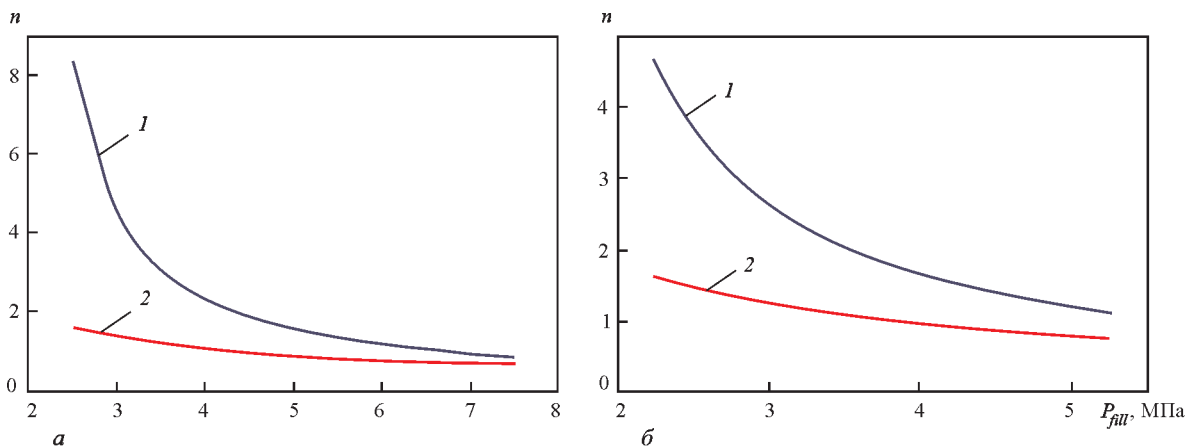


Рис. 18. Залежність коефіцієнта запасу міцності n зварного з'єднання герметичної муфти та трубопровідного елемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, $\sigma_T = 440$ МПа) по променю h_1 залежно від тиску рідкого наповнювача P_{fill} : а – внутрішній тиск у трубопроводі $P = 7,5$ МПа; б – $P = 5,25$ МПа; 1 – $\Delta = 3$ мм, 2 – $\Delta = 12$ мм

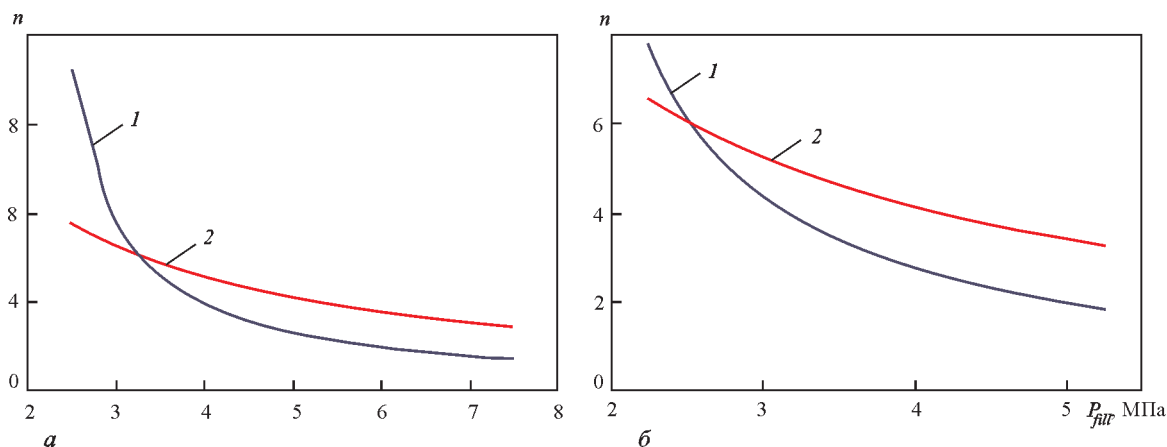


Рис. 19. Залежність коефіцієнта запасу міцності n зварного з'єднання герметичної муфти та трубопровідного елемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, $\sigma_r = 440$ МПа) по променю h_2 залежно від тиску рідкого наповнювача P_{fill} : а – внутрішній тиск у трубопроводі $P = 7,5$ МПа; б – $P = 5,25$ МПа, 1 – $\Delta = 3$ мм, 2 – $\Delta = 12$ мм

Стосовно випадку руйнування по променю h_2 , результати розрахунку підтверджують висловлене вище припущення про більш консервативний варіант руйнування по променю h_1 (рис. 19). Для розглянутого варіанта вхідних даних із отриманих результатів чисельних досліджень випливає, що при нормативних розмірах герметичної муфти й умовах заповнення міжстінкового проміжку можна рекомендувати тиск наповнювача з умови збереження цілісності кільцевих зварних швів на рівні $[P_{fill}] = 4,3 \dots 4,5$ МПа при $P_r = 5,25 \dots 7,5$ МПа і $\Delta = 3$ мм. Збільшення Δ до 12 мм різко знижує припустимий тиск у наповнювачі до $1,7 \dots 2,3$ МПа. Оскільки для багатьох практично реалізованих випадків величина проміжку Δ перебуває в межах 3 мм, створюваний тиск P_{fill} не перевищує 4 МПа, то розглянута конструкція ремонтної муфти стосовно елементів МГ $D \times t = 1420 \times 20$ мм зі сталі X60–X70 може забезпечити достатнє розвантаження дефектної зони в стінці трубопроводу за умови, що заданий тиск рідкого наповнювача збережеться, деякою мірою, і після його полімеризації.

Таким чином, технології відновлення в сучасній газотранспортній системі слід розглядати як невід'ємний елемент адаптивного управління цілісністю, що інтегрує результати діагностики, чисельного моделювання, прогнозування деградації та ризик-орієнтованого аналізу. Перехід від нормативного вибору ремонтних рішень до їхньої цифрової, фізично обґрунтованої та індивідуалізованої оптимізації є одним із ключових проявів парадигми Індустрії 4.0/5.0 і створює методологічне підґрунтя для забезпечення довготривалої надійності ГТС України.

Управління цілісністю МГ в умовах транспортування зеленого водню. Декарбонізація енергетичного сектору та формування нової архітектури енергетичних ринків Європи зумовлюють

поступовий перехід до транспортування сумішей природного газу та зеленого водню. У межах парадигми Індустрії 4.0/5.0 цей перехід слід розглядати не як просту зміну робочого середовища ГТС, а як фундаментальну трансформацію умов її функціонування, що безпосередньо впливає на всі рівні управління цілісністю – від матеріалознавчого до системного. У цьому контексті важливими стають два взаємопов'язані науково-технологічні аспекти. Перший полягає у необхідності глибокого фундаментального розуміння механізмів водневої деградації конструкційних сталей, які суттєво відрізняються від класичних корозійно-механічних процесів, характерних для транспортування природного газу. Водень виступає не лише як дифузійно активний елемент, але й як каталізатор локалізації пластичної деформації, декогезійного послаблення міжфазних і міжзеренних зв'язків, а також прискорення зародження та зростання мікро- і макротріщин. Другий аспект безпосередньо пов'язаний із практикою індивідуалізованої експертизи та ремонтно-відновлювальних робіт як елемент адаптивного управління цілісністю.

Так, результати наукових досліджень дозволили встановити, що важливу роль у корозійно-водневій деградації відіграє абсорбований водень, який формується внаслідок електрохімічної корозії як на внутрішніх, так і на зовнішніх поверхнях труб [24]. Його накопичення інтенсифікує дифузійні процеси, сприяє утворенню вакансій, мікропор і розвитку розсіяної пошкодженості, що знижує міцність і підвищує схильність до корозійно-водневого розтріскування [25]. Додатково встановлено кореляцію між зниженням ударної в'язкості та вмістом водню в експлуатованому металі, причому найінтенсивніша деградація спостерігається на ділянках труб, які контактують із водним конденса-

сатом, що підтверджує визначальну роль наводнювання в процесах втрати роботоздатності [26].

Водень, незалежно від джерела його надходження у метал, інтенсифікує розвиток тріщин на мікро- та макрорівні, прискорюючи як зародження, так і зростання дефектів. Для кількісної оцінки його впливу на зростання макротріщин розроблено науково-обґрунтований метод визначення опору воднево-окрихченню [27], що базується на електролітичному наводнюванні частини зразка з подальшою дифузією водню до вершини тріщини. Додатково запропоновано технологічний підхід до гальмування росту втомних тріщин шляхом використання спеціального середовища [28].

Важливою з точки зору перспективи використання вітчизняної ГТС для потреб водневої енергетики експериментально підтвердженою закономірністю є те, що експлуатовані трубні сталі набувають схильності до корозійного та водневого розтріскування [29], тоді як у вихідному стані така чутливість відсутня. Зокрема гладкі зразки сталі API X52 не демонструють схильності до корозійного розтріскування в модельному середовищі водного конденсату газопроводу (рис. 20, а). Водночас зразки з тріщинами проявляють виражену чутливість (рис. 20, б), причому накладення катодної поляризації додатково знижує порогове значення J_{sc} відносно J_i у повітрі.

Для цього розроблено метод прискореної воднево-індукованої деградації, який моделює довготривалі процеси за рахунок інтенсифікації мікропошкодженості та дозволяє прогнозувати зміну механічних властивостей у масштабі десятків років за декілька діб [26]. Показано, що тривала експлуатація змінює механізми руйнування трубних сталей та підвищує їхню чутливість до корозійного розтріскування [25]. Важливим для фундаментального розуміння довготривалої надійності МГ є факт, що деградація трубних сталей відбувається

за двома взаємопов'язаними механізмами: зміною мікроструктури та розвитком розсіяної пошкодженості. Мікроструктурні зміни полегшують накопичення пошкоджень, що на макрорівні проявляється у зниженні опору крихкому руйнуванню (ударної в'язкості, роботи зародження тріщини, тріщиностійкості тощо). При цьому експлуатаційне окрихчення ферито-перлітних трубних сталей пов'язане зі збагаченням границь зерен і внутрішньозеренних дефектів сполуками вуглецю, що підтверджено електрохімічною діагностикою фасеток крізьзеренного відколу [30].

Розвиток розсіяної пошкодженості визначається особливостями мікроструктури, насамперед витягнутими вздовж напрямку вальцювання неметалевими включеннями. На границі включення—матриця утворюються нанопори, які є ефективними пастками водню. Накопичення рекомбінованого водню в цих дефектах знижує адгезію між включеннями та матрицею, спричиняє розшарування й пластичне деформування металу під дією внутрішнього тиску. Таким чином, розвиток мікропошкодженості відбувається за поєднання деформаційного та декогезивного механізмів, унаслідок чого навіть низькоміцні сталі з високим рівнем пошкодженості набувають низького опору крихкому руйнуванню [31].

Відомо, що низькоміцна сталь, яка є слабо чутливою до водневої крихкості у стані постачання, набуває її під час експлуатації, що посилює ризик порушення цілісності МГ при транспортуванні газоводневих сумішей. На полегшений розвиток у низькоміцних сталях розсіяної пошкодженості за механізмом деформування матеріалу під впливом високого тиску водню, рекомбінованого у дефектах [31], впливають складові мікроструктури, зокрема неметалеві включення, орієнтовані у напрямку вальцювання. На їхніх межах із матрицею утворюються нанорозмірні пори, які є ефективні-

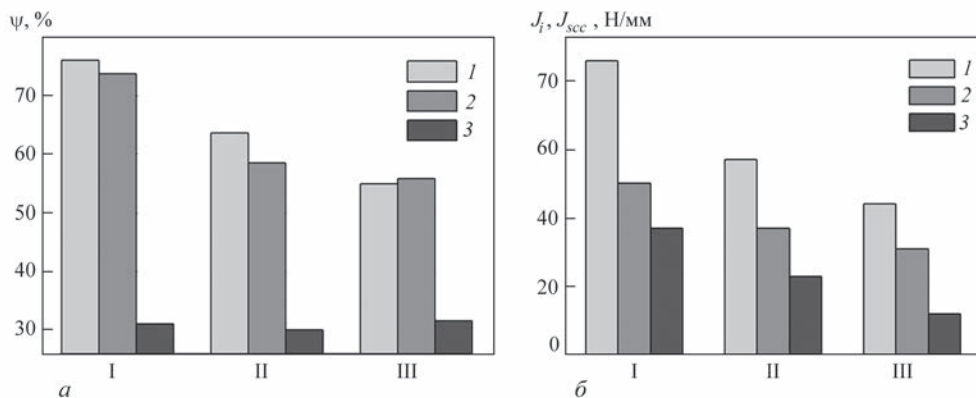


Рис. 20. Відносне звуження (а) та тріщиностійкість (б) сталі X52 у вихідному стані (I) та після 30 років експлуатації: X52-12 (II) та X52-10 (III) у повітрі (1), у модельному середовищі водного конденсату за потенціалу корозії (2) та катодної поляризації 0,1 А/м² (3)

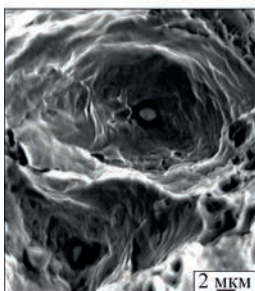
ми пастками водню. Водень знижує силу адгезії між включеннями та матрицею (рис. 21, *а*) та накопичується у порах та інших дефектах. Як наслідок, формується розшарування між складовими мікроструктури й метал під тиском рекомбінованого водню деформується, що зумовлює розвиток дефекту (рис. 21, *б*). Об'єм порожнини між контуром дефекту та включенням є незначними (рис. 21, *в*), що полегшує створення в ньому воднем високого тиску. Отже, розвиток мікропошкодженості низькоміцних сталей, полегшений воднем, супроводжується поєднанням деформаційного механізму з декогезивним. Як наслідок, навіть низькоміцна сталь із високою мірою мікропошкодженості має низький опір крихкому руйнуванню.

Реалізація механізмів пошкодження трубних сталей під дією водню залежить від їхньої міцності. Для низькоміцних сталей домінує накопичення молекулярного водню в порах із подальшим деформаційним ростом і злиттям пор, тоді як для високоміцних визначальним стає водневе розтріскування внаслідок зниження когезивної й адгезивної міцності. Обидва механізми можуть реалізовуватися одночасно та посилювати корозійно-механічне руйнування [24]. Трубні сталі мають виражену текстуру, сформовану в процесі вальцювання: феритні смуги чергуються з тонкими прошарками перліту, а неметалеві включення витягуються вздовж напрямку прокатки. У процесі тривалої експлуатації послаблюється адгезія між включеннями та матрицею, а також між феритом і перлітом, що спричиняє розшарування та знижує опір крихкому руйнуванню в площині вальцювання [24].

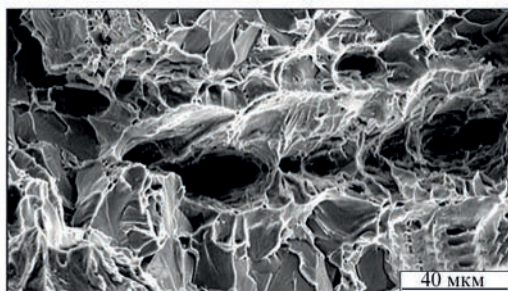
Можна виокремити дві основні стадії експлуатаційної деградації феритно-перлітних трубних сталей: деформаційне старіння (I) та розвиток розсіяної пошкодженості (II) [24]. На першій стадії зростають границя текучості, міцність і твердість, тоді як пластичність, ударна в'язкість і тріщиностійкість знижуються. На другій стадії через накопичення пошкодженості зменшуються також міцність і твердість, а матеріал досягає критично-

го стану. Стадію розвитку розсіяної пошкодженості поділено на два періоди: утворення хаотично орієнтованих дефектів (IIa) і дефектів, орієнтованих уздовж напрямку вальцювання (IIб) [32]. У періоді IIa знижуються міцність, твердість, відносне звуження та характеристики опору крихкому руйнуванню, тоді як відносне видовження може навіть зростати внаслідок розкриття множинних дефектів. Тому показник δ втрачає інформативність для оцінювання пластичності. На стадії IIб розвиваються розшарування, орієнтовані вздовж волокон вальцювання, які можуть поширюватися всередині стінки труби без виходу на поверхню. При випробуваннях стандартних осьових зразків такі розшарування штучно підвищують виміряну ударну в'язкість, тому вона перестає адекватно характеризувати реальний опір крихкому руйнуванню. Для усунення цього ефекту рекомендовано використовувати спеціальні радіальні зразки, що забезпечують руйнування в площині, паралельній потенційному розшаруванню.

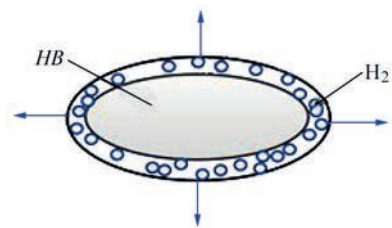
Як було вказано вище, наявність підвищеної концентрації дифузійного водню в металі труб, якими транспортуються газоводневі суміші, вимагає певного перегляду технологічних заходів підтримки їхньої цілісності. Характерним прикладом є забезпечення цілісності при ремонтному зварюванні, а саме, уникнення холодного розтріскування. Відомо, що підвищення концентрації дифузійного водню в металі посилює його схильність до зародження такого типу дефектності. Складність фізичних явищ, що впливають на схильність металу зварного шва до утворення холодних тріщин, створює значні проблеми у визначенні точного кількісного критерію руйнування. У цьому контексті ймовірнісний критерій, заснований на принципах статистичної механіки Вейбулла, вважається найбільш прийнятним для чисельної оцінки. Імовірність виникнення холодної тріщини як функцію вмісту дифузійного водню V_H (мл/100 г) і механічних напружень у матеріалі можна кількісно оцінити за допомогою наступного виразу [33]:



а



б



в

Рис. 21. Фрактограми (*а*, *б*) та схема (*в*), що ілюструють відшарування неметалевих включень від матриці (*а*), дефекти воднево-деформаційної природи (*б*) та їхнє формування (*в*): НВ – неметалеве включення; H_2 – молекулярний водень

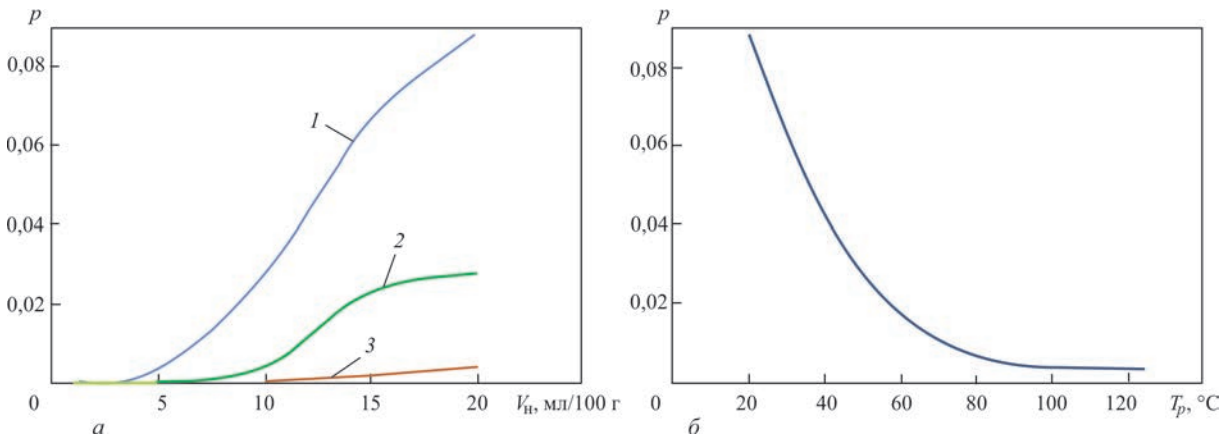


Рис. 22. Розрахункові залежності ймовірності p зародження холодної тріщини в металі трубопроводу від початкового вмісту дифузійного водню V_H (а) і температури попереднього підігріву ділянки ремонту T_p (б), 1 – $T_p = 20^\circ\text{C}$, 2 – $T_p = 50^\circ\text{C}$, 3 – $T_p = 100^\circ\text{C}$

$$p(V_H) = 1 - \exp \left[- \sum \left(\frac{\sigma - A(V_H)}{B} \right)^{\eta_p} \Delta V_H \right], \quad (24)$$

$$\sigma > A(V_H)$$

Коефіцієнти A , B , η_p для трипараметричного розподілу визначаються експериментально. Проведено дослідження впливу технологічних параметрів ремонтного зварювання МГ на холодне розтріскування металу труб із урахуванням впливу концентрації дифузійного водню V_H в умовах транспортування газоводневої суміші [34]. Досліджувалася пряма ділянка МГ діаметром 1420 мм і товщиною стінки 20 мм зі сталі Х65, робочий тиск 7,5 МПа, внутрішній тиск під час ремонту 4,0 МПа. Експлуатаційним дефектом, який розглядався, було локальне стоншення стінки розмірами 150 мм у довжину, 100 мм у ширину і 10 мм у глибину. Використаними параметрами зварювання були швидкість зварювання 5 мм/с і сила зварювального струму 100 А. Зона ремонту була попередньо нагріта до певної температури T_p , а час між послідовними проходами зварювання контролювався, щоб запобігти охолодженню металу нижче від температури попереднього нагріву.

Скінченно-елементний аналіз кінетики температурного поля, фазових перетворень, розподілу водню та НДС, виконаний для умов ремонтного зварювання МГ, показав суттєву просторову неоднорідність відповідних фізичних полів у зоні ремонту [35]. Це обґрунтовує доцільність застосування інтегрального ймовірнісного критерію холодно розтріскування, який дозволяє враховувати як фізичну складність процесу, так і технологічні особливості ремонту, підвищуючи точність оцінювання ризику тріщиноутворення. Аналіз критерію (24) підтвердив його ефективність для оцінки ймовірності зародження холодних тріщин [36]. Початковий вміст дифузійного водню є ви-

значальним фактором підвищення ризику зародження холодних тріщин: його зростання може збільшувати ймовірність тріщиноутворення в декілька разів (рис. 22, а). Водночас попереднє підігрівання зони ремонту до $\sim 100^\circ\text{C}$ суттєво знижує ризик, забезпечуючи значення ймовірності не вище за $5 \cdot 10^{-3}$ у широкому діапазоні концентрацій водню, що узгоджується з чинними нормативними вимогами. Додатково залежність ймовірності холодно розтріскування від температури попереднього нагріву при концентрації дифузійного водню $V_H = 20$ мл/100 г демонструє найбільшу ефективність підігрівання до $\sim 80^\circ\text{C}$ (рис. 22, б). Це підкреслює важливу роль оптимізації температурних режимів ремонту для забезпечення надійності зварних з'єднань.

Для практичного застосування результати доцільно подавати у вигляді діаграм залежності ризику холодно розтріскування від вмісту дифузійного водню та температури попереднього підігрівання зони ремонту. Такі діаграми дозволяють визначати умови досягнення заданого рівня ймовірності холодно розтріскування ($10^{-5} \dots 10^{-4}$) (рис. 23). Отримані результати свідчать, що вико-

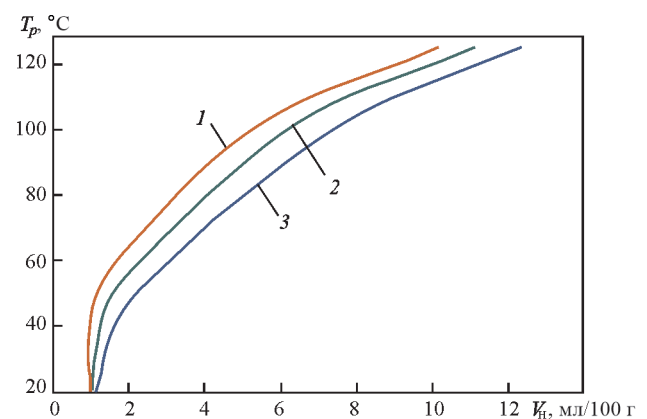


Рис. 23. Розрахункові залежності між температурою попереднього підігрівання T_p зони ремонту та вмістом дифузійного водню V_H у трубі для різних допустимих ймовірностей холодно розтріскування: 1 – $1 \cdot 10^{-4}$, 2 – $5 \cdot 10^{-5}$, 3 – $1 \cdot 10^{-5}$

ристання ГТС для транспортування газоводневих сумішей потребує перегляду нормативних підходів до ремонтних технологій і критеріїв забезпечення цілісності конструкцій.

Перспективи розвитку цифрово-інтелектуального управління цілісністю ГТС України. Подальший розвиток тематики науково-обґрунтованого та адаптивного управління цілісністю ГТС України в умовах декарбонізації та переходу до парадигми Індустрії 4.0/5.0 неможливо розглядати без переходу до повністю цифрової інтегрованої, сенсоронасиченої та автономнокерованої інфраструктури. У межах цієї еволюції ГТС трансформується з об'єкта періодичного інженерного контролю у безперервно діючу кіберфізичну систему, де рішення формуються на основі потоків даних у реальному часі, багаторівневого моделювання та інтелектуальної аналітики.

Ключовим технологічним драйвером такої трансформації є широкомасштабне впровадження систем автоматизованого моніторингу технічного стану об'єктів ГТС, включаючи розподілені сенсорні мережі, акустичні та волоконно-оптичні системи контролю, датчики корозійного потенціалу, деформацій, температури та водневого насичення. Інтеграція цих даних у єдину цифрову платформу забезпечує формування безперервного інформаційного поля про стан трубопровідної системи, компресорних станцій і підземних сховищ газу, що є базою для реалізації концепції цифрових двійників критичної інфраструктури.

Цифрові двійники у даному контексті розглядаються не як статична модель, а як динамічна багаторівнева система, яка синхронізується з реальним об'єктом через потоки сенсорних даних і дозволяє в режимі прогнозного моделювання оцінювати розвиток деградаційних процесів, включаючи корозійно-водневі механізми, накопичення пошкодженої, втому та зміну напружено-деформованого стану. Це створює основу для переходу до предиктивного та проактивного управління цілісністю.

Важливою складовою такої системи є роботизація ремонтно-відновлювальних операцій на діючих трубопроводах із мінімальним залученням персоналу до небезпечних зон. Застосування дистанційно керованих зварювальних комплексів, роботизованих платформ для наплавлення та систем автоматичного контролю якості зварних з'єднань дозволяє реалізувати концепцію «zero-human-exposure maintenance», що безпосередньо відповідає принципам людиноцентричної Індустрії 5.0.

Інтернет речей (IoT) виступає технологічним каркасом такої архітектури, забезпечуючи зв'язок

між польовими пристроями, аналітичними центрами та системами прийняття рішень. У поєднанні з методами машинного навчання та фізично обґрунтованого моделювання це створює можливість формування адаптивних стратегій експлуатації, де параметри режимів роботи ГТС, інтервали технічного обслуговування та вибір ремонтних технологій корегуються в реальному часі залежно від фактичного та прогнозного стану системи.

Таким чином, подальший розвиток досліджуваної проблематики полягає у формуванні єдиної кіберфізичної екосистеми управління цілісністю ГТС, в якій автоматизований моніторинг, цифрові двійники, IoT-інфраструктура та роботизовані технології ремонту інтегруються в єдину логіку життєвого циклу об'єкта. Це забезпечує перехід від реактивного обслуговування до інтелектуально керованої та безпекоорієнтованої експлуатації критичної енергетичної інфраструктури.

Висновки

1. Сформовано цілісну наукову концепцію забезпечення стійкості, живучості та функціональної надійності ГТС України як багаторівневої інтегрованої інфраструктури, що об'єднує МГ, компресорні станції та підземні сховища газу в єдину взаємопов'язану систему. На відміну від традиційних підходів, орієнтованих на аналіз окремих елементів у стаціонарних умовах, запропонована концепція враховує системну взаємодію технологічних, енергетичних і надійнісних факторів в умовах реверсних режимів, неповного завантаження, циклічних змін експлуатації та аномальних впливів, зумовлених воєнними та енергетичними викликами. Це формує наукове підґрунтя адаптивного управління ГТС у логіці Індустрії 4.0/5.0, де цифровізація та інтелектуалізація є базовими механізмами забезпечення стійкості критичної інфраструктури.

2. Розвинено наукові засади корозійно-механічної надійності МГ в умовах катодного захисту та тривалої експлуатації, що забезпечило перехід від емпіричних і нормативно-орієнтованих критеріїв до фізично обґрунтованого опису деградаційних процесів. Запропонований підхід поєднує електрохімічну діагностику, експрес-моделювання деградації та критерії граничного стану матеріалу, що дозволяє підвищити точність прогнозування механічних властивостей і ризиків розвитку дефектів у межах експлуатаційного життєвого циклу.

3. Розвинено фундаментальні положення континуальної механіки суцільного середовища в частині поєднання механіки в'язкого руйнування та

термодеформування, сформульовано новий клас методів експертного оцінювання технічного стану та ризику руйнування трубопровідних систем. На відміну від класичних підходів, заснованих на спрощених критеріях міцності, запропонована методологія враховує багатофакторну взаємодію термомеханічних, пошкоджувальних і технологічних процесів, включаючи вплив монтажного та ремонтного зварювання, пластичної нестійкості та мікромеханізмів втрати суцільності, що суттєво розширює можливості інженерної експертизи складних дефектних станів, дозволяє індивідуалізувати прийняття рішень щодо надійності та порядку обслуговування МГ.

4. Реалізовано комплекс технологій відновлення МГ без виведення їх із експлуатації, включаючи підсилення зварними муфтами, багатопрхідне наплавлення. Це розширює експлуатаційні можливості експлуатації ГТС у складних умовах і зменшує потребу в капітальній заміні елементів інфраструктури. Отримані результати формують технологічну основу ремонтно-відновлювальних рішень нового покоління, що відповідають принципам Індустрії 4.0/5.0, зокрема підвищенню ефективності, безпеки та екологічності.

5. Сформовано новий науковий напрям фізико-хімічної механіки деградації та руйнування конструкційних матеріалів МГ, у межах якого реалізовано комплексний аналіз взаємопов'язаних корозійно-водневих, деформаційних і структурно-механічних процесів у тривало експлуатованих сталях. Це створює науково-методологічну основу для переходу до фізично обґрунтованого, ризик-орієнтованого та адаптивного прогнозування ресурсу та безпеки трубопровідних систем, включаючи перспективні сценарії транспортування газо-водневих сумішей.

Список літератури/References

- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., Wang, L. (2021) Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception. *J. of Manufacturing Systems*, **61**, 530–535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Elijah, O., Ling, P., Rahim, S. et al. (2021) A survey on Industry 4.0 for the oil and gas industry: Upstream sector. *IEEE Access*, **9**, 144438–144468. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3121302>
- Khan, F., Yarveisy, R., Abbassi, R. (2021) Risk-based pipeline integrity management: A road map for the resilient pipelines. *J. of Pipeline Sci. and Engineering*, **1**(1), 74–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.02.001>
- Wanasinghe, T.R., Wroblewski, L., Petersen, B.K. et al. (2020) Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE Access*, **8**, 104175–104197. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998723>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Fathi, M. et al. (2025) Beyond Industry 4.0: A systematic review of Industry 5.0 technologies and implications for social, environmental and economic sustainability. *Asia-Pacific J. of Business Administration*, **17**(4), 889–914. DOI: <https://doi.org/10.1108/APJBA-08-2023-0384>
- Okirie, A., Frank, L.E., Ozuru, O.N. (2025) Leveraging Industry 5.0 technologies for building resilience and sustainability in the oil and gas industry. *American J. of IR 4.0 and Beyond*, **4**(1), 17–28. DOI: <https://doi.org/10.54536/ajirb.v4i1.3718>
- Majstorovic, V. (2022) Application of Industry 4.0 model in oil and gas companies. *J. of Engineering Management and Competitiveness*, **12**(1), 77–84. DOI: <https://doi.org/10.5937/jemc2201077m>
- Wang, T., Feng, K., Ling, J. et al. (2024) Pipeline condition monitoring towards digital twin system: A case study. *J. of Manufacturing Systems*, **73**, 256–274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.02.006>
- Okirie, A., Lawson, E.F., Ozuru, N.O. (2026) Integrating Industry 4.0 and 5.0 technologies for sustainable, resilient oil and gas production operations. *Advanced Manufacturing Research*, **4**(1), 1–24. DOI: <https://doi.org/10.21595/amr.2026.25525>
- Ковалко М.П., Грудз В.Я. та ін. (2002) *Трубопровідний транспорт газу*. Київ, АренаЕКО.
- Kovalko, M.P., Grudz, V.Ya. et al. (2002) *Pipeline gas transport*. Kyiv, ArenaEKO [in Ukrainian].
- Грудз В.Я., Грудз Я.В., Тимків Д.Ф., Запукхляк В.Б. (2019) Оптимізація режимів роботи складних газотранспортних систем в умовах їх неповного завантаження. *Нафтогазова галузь України*, **1**, 26–31. https://www.naftogaz.com/ckeditor_assets/Галузевий%20журнал/Journal-Naftogazova-galuz-01-2019.pdf
- Grudz, V.Ya., Grudz, Ya.V., Tymkiv, D.F., Zapukhliak, V.B. (2019) Optimization of the operating modes of complex gas transportation systems under the conditions of their incomplete loading. *Oil and Gas Industry of Ukraine*, **1**, 26–31 [in Ukrainian]. https://www.naftogaz.com/ckeditor_assets/Галузевий%20журнал/Journal-Naftogazova-galuz-01-2019.pdf
- Grudz, V., Zapukhliak, V., Hryhoriyskiy, S. et al. (2024) Probability optimization for ensuring the reliability of natural gas distribution systems. *Procedia Structural Integrity*, **59**, 757–762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.108>
- Lindgren, L.-E. (2007) *Computational welding mechanics. Thermomechanical and microstructural simulations*. Woodhead Publishing Limited.
- Lemaitre, J., Desmorat, R. (2005) *Engineering damage mechanics. Ductile, creep, fatigue and brittle failures*. Berlin, Springer-Verlag.
- Milenin, O., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2023) Novel approach for numerical evaluation of limiting state and reliability of corroded pipelines under in-service repair welding. *Welding in the World*, **67**(10), 373–379. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01543-1>
- Milenin, O., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Residual strength and reliability of corroded pipelines—monte-carlo approach for consideration of spatially nonuniform material properties. In: *Proc. of the Second Intern. Conf. on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics*. Ed by E. Gdoutos. ICTAEM 2019. Springer, Cham. *Structural Integrity*, **8**, 321–326. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21894-2_59
- Milenin, O. (2017) Numerical prediction of the current and limiting states of pipelines with detected flaws of corrosion wall thinning. *J. of Hydrocarbon Power Engineering*, **4**(1), 26–37. <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/6387/1/5884p.pdf>
- Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *Intern. J. of Pressure Vessels and Piping*, **171C**, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
- Ниркова Л.І., Осадчук С.О. (2023) *Корозійне розтріскування сталей магістральних газопроводів: Оцінювання та запобігання*. Київ, Наукова думка.
- Nyrkova, L.I., Osadchuk, S.O. (2023) *Stress corrosion cracking of main gas pipeline steels: Assessment and prevention*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Nyrkova, L.I. (2020) The influence of external and internal factors on stress corrosion cracking of low-alloyed pipe steel.

- J. of Hydrocarbon Power Engineering*, 7(1), 8–15. DOI: [https://doi.org/10.31471/2311-1399-2020-1\(13\)-8-15](https://doi.org/10.31471/2311-1399-2020-1(13)-8-15)
21. Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Milenin, A., Pivtorak, N. (2015) Evaluation of operability of the main pipeline with local wall thinning at repair by arc surfacing. *The Paton Welding J.*, 1, 18–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.01.03>
22. ГБН В.3.1-00013741-12:2011. *Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації*. GBN V.3.1-00013741-12:2011. *Main gas pipelines. Arc welding repair under operating conditions* [in Ukrainian].
23. Makhnenko, V.I., Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S. et al. (2011) Admissible pressure for filler of sealed sleeves used to repair main pipelines. *The Paton Welding J.*, 8, 22–26. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2011/pdfarticles/08/8.pdf>
24. Demianchuk, D.O., Tsyurulnyk, O.T., Solovei P.R. et al. (2025) The influence of operation and notch orientation on the impact toughness of API 5L X67 steel. *Mater. Sci.*, 61(2), 249–255. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00986-9>
25. Zvirko, O.I., Savula, S.F., Tsependa, V.M. et al. (2016) Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength. *Procedia Structural Integrity*, 2, 509–516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.066>
26. Tsyurulnyk, O.T., Kret, N.V., Voloshyn, V.A., Zvirko, O.I. (2018) A procedure of laboratory degradation of structural steels. *Mater. Sci.*, 53(5), 674–683. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0123-1>
27. Греділь М.І., Никифорчин Г.М., Цирульник О.Т., Штойко І.П. (2018) *Спосіб визначення опору металевих конструкційних матеріалів водневому окрихченню*. Патент на корисну модель №127310. № U 2018 01845. Заявл. 23.02.2018. Опубл. 25.07.2018. Бюл. № 14.
- Hredil, M.I., Nykyforchyn, H.M., Tsyurulnyk, O.T., Shtoiiko, I.P. (2018) *Method for determining the resistance of metallic structural materials to hydrogen embrittlement*. Utility model patent 127310, U201801845, fill. 23.02.2018, publ. 25.07.2018 [in Ukrainian].
28. Никифорчин Г.М., Пустовий В.М., Слободян З.В. та ін. (2018) *Спосіб гальмування росту втомної тріщини*. Патент на корисну модель № 128514. № U 2018 02248. Заявл. 05.03.2018. Опубл. 25.09.2018. Бюл. № 18.
- Nykyforchyn, H.M., Pustovyi, V.M., Slobodian, Z.V. et al. (2018) *Method for retarding fatigue crack growth*. Utility model patent 128514, U201802248, fill. 05.03.2018, publ. 25.09.2018 [in Ukrainian].
29. Zvirko, O., Mytsyk, B., Nykyforchyn, H. Et al. (2023) Application of the various methods for assessment of in-service degradation of pipeline steel. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 30(24), 5058–5067. DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2111732>
30. Nykyforchyn, H., Tsyurulnyk, O., Zvirko, O., Krechkovska, H. (2019) Non-destructive evaluation of brittle fracture resistance of operated gas pipeline steel using electrochemical fracture surface analysis. *Engineering Failure Analysis*, 104, 617–625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.037>
31. Nykyforchyn, H., Tsyurulnyk, O., Zvirko, O., Hredil, M. (2020) Role of hydrogen in operational degradation of pipeline steel. *Procedia Structural Integrity*, 28, 896–902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.060>
32. Nykyforchyn, H., Zvirko, O., Dzioba, I. et al. (2021) Assessment of operational degradation of pipeline steels. *Materials*, 14(12), 3247. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123247>
33. Milenin, O., Velykoivanenko, O., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2025) Numerical assessment of cold crack susceptibility of X65 pipe steel during in-service repair welding of pipeline in transportation of gas-hydrogen blends. *Procedia Structural Integrity*, 68, 1010–1016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.06.163>
34. Milenin, O., Velykoivanenko, O., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2023) Numerical analysis of brittle strength of welded pipelines with corrosion metal loss in transportation of blends of natural gas with hydrogen. *Welding in the World*, 67(12), 2803–2809. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01612-5>
35. Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. (2024) Чисельний аналіз закономірностей впливу деградації трубної сталі на надійність кородованих магістральних газопроводів при транспортуванні газоводневих сумішей. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 8–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.01.02>
- Milenin, O.S., Velykoivanenko, O.A., Rozyinka, G.P., Pivtorak, N.I. (2024) Numerical analysis of the regularities of the influence of pipe steel degradation on the reliability of corroded main gas pipelines used for transportation of gas-hydrogen mixtures. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 1, 8–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.01.02>
36. Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. (2023) Чисельна оцінка крихкої міцності монтажних зварних швів магістральних газопроводів при транспортуванні газоводневих сумішей. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.01.03>
- Milenin, O.S., Velykoivanenko, O.A., Rozyinka, G.P., Pivtorak, N.I. (2023) Numerical assessment of brittle strength of field welds of the main gas pipelines at transportation of gas-hydrogen mixtures. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 1, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.01.03>

ADAPTIVE INTEGRITY MANAGEMENT OF THE UKRAINIAN GAS TRANSMISSION SYSTEM IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0/5.0 PARADIGM

S.Yu. Maksymov¹, O.I. Zvirko², O.S. Milenin¹, L.I. Nyrkova¹, I.I. Chudyk³, V.B. Zapukhliak³, V.V. Rudko⁴

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: asmilenin@ukr.net

²G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: olha.zvirko@gmail.com

³Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 15 Karpatska str., 76019, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

E-mail: i.chudyk@nung.edu.ua

⁴JSC «Ukrtransgaz». 9/1 Klovskyi Uzviz, 01021, Kyiv, Ukraine.

This work advances a scientifically substantiated concept of adaptive integrity management for the Ukrainian gas transmission system under the transition to the Industry 4.0/5.0 paradigm and increasingly complex operating conditions, including wartime impacts, decarbonization of the energy sector, and the prospective transportation of hydrogen–natural gas blends. A systematic life-cycle assessment framework for gas transmission system assets is proposed, integrating physics-based modelling, probabilistic reliability assessment methods, and innovative technologies for restoring the technical condition. A multi-level integrity management architecture is presented, encompassing system-level optimization of operating regimes, individualized assessment of defective pipeline sections based on finite element modelling, Weibull analysis, and Monte Carlo simulation, as well as prediction of degradation processes as a key component of predictive maintenance. Particular attention is devoted to the adaptation of repair technologies to the current technical condition of structures, taking into account corrosion–hydrogen degradation mechanisms and localized stress–strain states. 36 Ref., 1 Tabl., 23 Fig.

Keywords: gas transmission system, adaptive integrity management, Industry 4.0, Industry 5.0, predictive maintenance, finite element modelling, hydrogen degradation, corrosion cracking, repair

ORCID

Максимов С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>, Звірко О.І. – <https://orcid.org/0000-0002-6973-6804>,
Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Ниркова Л.І. – <https://orcid.org/0003-3917-9063>,
Чудик І.І. – <https://orcid.org/0000-0002-7402-6962>, Запущляк В.Б. – <https://orcid.org/0000-0002-2502-3896>,
Рудко В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0856-2898>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

О.С. Міленін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: asmilenin@ukr.net

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.Ю. Максимов, О.І. Звірко, О.С. Міленін, Л.І. Ниркова, І.І. Чудик, В.Б. Запущляк, В.В. Рудко (2026) Адаптивне управління цілісністю газотранспортної системи України в контексті парадигми Індустрії 4.0/5.0. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **03**, 3–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.03.01>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 07.07.2026

Отримано у переглянутому вигляді 10.08.2026

Підписано до друку 06.09.2026

Оприлюднено 22.09.2026



АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТНИХ ДІЛЯНОК БАГАТОШАРОВОЇ ТОНКОСТІННОЇ КОНСТРУКЦІЇ З ПЕРІОДИЧНОЮ СТРУКТУРОЮ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Л.М. Лобанов, І.Л. Шкурат, О.П. Шуткевич, І.В. Киянець, В.В. Савицький

ІЕЗ ім. Патона Є.О. НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: innashkurat2909@gmail.com

У роботі застосовано методи моделювання та аналізу даних для виявлення та оцінювання деформацій у тонкостінних конструкціях, зокрема у зварних багатошарових панелях. Використання методу скінченних елементів дозволило встановити характерні просторові профілі деформації та їхній зв'язок із локалізацією дефектів. Методи Фур'є-аналізу та диференціального числення використано для розроблення алгоритму автоматизованого пошуку дефектних ділянок у тонкостінних конструкціях. Показано, що використання похідної переміщень $\partial w / \partial u$ забезпечує чіткішу локалізацію дефектів порівняно з аналізом лише переміщень. Це обґрунтовує доцільність застосування методу ширографії як одного з найінформативніших підходів неруйнівного контролю таких конструкцій. Отримані результати підтверджуються як чисельними, так і експериментальними даними, що свідчить про придатність методики для діагностики широкого класу тонкостінних конструкцій. Бібліогр. 19, рис. 14.

Ключові слова: тонкостінні конструкції, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, Фур'є-аналіз, неруйнівний контроль якості, лазерна інтерферометрія, ширографія, автоматизований пошук дефектів

Вступ. Металеві багатошарові тонкостінні конструкції панельного типу (зварні панелі) широко застосовуються в авіабудуванні, автомобілебудуванні, суднобудуванні та інших галузях машинобудування. Такі конструкції вирізняються високою питомою міцністю та жорсткістю за відносно невеликої маси, що досягається завдяки раціональному розподілу матеріалу між шарами та елементами панелі. Крім того, панельна конструкція забезпечує технологічність виготовлення великогабаритних елементів складної форми та дає змогу локально підсилювати найбільш навантажені ділянки без суттєвого збільшення загальної маси виробу [1, 2].

Одним із найпоширеніших способів з'єднання елементів таких конструкцій є точкове зварювання, яке вирізняється високою продуктивністю та легкістю автоматизації. Застосування точкового зварювання дозволяє отримати металоконструкції з високою міцністю та мінімальними залишковими деформаціями порівняно з конструкціями, виконаними суцільними зварними швами [3].

Враховуючи специфіку формування зварної точки, а саме: короткочасність процесу, локальний нагрів і швидке охолодження, цей тип з'єднань вирізняється високою ймовірністю виникнення прихованих дефектів. Зокрема можливе утворення непроварів, руйнування ядра зварної точки, відшпа-

рування та інших дефектів, які істотно знижують експлуатаційну надійність конструкції.

Оскільки такі дефекти не можуть бути виявлені під час візуального контролю, а їхня наявність безпосередньо впливає на експлуатаційну надійність конструкції, особливої актуальності набуває застосування різних методів неруйнівного контролю якості для своєчасної ідентифікації дефектів [4–7].

Серед традиційних підходів до контролю зварних точкових з'єднань застосовують ультразвуковий, вихрострумний, рентгенографічний та інші методи неруйнівного контролю [8–10]. Проте їхнє застосування під час контролю великогабаритних панельних конструкцій із великою кількістю зварних точок має обмежену продуктивність, що пов'язано з необхідністю послідовного обстеження окремих зварних з'єднань.

Серед існуючих методів неруйнівного контролю одними з найефективніших є методи лазерної інтерферометрії, зокрема голографічна інтерферометрія, спекл-інтерферометрія та ширографія [11–14]. Ці методи ґрунтуються на реєстрації та подальшому аналізі даних про деформацію точок поверхні досліджуваного об'єкта, що виникають під дією зовнішнього навантаження. Завдяки високій чутливості до локальних змін напружено-деформованого стану ці методи дозволяють виявляти приховані дефекти, які складно ідентифікувати за допомогою традиційних (контактних) методів контролю. Безконтактність і висока просторова роздільна здатність цих методів дозволяють отри-

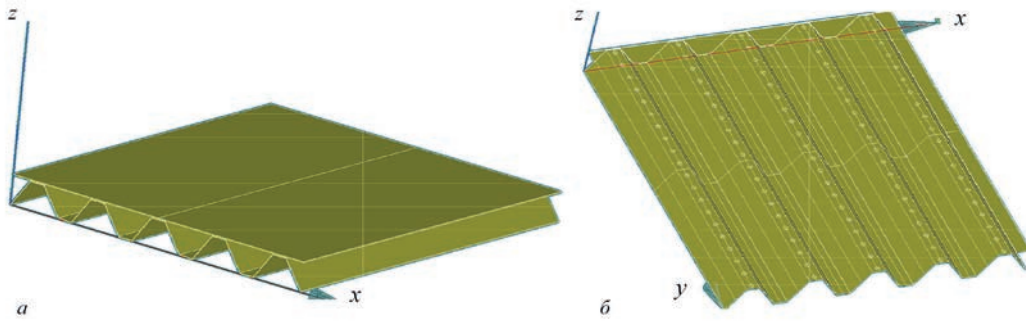


Рис. 1. Геометрична модель зварної конструкції: *а* – вигляд із лицьової сторони, *б* – вигляд зі сторони гофрованого заповнювача

мувати повноформатні карти деформацій поверхні та забезпечують можливість автоматизованого контролю тонкостінних конструкцій.

Незважаючи на високу інформативність і чутливість методів лазерної інтерферометрії, аналіз отриманих результатів у більшості випадків виконується оператором вручну. Це знижує продуктивність контролю та підвищує залежність результатів діагностики від кваліфікації й суб'єктивного досвіду спеціаліста [11–14]. Особливо це стосується контролю конструкцій складної форми або конструкцій з періодичною структурою, де локальні зміни поля деформацій можуть бути малопомітними на фоні загального розподілу переміщень, що ускладнює достовірне визначення місцезнаходження дефектної ділянки за результатами візуального аналізу поля деформацій поверхні об'єкта.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення методу автоматичного пошуку та локалізації дефектів у тонкостінних конструкціях під час неруйнівного контролю якості оптичними методами. Реалізація такого підходу дозволить знизити суб'єктивний вплив оператора та підвищити точність локалізації дефектів. Відомі підходи до автоматизованого пошуку дефектів у регулярних тривимірних структурах базуються на математичному моделюванні та розв'язанні задач оптимізації параметрів конструкції [15]. На відміну від них, у даній роботі запропоновано алгоритм автоматизованого визначення дефектних ділянок конструкцій з періодичною структурою за результатами ширографічного контролю, який ґрунтується на Фур'є-аналізі профілю деформування поверхні, формуванні еталонної бездефектної ділянки та обчисленні кількісної оцінки відхилення профілю деформації.

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану зварної панелі методом скінченних елементів. Для моделювання напружено-деформованого стану (НДС), який виникає в процесі неруйнівного контролю якості при різних видах навантаження, було використано метод скінченних елементів. У якості об'єкта дослі-

дження обрано двохшарову зварну конструкцію, що складається з обшивки та гофрованого заповнювача трапецієподібного профілю, з'єднаних методом точкового зварювання. Заповнювач має періодичну форму: прямолінійні ділянки по чергово контактують із верхньою обшивкою та з умовною площиною нижньої обшивки. Панель розміром $800 \times 600 \times 50$ мм виготовлена зі сталі Ст3 завтовшки 2 мм, діаметр зварних точок становить ~ 6 мм. Побудовано тривимірну модель, яка використовується при чисельному моделюванні НДС методом скінченних елементів (рис. 1).

Задача розв'язувалася у тривимірній постановці в рамках слабко зв'язаної лінійної термопружності без урахування пластичних деформацій та без залежності властивостей матеріалу від температури. На першому етапі визначався розподіл температур $T(x, y, z, t)$ із рівняння теплопровідності $\rho c \partial T / \partial t = \text{div}(\lambda \text{grad } T)$ при накладеному тепловому потоці на одній стороні панелі (гранична умова другого роду, закон Фур'є) та початковій температурі, що відповідає кімнатній ($T_0 \approx 293$ К). Отримане поле температур використовувалося як теплове навантаження в задачі пружної рівноваги $\text{div}(\sigma) = 0$, де σ – тензор напружень. Напруження визначалися із закону Гука для лінійно-пружного ізотропного матеріалу з урахуванням теплової деформації: $\sigma = E(\epsilon - \alpha \Delta T)$, де ϵ – відносна деформація, α – коефіцієнт лінійного теплового розширення, $\Delta T = T - T_0$ – зміна температури відносно початкового стану.

Матеріал панелі (сталь Ст3) моделювався як лінійно-пружний ізотропний з наступними властивостями: модуль пружності $E = 200$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 50$ Вт/(м·К), питома теплоємність $c = 470$ Дж/(кг·К), густина $\rho = 7850$ кг/м³. Коефіцієнти E і ν визначають пружні властивості матеріалу в тривимірній постановці задачі.

Граничні умови задавалися окремо для механічної й теплової частин задачі. На ділянках за-

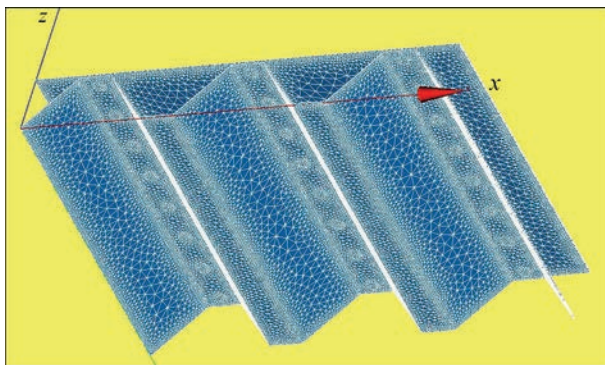


Рис. 2. Скінченно-елементна сітка спрощеної моделі зварної панелі

повнювача, що в повній конструкції контактують із нижньою обшивкою (яку для спрощення моделі виключено з розрахункової області), накладалися: механічна умова повного закріплення ($u = v = w = 0$), що імітує опору конструкції на нижню обшивку; тепла умова першого роду – стала температура $T = T_0$ (кімнатна), що моделює нижню обшивку як тепловий стік. Додатково задавалася фіксація бічних граней у напрямку осі OY . Теплове навантаження у вигляді теплового потоку прикладалося до зовнішньої поверхні верхньої обшивки; решта поверхонь конструкції вважалися теплоізованими.

Для генерації скінченно-елементної сітки використовувалося середовище SALOME [16], а розрахунок теплового та напружено-деформованого станів проводився за допомогою комплексу

Code_Aster [17]. Розбиття конструкції на елементи виконано з формуванням тривимірної тетраедральної сітки (рис. 2). Розмір елементів сітки варіювався по об'єму конструкції: базовий крок дискретизації становив 0,5 мм, при цьому в зоні зварних точок, де спостерігається зміна кривизни поверхні та геометрії з'єднання, алгоритм автоматично формував щільнішу сітку з дрібнішими елементами порівняно з рештою конструкції.

Термічне навантаження моделювали шляхом нагрівання верхньої поверхні зварної конструкції тепловим потоком потужністю $Q_0 = 8000 \text{ Вт/м}^2$ протягом часу $t_0 = 10 \text{ с}$. Розподіл зміни температури, що формується в конструкції у результаті такого термічного навантаження, зображено на рис. 3, де спостерігається локальний мінімум значень зміни температури в околі зварних точок. Це пояснюється наявністю ядер зварних точок, які мають підвищену теплопровідність порівняно з прилеглими ділянками конструкції та забезпечують інтенсивніший тепловідвід. Така нерівномірність температурного поля призводить до нерівномірної деформації поверхні зварної панелі.

Проведено моделювання розподілу значень w (нормальної компоненти переміщення точок аналізу на поверхні конструкції) у точках конструкції. Уздовж перерізу I не спостерігається суттєвих локальних максимумів, за допомогою яких можна оцінити наявність і діаметр ядер зварних точок (рис. 4).

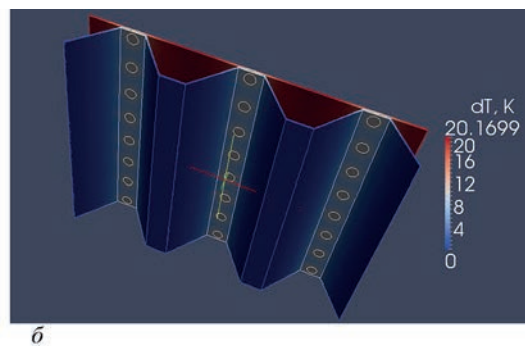
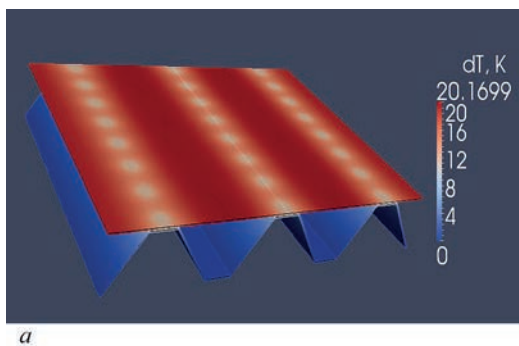


Рис. 3. Розподіл зміни температури у конструкції у результаті термічного навантаження: а – вигляд з лицьової сторони, б – вигляд зі сторони середнього шару конструкції

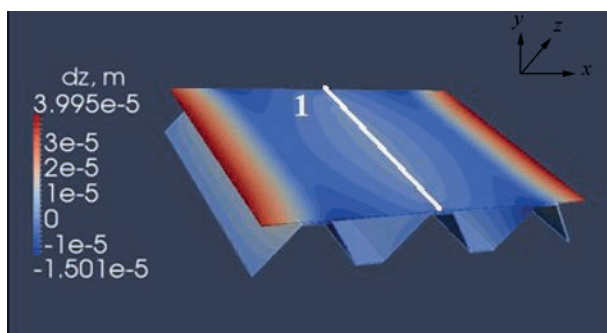


Рис. 4. Розподіл переміщень у панелі без дефектів зварювання

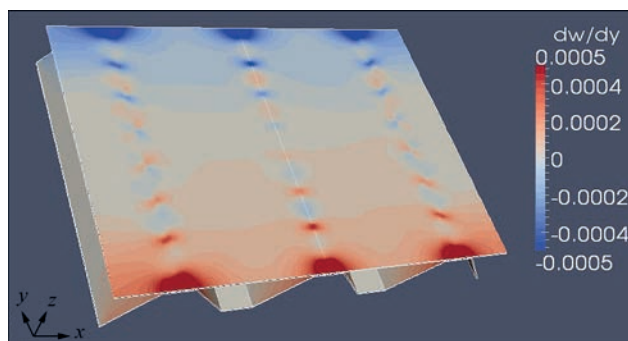


Рис. 5. Розподіл похідної переміщень точок поверхні зварної панелі при її термічному навантаженні

Профіль зміни компоненти $w(y)$, побудований за даними про переміщення вздовж перерізу I , дозволяє визначити місцезнаходження зварних точок, але амплітуда збурень деформації навколо них є різною, що не дозволяє оцінити діаметр ядра окремої зварної точки.

На рис. 5 наведено розподіл $\partial w/\partial y$ (похідної переміщення w за координатою y вздовж досліджуваного перерізу конструкції), на якому координати зварних точок проявляються чіткіше порівняно з рис. 4. Таким чином, для такого типу конструкцій використання методу широгографії, який реалізує оптичне диференціювання поля переміщень, є доцільнішим у порівнянні з методами спекл-кореляції, спекл- та голографічної інтерферометрії. Аналіз цього розподілу дає змогу оцінити вплив кожної зварної точки на загальне поле деформацій зовнішньої поверхні конструкції. Однак ця картина дозволяє лише якісно оцінювати дефектність тієї чи іншої зварної точки.

Більш інформативною є крива зміни похідної $\partial w/\partial y$, побудована вздовж перерізу I , що проходить через центри зварних точок. Аналіз цієї залежності дає змогу визначити їхнє місцезнаходження. Однак амплітуда локальних збурень деформації в околі окремих точок є різною, що ускладнює оцінювання діаметра ядра окремої зварної точки. На рис. 6 наведено розподіл компоненти переміщення w та її похідної $\partial w/\partial y$ уздовж цього перерізу. Аналіз отриманих залежностей показує, що ядра зварних точок проявляються у вигляді локальних мінімумів. Графік складається з частин, які повторюються та відповідають геометричним частинам конструкції. На відміну від компоненти переміщення w , для якої спостерігається суттєвий вплив крайового ефекту, розподіл похідної $\partial w/\partial y$ є рівномірнішим. Крайовий ефект змінює картину деформування на ділянках, які знаходяться біля початку та кінця конструкції.

Проведено моделювання впливу діаметра ядра зварної точки на переміщення w та похідну переміщення в зварній панелі уздовж обраного на-

прямку y при термічному навантаженні. Для цього було додано дефектні зварні точки, в яких було відсутнє якісне з'єднання, та проведено дослідження їхнього впливу на деформування поверхні об'єкта (рис. 7).

Моделювання показало, що в результаті термічного навантаження конструкції, яке виконано аналогічно експериментам при широгографічному контролі якості, проявляється складна картина деформування. Причому амплітуда w та $\partial w/\partial y$ у дефектних точках не перевищує амплітуду в сусідніх точках. Даний факт ускладнює процес виявлення дефектів, а також призводить до обов'язкової участі висококваліфікованого оператора при неруйнівному контролі якості.

Методика автоматизованого визначення місця розташування дефектів за даними деформації поверхні при навантаженні конструкції. Основною метою розробленого алгоритму є автоматизоване визначення місцезнаходження ділянок конструкції, деформація в яких суттєво відрізняється від середньої деформації ділянок у профілі. Оскільки профіль деформування поверхні конструкції P об'єкта дослідження має періодичну структуру, для визначення його періоду доцільно використовувати дискретне перетворення Фур'є (Discrete Fourier Transform, DFT), яке є одним із базових методів, що широко застосовується в алгоритмах цифрової обробки сигналів [18], а також в інших областях, пов'язаних із аналізом частот у дискретному сигналі.

У результаті Фур'є-перетворення можна отримати дані про кількість повторюваних ділянок N (кількість періодичних ділянок, що увійшли у профіль). Знаючи загальну довжину досліджуваного профілю конструкції l і загальну кількість дискретних точок N_0 , що припадає на довжину профілю, можна отримати значення періоду структурних неоднорідностей конструкції T і кількість точок N_1 , які припадають на один період T .

Після розбиття конструкції на ділянки завдовжки T визначається еталонна бездефектна ділянка

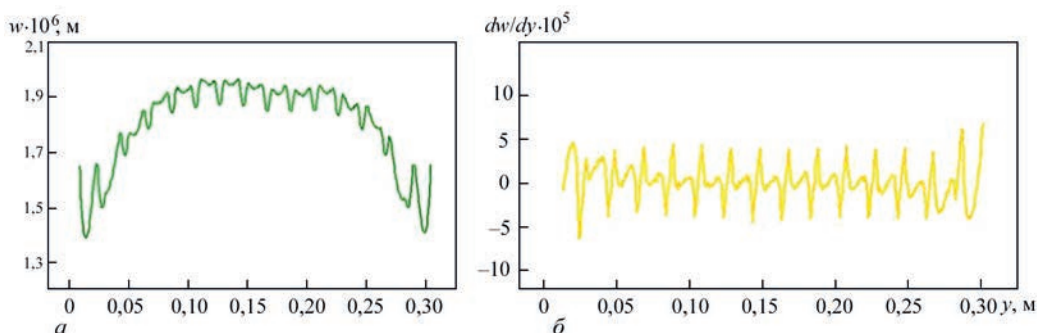


Рис. 6. Розподіл переміщень w (а) та похідної $\partial w/\partial y$ (б) уздовж перерізу I при термічному навантаженні тришарової панелі

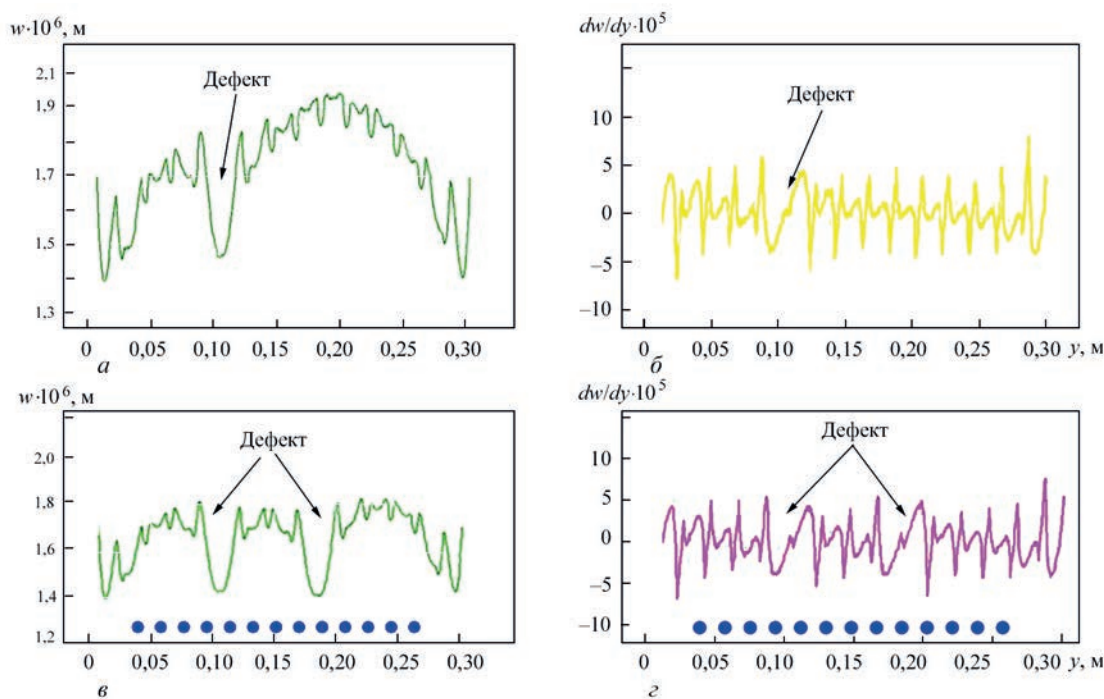


Рис. 7. Залежності переміщень w та її похідної $\partial w/\partial y$ у зварній панелі з однією (а, б) та двома дефектними зварними точками (в, з). Синім позначено положення зварних точок

профілю P_e за допомогою усереднення або за алгоритмом медіанної фільтрації. Обчислення значень компонент вектору переміщень вздовж P_e здійснюється на основі припущення, що кількість дефектних зварних точок у конструкції мала порівняно з їхньою загальною кількістю.

При усередненні враховуються всі точки $i = 1 \dots N_1$ на кожній ділянці конструкції (рис. 8) і обчислюється середнє значення функції в цих точках. Це значення відповідає значенню функції на еталонній бездефектній ділянці в i -й точці.

Другий метод, який можна застосувати для визначення еталонної бездефектної ділянки – це медіанна фільтрація. Медіанні фільтри часто використовуються на практиці як засіб попередньої обробки цифрових даних [19]. Специфічною особливістю фільтру є явно виражена вибірковість щодо елементів масиву, які різко виділяються на тлі сусідніх відліків. У той же час на монотонну складову послідовності медіанний фільтр не діє, залишаючи її без змін. Завдяки цій особливості,

медіанні фільтри при оптимально обраній апертурі можуть, наприклад, зберігати без спотворень різкі межі об'єктів, ефективно пригнічуючи некорельовані або слабо корельовані шуми та дрібні деталі. Ця властивість дозволяє застосовувати медіанну фільтрацію для усунення аномальних значень у масивах даних і зменшення імпульсних шумів.

Медіаною числової послідовності $x_1, x_2, \dots, x_n$ при непарному n є середнє за значенням число ряду, отримане при упорядкуванні цієї послідовності за зростанням (або спаданням). Для парних n медіану зазвичай визначають як середнє арифметичне двох середніх відліків упорядкованої послідовності.

Медіанний фільтр являє собою віконний фільтр, який послідовно ковзає по масиву даних і повертає на кожному кроці один із елементів як центральний елемент цього вікна. Вихідний сигнал y_k медіанного фільтра з апертурою $2n + 1$ для поточного відліку k формується з вхідного часового ряду відповідно до формули:

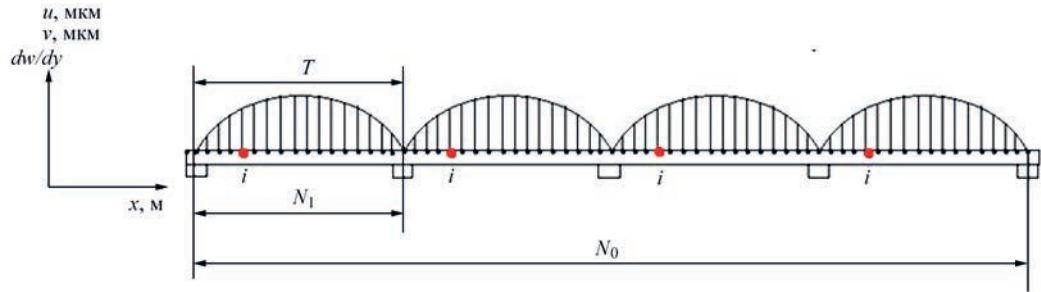


Рис. 8. Періодична структура профілю деформування з прикладом вибору точок для проведення усереднення

$y_k = \text{med}(x_{k-n}, x_{k-n+1}, \dots, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n-1}, x_{k+n}), \quad (1)$
 де $\text{med}(x_1, \dots, x_m, \dots, x_{2n+1}) = x_n, x_m$ – елементи варіаційного ряду, тобто ранжовані у порядку зростання значень $x_m: x_{(1)} = \min(x_1, x_2, \dots, x_{2n+1}) \leq x_{(2)} \leq x_{(3)} \leq \dots \leq x_{(2n+1)} = \max(x_1, x_2, \dots, x_{2n+1})$.

Медіанний фільтр використовувався наступним чином: на кожній ділянці конструкції обирались $i = 1 \dots N_1$ точок із даними про деформування; значення функцій у цих точках упорядковувались за зростанням; з N_1 значень обиралось значення, яке знаходилось на $N_1/2+1$ позиції для непарного N_1 або середнє з $N_1/2$ та $N_1/2+1$ – для парного. Таким чином, відсіювались аномально малі та великі значення функцій.

Визначення еталонної бездефектної ділянки на основі реальних даних може викликати деякі труднощі. При моделюванні для отримання цієї ділянки достатньо побудувати бездефектну конструкцію та усереднити всі профілі потрібного виду. При обробці реальних даних заздалегідь неможливо гарантувати бездефектність конструкції або вибрати напрямок, профіль якого буде бездефектним. Тому для отримання еталонної бездефектної ділянки слід усереднити дані по всіх підходящих профілях.

Після отримання еталонного бездефектного профілю деформування P_e необхідно провести його порівняння з усіма ділянками обраного перерізу та знайти максимальні відхилення вимірних значень деформацій від даних еталонного профілю. Для того, щоб визначити, наскільки профіль деформації P відрізняється від значень переміщень еталонної ділянки, було введено функцію відхилення деформування ділянки P_n від еталонної ділянки P_e :

$$D(n) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} |P_e^i - P_n^i|}{N_1} \quad (2)$$

де n – номер ділянки, N_1 – загальна кількість точок вибраної ділянки з даними про переміщення, P_e^i – значення переміщень у точці з індексом i еталонного профілю, P_n^i – значення переміщень у точці з індексом i вибраної ділянки профілю P .

Для визначення ділянок конструкції, які містять дефекти, було розроблено наступний алгоритм:

1. Визначається період T структурних неоднорідностей досліджуваного об'єкта на основі даних профілю деформування його поверхні P завдовжки l , а також кількість точок N_1 дискретної функції, що описує переміщення або похідну переміщень, які припадають на один період.

2. Профіль деформування P розбивається на ділянки P_n завдовжки T .

3. Обчислюється профіль еталонної бездефектної ділянки P_e на основі даних про деформацію окремих ділянок P_n (обчислюються середні або медіанні значення).

4. Будується графік $D(n)$ відхилення деформування на ділянці P_n від профілю еталонної ділянки P_e , який є результатом порівняння еталонної бездефектної ділянки P_e з даними профілю деформування P .

5. На основі аналізу визначається місцезнаходження дефектних ділянок за максимальними значеннями функції $D(n)$.

Проведено апробацію запропонованого алгоритму на характерних профілях деформування поверхні тришарової зварної панелі.

На відміну від традиційного підходу, за якого висновок про наявність дефекту робить оператор на основі візуального аналізу картини деформування, функція $D(n)$ дозволяє встановити кількісний критерій наявності дефекту. Ділянка P_n вважається дефектною, якщо виконується умова $D(n) > D_{\text{пор}}$, де порогове значення $D_{\text{пор}}$ визначається за статистичними характеристиками розподілу $D(n)$, наприклад $D_{\text{пор}} = D_{\text{сер}} + k\sigma_D$, де $D_{\text{сер}}$ та σ_D – середнє значення та середньоквадратичне відхилення функції $D(n)$ по всіх ділянках профілю, k – коефіцієнт, що визначає чутливість контролю. Застосування такого критерію знижує суб'єктивний вплив оператора на результати неруйнівного контролю.

Аналіз профілю деформування поверхні зварної панелі з дефектами. Для визначення місцезнаходження дефектів у зварній панелі проведено обробку даних розподілів переміщення w та похідної $\partial w / \partial y$, отриманих уздовж перерізу l при термічному навантаженні тришарової панелі. Досліджувані профілі деформування вирізняються значною кількістю локальних максимумів і

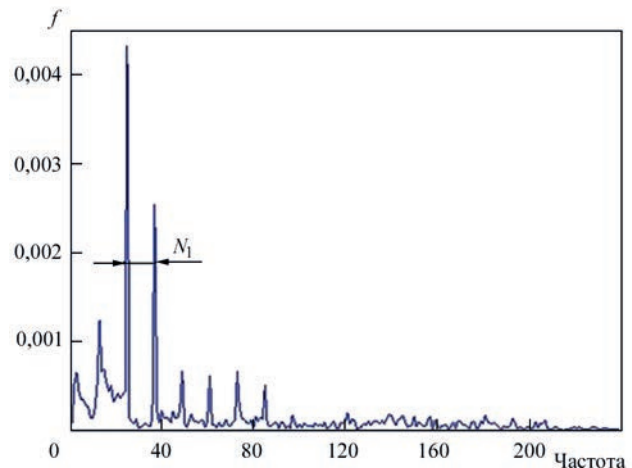


Рис. 9. Фур'є-спектр профілю u уздовж обраного перерізу: N_1 – крок між піками, що визначає кількість точок на один період профілю

мінімумів, при цьому амплітуда деформації в околі дефектних ділянок не перевищує амплітуду деформації в бездефектних ділянках. Це ускладнює безпосереднє виявлення дефектів на основі аналізу профілів деформування.

Для визначення основного періоду було реалізовано перетворення Фур'є профілю $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу (рис. 9). Отриманий просторовий спектр вирізняється наявністю різких максимумів, де по осі абсцис відкладено номери просторових гармонік (частоту), а по осі ординат f – їхні амплітуди.

На отриманому графіку наявні різкі максимуми, відстань між якими відповідає кількості ділянок N у конструкції. У даній зварній панелі $N = 12$. Оскільки загальна кількість точок $N_0 = 480$, то на одну ділянку конструкції припадає 40 точок. Слід зазначити, що якщо неможливо визначити період за першою гармонікою через її розмиття низькочастотним шумом, то використовується друга або наступні гармоніки та визначається відстань між ними. Еталонний профіль $\partial w/\partial y$ бездефектної ділянки був сформований трьома різними методами (рис. 10), проте вони не мають суттєвих відмінностей.

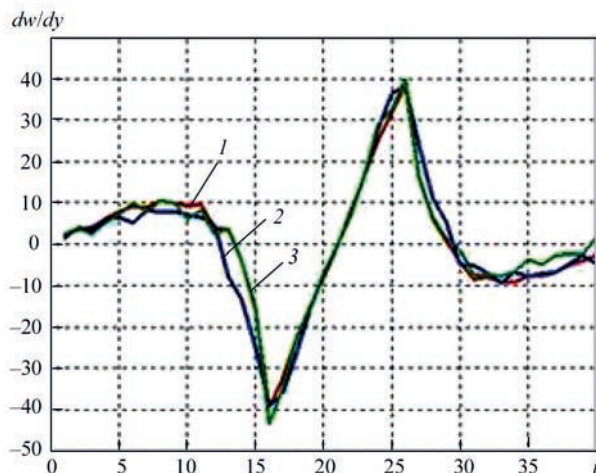


Рис. 10. Еталонний профіль $\partial w/\partial y$ бездефектної ділянки, отриманий усередненням за бездефектним профілем (1), усередненням за дефектним профілем (2) та медіанною фільтрацією (3), де i – порядковий номер дискретної точки в межах одного періоду профілю конструкції

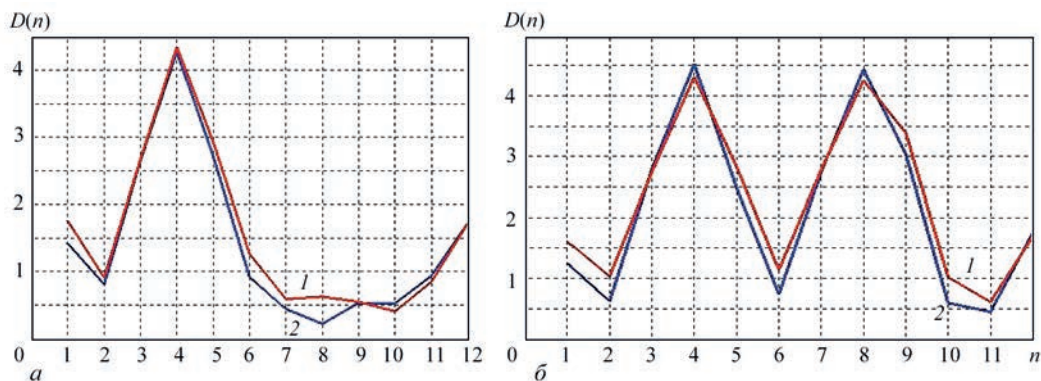


Рис. 11. Залежність $D(n)$ від номера профілю: 1 – за даними усереднення, 2 – за даними медіанної фільтрації

На рис. 11 наведено розподіл відхилень $D(n)$, де по осі абсцис відкладено номер ділянки конструкції n . Аналіз розподілу показує, що у першому випадку дефект локалізується на 4-й ділянці (рис. 11, а), а у другому — на 4-й та 8-й ділянках (рис. 11, б).

Зазначимо, що дані, отримані за допомогою звичайного усереднення та медіанної фільтрації, не мають істотних відмінностей. Проте функції $D(n)$ при розрахунках із використанням медіанної фільтрації мають менші значення в бездефектних ділянках. Отже, медіанна фільтрація надає точніші результати. Таким чином, розроблений алгоритм показав високу ефективність при визначенні місця дефекту в зварній панелі.

Визначення дефектів у тришаровій зварній панелі при її неруйнівному контролі методом ширографії. Апробацію розроблених алгоритмів було проведено на тришаровій зварній панелі. На відміну від розглянутої вище модельної задачі, експериментальний зразок відрізняється геометрією, матеріалами та видом навантаження, що дає змогу оцінити універсальність запропонованого підходу для конструкцій з періодичною структурою. Для роботи були використані дані неруйнівного контролю якості методом ширографії панелі розміром $190 \times 110 \times 5$ мм, несучі шари виготовлені зі сталі 03X11H10M2T завтовшки 0,6 мм, а зв'язуючий матеріал виготовлений зі сталі 12X18H10T завтовшки 0,3 мм.

У якості механічного навантаження в середину панелі через бічний отвір вводилось повітря об'ємом $V = 5 \text{ см}^3$. У результаті ширографічного контролю якості було отримано зображення розподілу похідної переміщень $\partial w/\partial y$ (рис. 12) у градієнтах сірого: найменшим значенням відповідають найтемніші ділянки, максимальним – найсвітліші.

Для подальшого дослідження в конструкції було обрано наступні профілі: 1, 2 – бездефектні, 3 – проходить через область впливу дефекту. У якості дефекту в конструкції є зруйноване точкове з'єднання між обшивкою та заповнювачем. Для

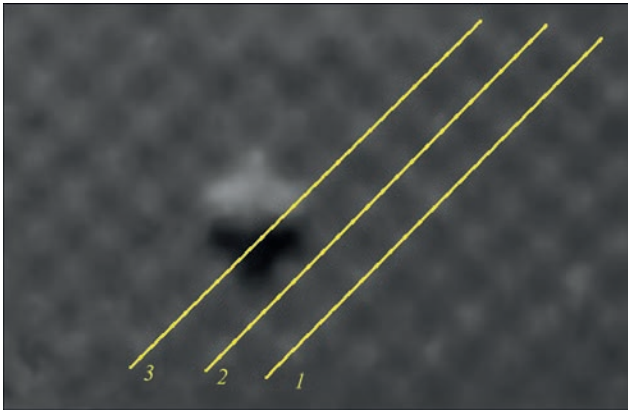


Рис. 12. Графічне зображення деформування поверхні панелі з внутрішнім дефектом при застосуванні внутрішнього тиску для її навантаження

зниження рівня спекл-шуму зображення деформування було оброблено за допомогою Гаусової фільтрації. Даний фільтр не змінює період характерних особливостей деформування, і, отже, не впливає на результати автоматичного визначення періоду T .

Для визначення місця розташування дефекту зварної точки (відсутність з'єднання) експериментальні дані про похідну компоненти переміщення $\partial w / \partial u$ були оброблені за тим самим алгоритмом, що й модельні дані. Під час обробки даних був побудований графік розподілу похідної (рис. 13, а) уздовж профілю 1, вплив дефекту на нього не про-

являється. По осі ординат відкладається безрозмірна величина I , що визначається методом ширографії та є характеристикою деформації об'єкта. На графіку спектру Фур'є (рис. 13, б) наявний чіткий максимум, який відповідає кількості періодичних ділянок конструкції, що увійшли в профіль ($N = 9$), на одну характерну ділянку панелі припадає $N_1 = 51$ точок. Еталонна бездефектна ділянка була отримана шляхом обчислення середніх значень (рис. 13, в). Було проведено порівняння еталонної бездефектної ділянки з даними уздовж профілів 1 і 3, а також обчислено значення функції $D(n)$ (рис. 13, г), де n – номер ділянки конструкції. Слід зазначити, що для бездефектного профілю (крива 1) амплітуда значень функції значно менша, ніж для дефектного (крива 2).

Порівняння експериментально отриманої картини деформування панелі (рис. 14) з результатами роботи алгоритму показало, що функція $D(n)$, яка є показником відхилення деформації досліджуваних ділянок від еталонної бездефектної ділянки, забезпечує надійну локалізацію дефекту.

Отримані результати підтверджують коректність запропонованого алгоритму оброблення ширографічних даних і його ефективність для автоматизованої локалізації дефектів у тришарових зварних панелях.

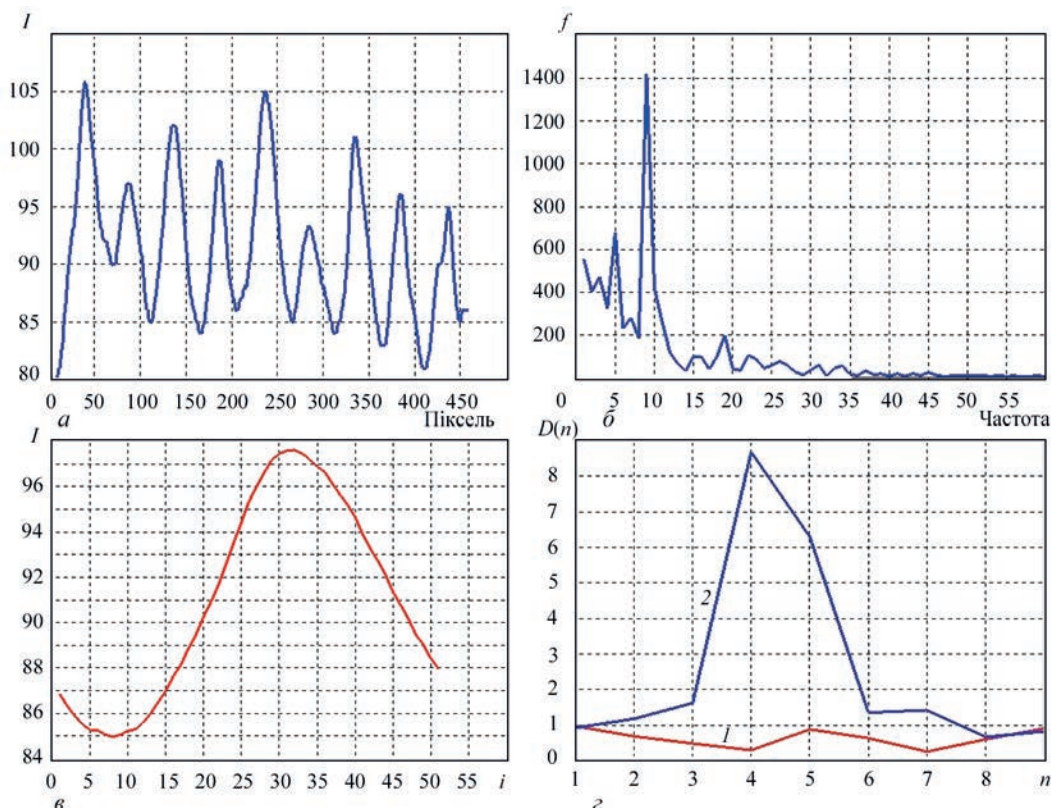


Рис. 13. Визначення місцеположення дефектної ділянки на основі ширографічних даних: а – профіль поверхні у перерізі 1; б – спектр Фур'є-даних уздовж профілю; в – графік безрозмірної величини I для еталонної ділянки; г – графіки функції $D(n)$

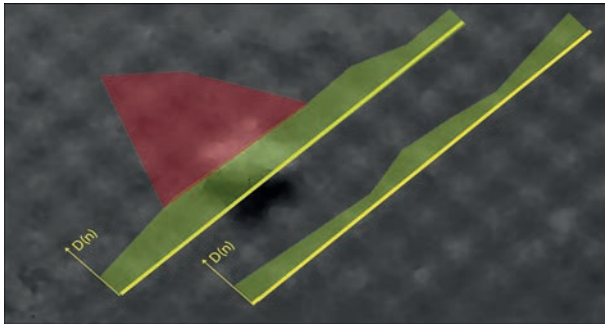


Рис. 14. Графічне представлення результатів застосування алгоритму автоматичного визначення місцеположення дефекту

Висновки

Проведено математичне моделювання напружено-деформованого стану тришарової зварної панелі при термічному навантаженні методом скінченних елементів. Це дало змогу дослідити вплив дефектів на деформування поверхні конструкцій. Показано, що використання похідної переміщень dw/dy дає можливість чіткіше виявляти наявність дефектів порівняно з аналізом лише переміщень. Це обґрунтовує доцільність застосування методу ширографії для неруйнівного контролю таких конструкцій.

На основі статистичної обробки даних, застосування методів Фур'є-аналізу та диференціального числення вперше розроблено алгоритм автоматизованого пошуку дефектних ділянок при їх неруйнівному контролі якости методами лазерної інтерферометрії.

Дослідження показали, що ефективність методики визначення місцезнаходження дефектів ґрунтується на визначенні періоду характерних особливостей, еталонної ділянки та обчисленні функції $D(n)$, яка відображає ступінь відхилення деформації досліджуваної ділянки від еталонної бездефектної. Встановлено, що медіанна фільтрація при формуванні еталонного профілю дає точніші результати порівняно з простим усередненням, забезпечуючи менші значення функції $D(n)$ у бездефектних ділянках.

Запропонована методика визначення місцезнаходження дефектів виявила високу ефективність при опрацюванні даних, отриманих у модельних та експериментальних дослідженнях тришарових зварних панелей. Ефективність алгоритму автоматизованого пошуку дефектних ділянок у металевих багатошарових тонкостінних конструкціях підтверджено як на модельних даних, отриманих при термічному навантаженні, так і на експериментальних даних ширографічного контролю панелі іншої конструкції при механічному навантаженні, що свідчить про універсальність підходу для широкого класу тонкостінних конструкцій з періодичною структурою.

Подяка. Дослідження було проведено в рамках проєкту 2025.07/0312 «Інноваційний комплекс безконтактних оптичних методів діагностики елементів конструкцій сучасної техніки з використанням штучного інтелекту», що фінансується Національним фондом досліджень України в рамках конкурсу «Передова наука в Україні 2026–2028».

Список літератури/References

1. Falchenko, Yu. V., Petrushynets, L. V. (2018) Modern methods of manufacturing three-layer panels of aluminium alloys (Review). *The Paton Welding J.*, **6**, 32–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.06.05>
2. Altenbach, H., Eremeyev, V. (2017) Thin-walled structural elements: Classification, classical and advanced theories, New Applications. In book: *Shell-like Structures*, 1–62. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-42277-0_1
3. Ghaffari, B., Mozurkewich, G. (2010) Non-destructive evaluation of spot-weld quality. In: *Failure Mechanisms of Advanced Welding Processes, Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies*, 101–136. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845699765.101>
4. Le, M., Kim, J., Kim, S., Lee, J. (2016) Nondestructive testing of pitting corrosion cracks in rivet of multilayer structures. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **17**, 1433–1442. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0169-7>
5. Le, M., Kim, J., Kim, S., Lee, J. (2018) B-scan ultrasonic testing of rivets in multilayer structures based on short-time Fourier transform analysis. *Measurement*, **128**, 495–503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.049>
6. Soyuturk, F., Günöz, A., Kara, M. (2023) Detection of welding defects by non-destructive testing methods. *Intern. Conf. on Applied Engineering and Natural Sciences*, **1**(1), 424–427. DOI: <https://doi.org/10.59287/icaens.1033>
7. Thornton, M., Han, L., Shergold, M. (2012) Progress in NDT of resistance spot welding of aluminium using ultrasonic C-scan. *NDT & E International*, **48**, 30–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.02.005>
8. Yang, L., Chuai, R., Cai, G. et al. (2024) Ultrasonic non-destructive testing and evaluation of stainless-steel resistance spot welding based on spiral C-scan technique. *Sensors*, **24**, 4771. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24154771>
9. Ulbrich, D., Psuj, G., Wypych, A. et al. (2023) Inspection of spot welded joints with the use of the ultrasonic surface wave. *Materials*, **16**(21), 7029. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16217029>
10. Mathisizik, C., Koal, J., Schmale, H.C., Füssel, U. (2026) Non-destructive testing of resistance spot welds by magnetic evaluation. In: *Proc. of the 14th European Conf. on Non-Destructive Testing 2026 (ECNDT 2026), June 15–19, 2026, Verona, Italy*. DOI: <https://doi.org/10.58286/33348>
11. Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: An optical measurement technique and applications. *Mater. Sci. Eng.*, **49**(3), 61–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.001>
12. Xu, N., Xie, X., Harmon, G., Gu, R., Yang, L. (2012) Quality inspection of spot welds using digital shearography. *SAE Intern. J. of Materials and Manufacturing*, **5**(1), 96–101. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0182>
13. Hung, Y.Y., Yang, L.X., Huang, Y.H. (2013) Non-destructive evaluation (NDE) of composites: Digital shearography. In: *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 84–115. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857093554.1.84>
14. Lobanov, L.M., Savitsky, V.V., Kyianets, I.V. et al. (2021) Non-destructive testing of elements of titanium honeycomb panels by shearography method using vacuum load. *The Paton Welding J.*, **12**, 49–54. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.12.08>
15. Stetsyuk, P.I., Savitsky, V.V. (2018) On defects search in regular 3D-structures. *J. of Automation and Information Sciences*, **50**(3), 21–37. DOI: <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfSci.v50.i3.20>
16. Ribes, A., Caremoli, C. (2007) SALOME platform component model for numerical simulation. In: *31st Annual Intern. Computer Software and Applications Conf. (COMPSAC 2007)*, 553–564. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2007.185>

17. Code_Aster: Finite element analysis of structures and thermomechanics for studies and research. Electricité de France (EDF), 1989–2026. <https://www.code-aster.org>
18. Oppenheim, A.V., Schaffer, R.W. (2009) *Discrete-time signal processing*. 3rd ed. Upper Saddle River, Pearson.
19. Huang, T., Yang, G., Tang, G. (1979) A fast two-dimensional median filtering algorithm. *IEEE Transact. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 27(1), 13–18. DOI: <https://doi.org/10.1109/tassp.1979.1163188>

AUTOMATED DETECTION OF DEFECTIVE AREAS IN A MULTILAYER THIN-WALLED STRUCTURE WITH PERIODIC CONFIGURATION BY LASER INTERFEROMETRY METHODS

L.M. Lobanov, I.L. Shkurat, O.P. Shutkevych, I.V. Kyianets, V.V. Savitsky

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

E-mail: innashkurat2909@gmail.com

Modeling and data analysis methods were applied to detect and evaluate deformations in thin-walled structures, in particular in welded multilayer panels. The use of finite element method enabled the characteristic spatial deformation profiles and their relationship with defect localization to be established. Fourier analysis and differentiation techniques were used to develop an algorithm for the automated detection of defective areas in thin-walled structures. It is shown that using the displacement derivative $\partial w / \partial y$ provides clearer defect localization compared to analysis of displacements alone. This substantiates the feasibility of applying the shearography method as one of the most informative approaches to the non-destructive testing of such structures. The obtained results are confirmed by both numerical and experimental data, indicating the suitability of the methodology for diagnosing a wide class of thin-walled structures. 19 Ref., 14 Fig.

Keywords: thin-walled structures, stress-strain state, finite element method, Fourier analysis, non-destructive testing, laser interferometry, shearography, automated defect detection

ORCID

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Шкурят І.Л. – <https://orcid.org/0009-0003-1888-4203>,
Шуткевич О.П. – <https://orcid.org/0000-0001-5758-2396>, Киянець І.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2559-8200>,
Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

І.Л. Шкурят

ІЕЗ ім. Патона Є.О. НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: innashkurat2909@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

Л.М. Лобанов, І.Л. Шкурят, О.П. Шуткевич, І.В. Киянець, В.В. Савицький (2026) Автоматизоване визначення дефектних ділянок багатопарової тонкостінної конструкції з періодичною структурою методами лазерної інтерферометрії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 03, 28–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.03.02>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 12.07.2026

Отримано у переглянутому вигляді 20.08.2026

Підписано до друку 06.09.2026

Оприлюднено 22.09.2026

НОВА КНИГА



Максимов С.Ю., Звірко О.І., Міленін О.С., Ниркова Л.І., Чудик І.І., Запхляк В.Б., Рудко В.В. Стійкість і відновлення об'єктів зберігання та транспортування природного газу. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, АТ «Укртрансгаз», 2026. — 218 с.

Монографію присвячено розвитку наукових засад забезпечення стійкості, безпечної експлуатації та відновлення об'єктів транспортування та зберігання природного газу в умовах сучасних технологічних, енергетичних і безпекових викликів. На основі узагальнення фундаментальних і прикладних досліджень, виконаних представниками декількох наукових шкіл України, сформовано цілісну наукову концепцію, яка інтегрує закономірності деградації конструкційних матеріалів, фізико-механічні механізми руйнування, математичного моделювання, прогнозування залишкового ресурсу та науково обґрунтованого вибору технологій відновлення газотранспортної інфраструктури. Особливу увагу приділено проблемам функціонування об'єктів газотранспортної системи в умовах тривалої експлуатації, воєнних загроз, післявоєнного відновлення, енергетичного переходу та перспектив транспортування водневмісних енергоносіїв. Монографія призначена для науковців, інженерів, фахівців газотранспортної галузі, викладачів, аспірантів і студентів технічних спеціальностей. Бібліогр. 272, табл. 24, рис. 104. ISBN 978-617-7785-97-1.

Книга у вільному доступі за посиланням — <https://patonpublishinghouse.com/ukr/books>

АВТОМАТИЗОВАНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ДЕФЕКТІВ НА ЗОБРАЖЕННЯХ МАГНІТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЮ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ YOLO11

А.С. Момот¹, В.С. Якотюк¹, Ю.Ю. Лисенко^{1,3}, Р.М. Галаган¹, Й. Мірчев^{2,3}

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: j.lysenko@kpi.ua

²Інститут механіки Болгарської академії наук. 1113, м. Софія, вул. акад. Г. Бончева, Болгарія

³Центр компетенцій з мехатроніки та чистих технологій «Мехатроніка, інновації, робототехніка, автоматизація та чисті технології» – MIRACle. Болгарія. E-mail: a.momot@kpi.ua

У роботі розглянуто можливості застосування моделей глибокого навчання сімейства YOLO11 у задачі автоматизації детектування дефектів на зображеннях магнітопорошкового контролю, який широко використовують для перевірки феромагнітних деталей, а рішення за його результатами впливають на безпечність експлуатації та витрати. Водночас зображення магнітопорошкового контролю часто містять зернистий фон, нерівномірне освітлення та відблиски, через що слабоконтрастні магнітні візерунки маскуються, а надійність простих методів аналізу знижується. Запропоновано програмний підхід, у якому кадри з камери автоматично опрацьовуються нейронною мережею, а на виході формуються рамки локалізації дефектів і виконується їхня класифікація за видом. Для навчання моделей використано реальні зображення, кількість яких була збільшена за допомогою аугментації шляхом перетворень, що імітують типові відхилення параметрів зйомки. Набір даних було розмічено за трьома класами дефектів і поділено на навчальну, валідаційну та тестову множини. Проведено навчання та порівняння моделей YOLO11n, YOLO11s, YOLO11m і YOLO11l за метриками Precision, Recall, mAP50 і mAP50-95 та за часом опрацювання кадру. Показано, що збільшення розміру моделі не дає пропорційного приросту якості на наявному наборі даних. Найкращий баланс між точністю та швидкістю забезпечила модель YOLO11m із показником mAP50-95 на рівні 0,238 із часом опрацювання кадру 29,5 мс. Аналіз результатів навчання засвідчив вищу якість детектування лінійних дефектів і складність під час виявлення дрібних групових дефектів, що обумовлено дефіцитом навчальних даних і зашумленим фоном. Надано рекомендації щодо методів зниження хибних спрацювань і розширення даних для покращення репрезентативності навчального набору. Бібліогр. 16, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: магнітопорошковий контроль, детектування дефектів, комп'ютерний зір, штучний інтелект, нейронні мережі

Вступ. Магнітопорошковий контроль (МПК) є одним із найпоширеніших методів неруйнівного контролю феромагнітних матеріалів. Його застосовують насамперед для виявлення поверхневих несутцільностей, зокрема тріщин або пор. МПК здатний виявляти й дефекти, розташовані безпосередньо під поверхнею, однак чутливість методу зменшується зі зростанням глибини залягання [1]. Перевага МПК полягає у високій чутливості до поверхневих і приповерхневих дефектів та у швидкому отриманні результатів. Метод є відносно простим у застосуванні та економічно вигіднішим порівняно з низкою інших підходів, тому його часто використовують як у промислових, так і в польових умовах. Найпоширеніші сфери застосування охоплюють контроль зварних з'єднань, литва та поковок, а також авіаційну, автомобільну, виробничу та енергетичну галузі.

Практична значущість МПК визначається тим, що за результатами контролю ухвалюють рішення, які впливають на безпечність експлуатації, надій-

ність і витрати, пов'язані з ремонтом, простоями та бракуванням. У той же час підсумкова якість контролю часто залежить від інтерпретації його результатів, оскільки висновок формується спеціалістом на основі візуального аналізу. Унаслідок впливу суб'єктивних факторів можливі відмінності між оцінками різних спеціалістів і неоднозначність висновків за різних умов роботи. Це знижує повторюваність результатів, а отже, підсилює потребу в автоматизації аналізу зображень МПК.

Зображення МПК зазвичай являють собою фотографії поверхні виробу після підмагнічування та нанесення магнітопорошкових суспензій [2]. Магнітні частинки концентруються в зонах витoku магнітного потоку, і дефект проявляється як локальне скупчення або смуга частинок, помітна під білим або ультрафіолетовим освітленням. Саме цю картину розподілу частинок зазвичай фіксують камерою для подальшого аналізу та документування та прийняття рішення про наявність дефектів.

Автоматизацію аналізу таких зображень ускладнюють особливості зйомки, за яких формуються шуми та неоднорідності. Значну роль тут відіграють зернистість і фон, а також варіації

© Момот А.С., Якотюк В.С., Лисенко Ю.Ю., Галаган Р.М., Мірчев Й., 2026.

Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

освітлення та локальні відблиски, що маскують слабконтрастні дефекти. Окремою проблемою є хибні детекції, які виникають через властивості поверхні. Через це корисні ознаки дефектів частково маскуються, а надійність простих правил обробки зображень помітно знижується [3].

За таких умов для автоматизації процесу аналізу зображень МПК доцільно використовувати методи комп'ютерного зору на основі глибоких нейронних мереж, оскільки вони здатні навчатися на фактичних прикладах і враховувати узагальнені контекстні ознаки наявності дефектів. Тому актуальною є потреба у розробці надійних програмних рішень на основі штучного інтелекту (ШІ), які будуть завадостійкими та стабільними в умовах неоднорідності вхідних даних.

Аналіз стану проблеми. Магнітопорошковий контроль залишається одним із найпрактичніших методів неруйнівного контролю феромагнітних деталей, особливо в задачах виявлення поверхневих і приповерхневих дефектів. У промисловості він цінується за чутливість до тріщиноподібних дефектів і відносно технологічну простоту, але саме етап візуальної інтерпретації зображень досі часто залежить від досвіду оператора. Огляд сучасних робіт показує, що фокус автоматизації МПК зміщується від механізації процесу намагнічування та нанесення суспензії до створення програмних методів розпізнавання дефектів на зображеннях із урахуванням вимог роботи в реальному часі та інтеграції прямо у виробничі лінії. У літературі окремо підкреслюють, що значними викликами для автоматизації МПК є різноманітні умови формування зображень та потреби у зменшенні впливу шумів ще до етапу розпізнавання [4].

Для задач контролю якості принципово важливо не лише встановити факт наявності дефекту, а й визначити його положення та розміри. Тому підходи, що зводять автоматизований аналіз зобра-

жень МПК до задачі класифікації, виявляються недостатньо інформативними для реального інженерного застосування. На практиці часто потрібно не лише виявити дефект, а й виконати відповідне маркування, провести повторний огляд, а інколи й позначити просторове положення дефекту. Наприклад, у [5], присвяченій флуоресцентному МПК, показано логіку переходу від простого виявлення дефектів до задачі їхньої локалізації та подальшого уточнення параметрів, де ключовими викликами стають відсікання фону та робота з малорозмірними дефектами на великих полях зображення. Автори прямо пов'язують цю постановку з реальною практикою, коли дефекти на немеханічних поверхнях необхідно відполірувати та перевірити повторно.

Типові проблеми для автоматизації аналізу зображень МПК пов'язані з тим, що відбитки дефектів формуються на фоні неоднорідної текстури, відблисків і локальних перепадів яскравості, а також можуть маскуватися зернистістю та паразитними світловими ефектами (рис. 1). На знімках одночасно присутні корисні структури та завади, які змінюються від деталі до деталі, тому один і той самий дефект може виглядати по-різному залежно від освітлення та стану поверхні. Це створює ситуацію, коли слабкі протяжні дефекти потрібно відокремити від великої площі неінформативного фону, і саме на цьому етапі багато класичних методів стають нестійкими. У багатьох роботах прямо підкреслюється складність виділення мікротріщин на тлі великого фону, а також залежність якості детектування від того, наскільки точно визначено попередню область інтересу. Практика впровадження методів комп'ютерного зору для МПК показує, що поєднання нейромережевого аналізу з контрольованими умовами зйомки та попередньою підготовкою даних дозволяє отримати передбачуваніші результати у виробничих умовах [6].

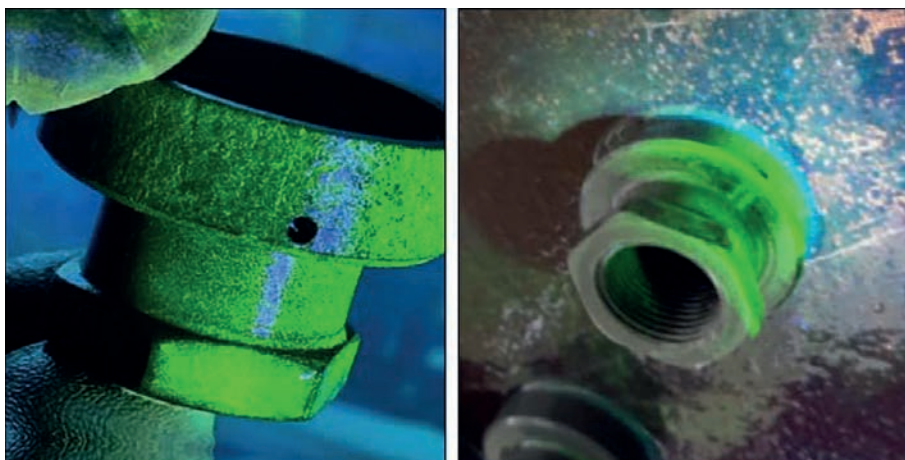


Рис. 1. Приклади зображень МПК

Еволюція підходів у МПК добре ілюструється переходом від ручного визначення правил обробки зображень до моделей ШІ, що навчаються на великих наборах даних. У ранніх роботах із використання глибокого навчання для автоматизації аналізу зображень МПК вже розглядалися декілька варіантів постановок цієї задачі. Зокрема автори [7] описують задачі класифікації, детектування та семантичної сегментації й показують, що правильний вибір постановки прямо визначає придатність рішення до виробничого застосування. Це важливо, бо навіть за якісної зйомки один і той самий магнітний візерунок може вимагати різної інтерпретації залежно від контексту поверхні та геометрії деталі. Автори також підкреслюють, що передбачувана швидкодія є не менш важливим параметром автоматизації ніж точність, оскільки контроль часто прив'язаний до темпу виробництва та до обмеженості часу огляду.

З погляду правильної постановки задачі важливо розрізняти кілька рівнів відповіді, яку може давати алгоритм. Задача класифікації відповідає на запитання: «Чи є на зображенні ознаки дефекту та якого саме?», але не показує конкретне місце його розташування. Задача детектування об'єктів дозволяє чітко вказати ділянку зображення, на якій виявлено дефект, а також одночасно визначити його клас (вид). Задача сегментації дозволяє не лише локалізувати дефекти та класифікувати їх, але й отримати контури дефектів у вигляді маски пікселів. Це зручно для опису форми та для подальших вимірювань розмірів. У практичному застосуванні ці задачі часто поєднують, оскільки попереднє детектування дозволяє зменшити область інтересу для детального аналізу, а подальша сегментація у цій області дозволяє уточнити межі дефектів і визначити їхній клас навіть там, де контраст є низьким.

Останнім часом окремим трендом у задачах аналізу зображень неруйнівного контролю стало поширення нейромережових моделей для детектування об'єктів сімейства YOLO. Ці моделі мають просту й зрозумілу процедуру навчання та оцінювання якості, а також високу швидкодію, що робить їх придатними до опрацювання зображень у режимі реального часу. Для МПК це особливо доречно у разі необхідності швидкої локалізації дефектів, а також забезпечення високої якості детектування в умовах швидкого виробничого темпу. У публікаціях останніх років для задач, близьких за складністю автоматизації до МПК, демонструються модифікації YOLO з акцентом на здатність визначення дрібних дефектів на складному фоні, зокрема дефектів друкованих плат [8].

Паралельно з розвитком моделей ШІ зростає увага до інженерних аспектів їхнього впровадження, зокрема до спрощення моделей і зниження обчислювальних витрат без втрати якості. У [9] для флуоресцентного МПК запропоновано підхід на основі перенесення навчання, згідно з яким попередньо навчена для інших задач модель донавчається для детектування дефектів на зображеннях МПК. У публікації наведено приклад, де середня точність детектування (mean Average Precision, mAP) підвищується на 5 % по відношенню до варіанту навчання моделі без перенесення навчання. Також показано зростання швидкості детектування з 20,57 до 35,25 кадрів/с, що підкреслює практичну цінність такого підходу саме для контролю в реальному часі. Це вписується в загальну тенденцію, коли рішення щодо вибору ШІ-моделі оцінюють не лише за часткою правильних класифікацій, а й за затримкою відповіді, стабільністю та вартістю обчислювальних ресурсів.

Ще одна виразна тенденція пов'язана з особливостями наборів навчальних даних, а саме, з дефіцитом навчальних зображень і їхньою доменною специфікою. У [10] показано, що недостатня кількість якісних зображень може обмежувати навчання моделей, а до приросту якості часто призводить не ускладнення архітектури, а грамотне розширення та аугментація даних. Автори застосовують поетапний синтез штучних зображень із використанням дифузійної моделі та комплексування зображень, а також додаткове підсилення контрасту магнітних візерунків відносно фону за допомогою модифікації тональної кривої. У роботі повідомляється, що такі підходи підвищують середню точність детектування для моделі YOLOv5s на 35,2 % порівняно з варіантом без аугментації і попередньої обробки зображень. Для моделі YOLOv8s зазначено підвищення на 27,6 %. Разом із тим підкреслюється, що синтезовані дані можуть відрізнятися від зображень, отриманих за допомогою реальної зйомки. Тому навчена модель потребує перевірки на реальних кадрах саме того виробництва, де планується впровадження.

Щільні та розгалужені магнітні візерунки становлять окрему проблему. Наприклад, складною є ситуація коли тріщини розташовані близько та погано відокремлюються одна від одної. У [11] для флуоресцентного МПК заклепок застосовано модель для детектування та сегментації дефектів, яка дозволяє розділяти близько розташовані тріщини як окремі об'єкти. Запропоновано спосіб розмітки даних зі зменшенням перекриття рамок у щільних областях і постобробку для підвищення пов-

ноти виявлення дефектів у зонах густих тріщин. У наведених результатах повідомляють про mAP на рівні 90,3 %, що демонструє практичний потенціал використання сегментації саме для розпізнавання в умовах складних флуоресцентних візерунків.

Узагальнюючи сучасний стан розвитку автоматизації, МПК можна описати як перехід до відтворюваних програмних систем, де ключовими стають локалізація та класифікація дефектів, виявлення малорозмірних дефектів на зашумленому фоні та підвищення якості навчальних наборів даних для ШІ-моделей. Аналіз поточних робіт доводить, що в реальних умовах особливості формування магнітних візерунків і високі рівні шумів не дозволяють використовувати традиційні методи автоматизованого аналізу зображень, оскільки вони не будуть мати необхідної стійкості. Зокрема для аналізу зображень зрізів зі зразків мідної руди запропоновано методи сегментації на основі кольорних моделей [12], що демонструють практичну ефективність у задачах оцінювання вмісту мінералів, однак їхнє застосування обмежується стабільністю умов зйомки та однорідністю освітлення. Практичні дослідження також показують, що найбільшого приросту якості автоматизованого розпізнавання дефектів часто досягають шляхом поєднання правильної постановки задачі, визначення інженерно придатної моделі ШІ та коректної підготовки навчальних даних. Так, у [13] показано, що метод аугментації на основі злиття зображень із вейвлет-перетворенням статистично значуще підвищує точність класифікації нейронних мереж при тепловому НК, що підтверджує важливість вибору методу розширення навчальних даних. У цьому контексті перспективним напрямком розвитку є поєднання використання швидких ШІ-моделей для детектування об'єктів, зокрема сімейства YOLO, з аугментацією даних і правильною розміткою навчального набору з урахуванням особливостей, характерних для МПК.

Метою даного дослідження є аналіз ефективності застосування моделей нейронних мереж сімейства YOLO11 для автоматизованого виявлення дефектів на зображеннях МПК. Даний підхід має забезпечити автоматичне визначення розташування дефектів на поверхні та їхню класифікацію за видом. Задача ускладнена тим, що зображення часто містять шуми та неоднорідності, а магнітні візерунки, що супроводжують дефекти, можуть бути слабконтрастними та змінюватися залежно від умов зйомки. Додатковим ускладнюючим фактором є дефіцит зображень МПК у відкритому доступі для формування навчального набору даних.

У запропонованій системі зображення об'єкта контролю надходять до програмного модуля інтелектуального опрацювання з камери, встановленої на виробничій дільниці або над виробом під час огляду. Далі зображення автоматично опрацьовуються нейронною мережею, а на виході отримується результат детектування, де дефекти виділяються рамками та відносяться до відповідних класів. Важливим етапом створення такої системи є коректний вибір найефективнішої ШІ-моделі для виявлення об'єктів на зображеннях, оскільки необхідно забезпечити баланс між достовірністю та швидкодією. Тому актуальним завданням є порівняння ефективності роботи різних модифікацій сучасної моделі YOLO11 на наборі даних, який складається з реальних зображень МПК.

Опис нейромережевої моделі. YOLO – це сімейство нейромережевих моделей для автоматизованого детектування об'єктів на зображеннях, яке відоме поєднанням високої швидкодії та точності. Такий баланс є важливим для задач МПК, де потрібно виявляти дефекти за візуальними магнітними візерунками, зберігаючи високу швидкість контролю. Базовий принцип YOLO як однокрокового методу детектування описано в [14].

Ключові особливості версії YOLO11 пов'язані з оновленням архітектури та методів навчання, які дають кращу точність і вищу швидкість порівняно з більш ранніми версіями за близької або меншої обчислювальної складності. У матеріалах розробників підкреслюється, що YOLO11 підвищує точність виявлення об'єктів на зображеннях і водночас складається з меншої кількості параметрів у порівнянні з YOLOv8 [15]. Це спрощує використання моделі в задачах потокової обробки зображень і в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Для задач автоматизованого аналізу зображень МПК це важливо, оскільки даний підхід дозволяє використовувати компактніші моделі без істотної втрати чутливості до дрібних дефектів на складному фоні, що також зменшує ризики затримок під час проведення контролю на виробництві.

У той же час, моделі YOLO мають типові обмеження, які важливо враховувати в задачах автоматизації МПК. Найчастіше складнощі пов'язані з детектуванням малих за розміром об'єктів, поганим детектуванням за низької контрастності та якщо фон містить структури, схожі на корисні ознаки об'єктів. За таких умов модель повинна відрізняти слабкий корисний сигнал від нерівномірностей зйомки та текстури поверхні, внаслідок чого можуть виникати помилки локалізації або пропуски дрібних дефектів.

З точки зору архітектури всі моделі YOLO зберігають логіку послідовного перетворення зображення у набір ознак, їх об'єднання на кількох масштабах і подальшого прогнозування рамок об'єктів та їхніх класів. Спочатку згорткові прошарки формують ієрархічний набір ознак, після цього ознаки різних просторових масштабів узгоджуються в об'єднаній частині мережі, а далі вихідні прошарки прогнозують координати рамок і визначають класи дефектів. Така схема є доречною для МПК, оскільки дефекти можуть мати різний характер і розмір, а фон часто містить завади, які потрібно відкидати за рахунок контекстних ознак.

Важливою практичною рисою є можливість масштабування моделі. Розміри YOLO11 визначаються наборами коефіцієнтів, що змінюють глибину й ширину мережі. Завдяки цьому одна й та сама за ідеєю архітектура може бути подана як компактна високошвидкісна модель або як більша і повільніша модель, яка потенційно забезпечує вищу якість детектування за рахунок більшої кількості параметрів. Для попередньої оцінки співвідношення складності моделі та якості детектування можна використовувати результати тестування моделей на стандартному наборі даних COCO [15]. Ці результати наведено в табл. 1. Надмірне збільшення моделі підвищує потенційну якість детектування, проте потребує значно більше обчислювальних ресурсів і може ускладнювати швидкодію застосування в реальному часі, що негативно впливає на час проведення контролю.

Отже, вибір конкретної модифікації YOLO11 для автоматизації процесу аналізу зображень МПК є окремим інженерним завданням, оскільки саме це визначатиме баланс між точністю локалізації дефектів і практичною швидкодією. У зв'язку з цим у подальшому будуть розглядатися результати порівняння модифікацій YOLO11 на власному наборі навчальних зображень МПК за узгодженими метриками та єдиною процедурою навчання й тестування.

Метрики для детектування об'єктів. Для порівняння модифікацій YOLO11 у задачі детектування дефектів на зображеннях МПК необхідно використовувати метрики, які одночасно відображають точність локалізації рамок навколо дефектів і якість класифікації. Це важливо, оскільки модель має не лише знайти дефект, а й окреслити його по-

ложення на кадрі так, щоб результат був придатним для подальшого аналізу та повторного огляду. У даній роботі в якості метрик використовуються IoU, Precision, Recall, mAP50 і mAP50-95, які є типовими для задач детектування об'єктів [16].

Метрика Intersection over Union (IoU) описує ступінь перекриття прогнозованої моделлю рамки навколо дефекту та еталонної рамки. Значення IoU наближається до одиниці, якщо рамки майже збігаються, і зменшується до нуля, якщо перекриття майже відсутнє. У задачах МПК це прямо пов'язано з тим, наскільки точно модель виділяє границі дефекту на фоні шумів і неоднорідностей зйомки.

Метрики Precision і Recall визначаються шляхом підрахунку кількості правильних і неправильних класифікацій моделі. Обидві метрики можуть мати значення 0...1. Високе значення Precision означає, що модель зрідка виявляє дефект там, де його насправді немає. Висока Recall означає, що модель зрідка пропускає дефекти, які насправді присутні на зображенні. Для МПК ці показники слід інтерпретувати разом, оскільки зниження порога впевненості мережі часто підвищує Recall, але може погіршити Precision через появу хибних детектувань на ділянках із вираженими магнітними візерунками фону.

Метрика Average Precision (AP) узагальнює компроміс між Precision і Recall для кожного класу дефектів. На практиці для визначення AP будується крива залежності Precision від Recall за різних порогів впевненості моделі, після чого AP розраховується як площа під цією кривою. У випадку кількох класів використовується середнє значення AP–mAP. Позначення mAP50 означає, що під час розрахунку враховуються лише ті виявлені мережею об'єкти, для яких значення IoU перевищує 50 %. Інші об'єкти, для яких IoU є меншими за вказаний поріг, визнаються хибними детекціями та відкидаються в результаті роботи алгоритму Non-max suppression (NMS). Позначення mAP50-95 відповідає усередненому значенню mAP за набором порогів $t \in \{0,50; 0,55; \dots; 0,95\}$. У порівнянні з mAP50, метрика mAP50-95 жорсткіше оцінює якість локалізації, оскільки штрафує за рамки, які входять дефект, але неточно відтворюють його межі.

Окремо під час процесу навчання моделі відстежуються складові функції втрат, які показують,

Таблиця 1. Порівняння модифікацій YOLO11

Модель	Швидкодія без графічного прискорювача, мс	Кількість параметрів, млн	mAP50-95
YOLO11n	56,1 ± 0,8	2,6	0,395
YOLO11s	90,0 ± 1,2	21,5	0,470
YOLO11m	183,2 ± 2,0	68,0	0,515
YOLO11l	238,6 ± 1,4	86,9	0,534
YOLO11x	462,8 ± 6,7	194,9	0,547

де саме модель помиляється та як змінюється ця помилка в процесі оптимізації. Box loss (або L_{box}), відображає точність визначення координат рамки дефекту. Class loss (або L_{cls}) відповідає за правильність віднесення виявленого дефекту до певного класу. DFL loss (або L_{dfl}) є складовою функції втрат, яку в сучасних реалізаціях YOLO застосовують для уточнення координат рамки дефекту. Вона дозволяє точніше наближати координати, особливо коли дефект малий або має слабкий контраст на фоні магнітних візерунків.

Формування навчального набору даних. Зображення магнітних візерунків на поверхнях дефектних і бездефектних деталей, отримані під час проведення МПК, були надані авторам приватним підприємством «ДП-ТЕСТ». Початковий набір даних складав 99 зображень, що є недостатнім для стійкого навчання моделі для детектування дефектів за реальних умов зйомки. Тому базовий набір було штучно розширено до 5510 зображень за рахунок аугментації даних, що дозволило отримати різноманітні варіації навчальних зображень і зменшити ризик перенавчання або недонавчання.

Процес аугментації даних включав застосування перетворень, які відтворюють типові відхилення реальної зйомки. Зокрема до початкових зображень застосовувалися відображення по горизонталі та вертикалі, обертання в межах $-15...+15^\circ$, зсуви до $\pm 11^\circ$ по горизонталі та до $\pm 6^\circ$ по вертикалі, а також зміни насиченості в межах $\pm 10\%$. Додатково до зображень додавався нормально розподілений шум з інтенсивністю до $0,97\%$ та імітувалась дисперсія коефіцієнта підсилення матриці камери на рівні $0,09$. Також використовувалися масштабування та випадкове кадрування, розмиття для імітації нечіткості через рух або недосконалого фокусування, а також зміни яскравості та контрасту для відтворення неоднорідного освітлення та впливу особливостей поверхні. Усі перелічені параметри змінювались у межах $\pm 10\%$ відносно початкових характеристик зображення. У результаті кожен навчальний приклад отримував до десяти варіантів перетворень.

Для розмітки даних було визначено три класи дефектів: лінійні (такі як лінійні тріщини або подряпини), групові (скупчення пор, дрібних тріщин тощо) та інші дефекти для узагальнення інших аномалій. Під час формування набору даних виконувалось масштабування розміру всіх зображень до 640×640 пікселів.

Набір даних було розділено на навчальну, валідаційну та тестову множини. Розподіл кількості зображень за множинами наведено в табл. 2. Такий розподіл одразу демонструє дисбаланс за кла-

сами, особливо для дефектів класу «групові», що необхідно враховувати під час інтерпретації метрик і підбору параметрів навчання.

Навчання моделей. Для проведення дослідження ефективності різних моделей YOLO11 було використано хмарне середовище Google Colab із графічним процесором T4 та програмну бібліотеку Ultralytics. Для розмітки та організації набору даних застосовувалось середовище Roboflow SDK, яке також забезпечувало експорт розмічених зображень і формування структури набору даних у форматі, сумісному з YOLO11.

Навчання проводилось для всіх моделей YOLO11, окрім YOLO11x. Це пов'язано з тим, що обчислювальних можливостей графічних процесорів, наданих у користування середовищем Google Colab, не вистачало для навчання настільки великої моделі. У той же час, як вже було зазначено раніше, YOLO11x початково й не розглядалась авторами з причин надмірної складності та низької швидкодії.

Моделі ініціалізувались із попередньо навченими на наборі даних MS COCO вагами, що прискорювало збіжність і підвищувало стабільність навчання за обмеженої кількості вихідних зображень. Навчання проводилось протягом 30 епох, розмір зображення на вході кожної мережі складав 640×640 пікселів, розмір батчу становив 16. Налаштування набору даних виконувалось із використанням YAML-файлу, який містив шляхи до навчальної, валідаційної й тестової множин і опис класів дефектів. Гіперпараметри моделей у даному дослідженні не змінювались і використовувались значення за замовчуванням.

У процесі навчання відстежувались усі складові функції втрат, які вирізняють помилки локалізації та класифікації. Контролювались L_{box} як показник точності рамок, L_{cls} як показник якості класифікації, а також L_{dfl} як складова, що відображає штраф за відхилення передбачених координат рамки від еталонних. Приклад графіків навчання для моделі YOLO11m наведено на рис. 2.

Динаміка цих кривих демонструє рівномірне зменшення значень протягом епох, що узгоджується з коректною роботою алгоритму оптимізації та відсутністю ознак різкого розходження між навчальними (train) та валідаційними (val) показниками. Паралельно з втратами контролювали-

Таблиця 2. Розподіл зображень за множинами у навчальному наборі даних

Клас дефектів	Навчальна	Валідаційна	Тестова
Лінійні	959	62	101
Групові	110	11	9
Інші	173	16	21
Разом (усі)	1242	89	131

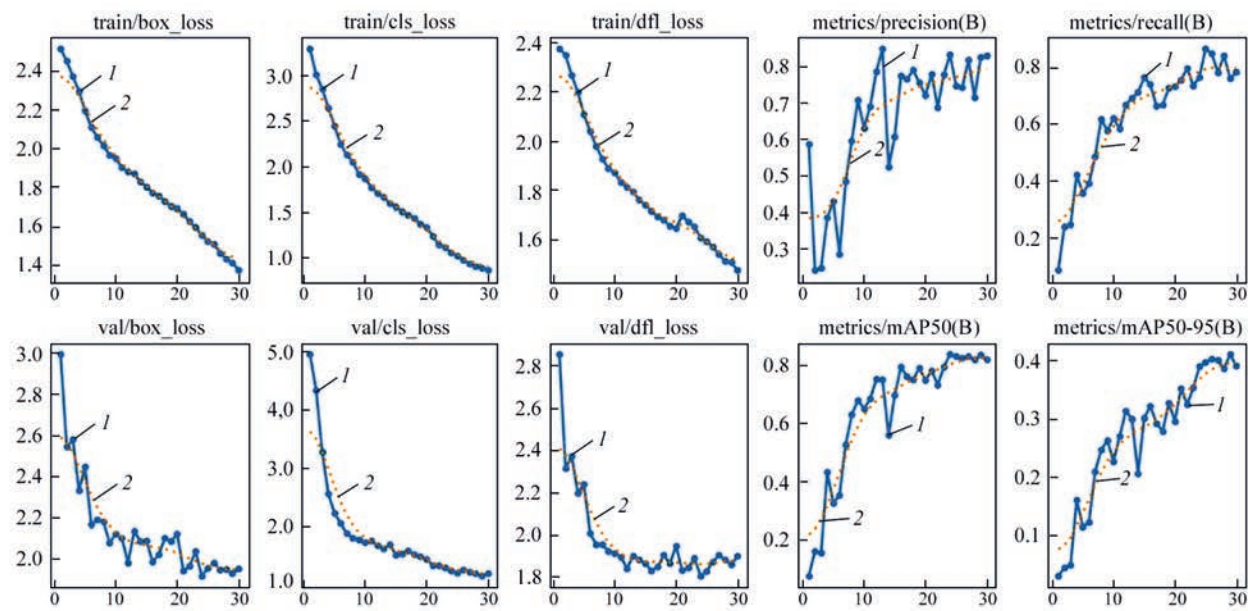


Рис. 2. Графіки навчання моделі YOLO11m: 1 – results, 2 – smooth

ся метрики Precision, Recall, mAP50 і mAP50-95, які поступово зростали, що означає зменшення хибних спрацьовувань і збільшення частки знайдених дефектів, включно з дрібними та низькоконтрастними.

Аналіз результатів. Результати оцінки ефективності моделей, що досліджувались, на тестовій множині наведено в табл. 3. Спостерігається закономірне зростання рівня якості детектування під час переходу від більш компактних модифікацій моделі до середніх, проте подальше збільшення розміру моделі не дає пропорційного приросту. Для YOLO11n і YOLO11s значення Precision, Recall, mAP50 і mAP50-95 збігаються, хоча обчислювальна складність і час опрацювання відрізняються. Це можна пояснити тим, що складний фон зображень МПК і дисбаланс класів обмежують ефект від збільшення потужності моделі без додаткового напруження різноманіття навчальних даних.

Найкраще значення mAP50-95 показала модель YOLO11m. Модель YOLO11l має дещо вищі Precision і Recall, але mAP50-95 при цьому зменшується. Це означає, що збільшення моделі не обов’язково покращує точність локалізації рамок дефектів як мінімум на даному наборі зображень.

З точки зору швидкодії YOLO11n забезпечує найменший час опрацювання 7,1 мс на зображення, тоді як YOLO11m потребує 29,5 мс. Проте приріст Recall для YOLO11m становить 0,071,

а приріст mAP50-95 становить 0,009 у порівнянні з YOLO11n. У зв’язку з цим модель YOLO11m є більш збалансованим варіантом для подальшого розгляду, оскільки підвищує повноту знаходження дефектів без різкого погіршення продуктивності.

У табл. 4 наведено деталізовані результати для обраної моделі YOLO11m. Оцінювання виконано для всіх розмічених об’єктів і окремо для класів лінійних, групових та інших дефектів. Важливо звернути увагу на такий розподіл, оскільки класи відрізняються не лише видом і формою дефектів, а й кількістю їхніх прикладів у тестовій множині.

Загалом модель досягає Precision 0,643 і Recall 0,611 при mAP50 0,607. Найкращі показники отримано для лінійних дефектів. Для класу інших дефектів значення mAP50-95 близьке до загального рівня та свідчить про стабільне виявлення на різноманітному фоні. Найскладнішим виявився клас групових дефектів. Це можна пояснити малою кількістю прикладів у навчальному наборі даних, а також тим, що дрібні магнітні візерунки часто мають низький контраст і легко змішуються із зернистим фоном.

На рис. 3 показано приклади правильного детектування моделлю YOLO11m на зображеннях із тестової множини. Можна помітити, що рамки досить точно охоплюють лінійні дефекти та більші об’єкти класу інших дефектів. Для точкових дефектів межі рамок частіше зміщуються, що узгоджується з нижчим значенням mAP50-95. У

Таблиця 3. Зведені результати тестування навчених моделей

Модель	Обчислювальна складність, GFLOPs	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Час опрацювання зображення, мс
YOLO11n	6,3	0,618	0,540	0,536	0,229	7,1
YOLO11s	21,3	0,618	0,540	0,536	0,229	12,9
YOLO11m	67,7	0,643	0,611	0,607	0,238	29,5
YOLO11l	86,6	0,647	0,616	0,608	0,216	37,8

Таблиця 4. Результати тестування моделі YOLO11m

Клас дефекту	Кількість зразків	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95
Всі	131	0,643	0,611	0,607	0,238
Лінійні	101	0,744	0,775	0,792	0,337
Групові	9	0,442	0,440	0,405	0,109
Інші	21	0,745	0,619	0,623	0,268

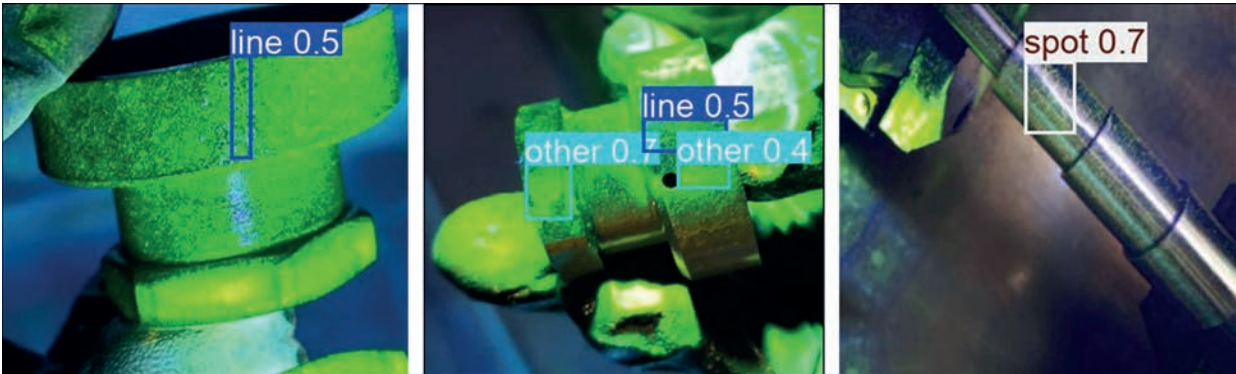


Рис. 3. Приклади коректного детектування різних класів дефектів моделлю YOLO11m

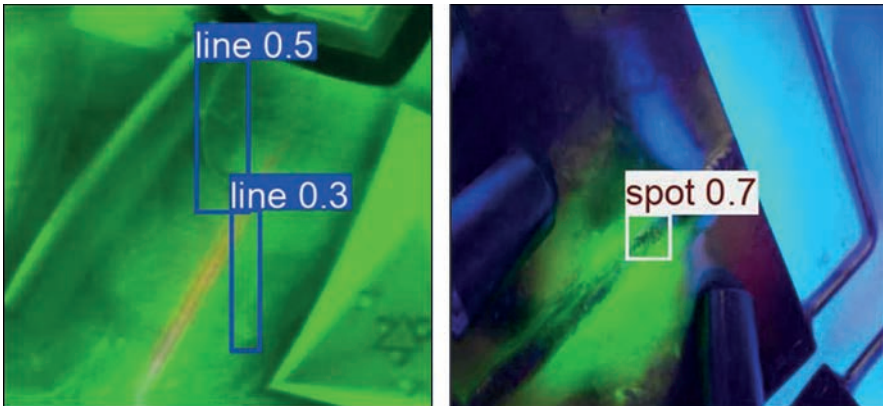


Рис. 4. Приклади хибного детектування дефектів моделлю YOLO11m

практичному застосуванні це означає, що для точкового класу потрібне додаткове уточнення даних і перевірка налаштувань порогів моделі.

Результати хибного виявлення дефектів показано на рис. 4. У цих прикладах видно, що модель може дублювати рамки для одного й того самого дефекту та позначати окремі елементи фону як дефект. Найчастіше це проявляється на ділянках із вираженою текстурою та локальними відблисками, де магнітні візерунки мають лінійну форму. Такі помилки знижують значення Precision, оскільки збільшують кількість хибних спрацювань. Їх можна зменшити через підвищення порога впевненості мережі, коректне налаштування алгоритму NMS, а також шляхом додавання до навчального набору більшої кількості прикладів зі складним фоном без дефектів.

На рис. 5 наведено нормалізовану матрицю помилок мережі на тестовій множині. Матриця показує, як часто модель відносить розмічені об'єкти до кожного класу або фону. Можна помітити, що більшість лінійних та інших дефектів класифікуються правильно, проте частина фонових областей

помилково відноситься до класу лінійних. Це узгоджується з прикладами на рис. 4 і вказує на чутливість моделі до лінійних структур фону.

У той же час оцінки для групових дефектів потребують обережної інтерпретації, оскільки їхня кількість у тестовій множині є незначною. У зв'язку з цим доцільно додатково перевірити якість мо-

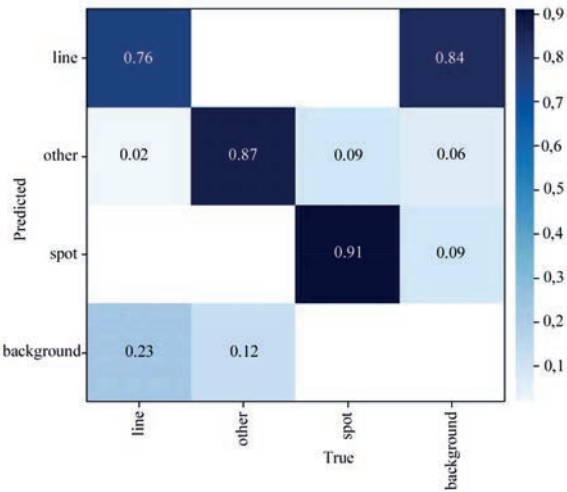


Рис. 5. Нормалізована матриця помилок моделі YOLO11m

делі на розширеній вибірці та в умовах із більшою варіативністю магнітних візерунків фону.

У цілому порівняння модифікацій YOLO11 показало, що модель середнього розміру забезпечує найкращий баланс між якістю та швидкістю на наявному наборі даних. Результати підтверджують перспективність використання моделей глибинного навчання для автоматизації аналізу зображень МПК. Ключовими викликами залишаються зменшення хибних спрацювань на складному фоні та нарощування навчальних даних про рідкісні дефекти.

Висновки

У роботі проведено порівняльний аналіз ефективності автоматизованого виявлення дефектів на зображеннях магнітопорошкового контролю із застосуванням моделей сімейства YOLO11. Отримані результати підтверджують, що вибір конкретної модифікації моделі є критичним етапом побудови системи на практиці, оскільки він визначає баланс між точністю виявлення дефектів та обчислювальними витратами. Це особливо важливо для зображень МПК, де зернистий фон і локальні відблиски можуть маскувати слабоконтрастні магнітні візерунки та провокувати хибні спрацювання.

Порівняння модифікацій YOLO11 показало, що найкраще значення mAP50-95 на рівні 0,238 на наявному наборі даних забезпечує модель YOLO11m. Модель YOLO11l демонструє дещо вищі Precision і Recall, однак її mAP50-95 є нижчим, що вказує на те, що збільшення розміру моделі не обов'язково покращує якість локалізації рамок дефектів у даних умовах. У зв'язку з цим YOLO11m можна розглядати як найзбалансованіший варіант для подальшого розвитку системи, оскільки вона підвищує повноту виявлення без непропорційного погіршення швидкодії.

Детальні результати для YOLO11m показали, що на поточному наборі даних найкраще виявляються лінійні дефекти, тоді як найскладнішими залишаються групові дефекти, для яких mAP50-95 становить лише 0,109. Додатково встановлено, що хибні спрацювання частіше виникають на ділянках із вираженою текстурою та локальними відблисками, тому для практичного застосування доцільно перевіряти вплив порога впевненості та інших налаштувань моделі й доповнювати навчальний набір прикладами складного фону без дефектів.

Результати свідчать про перспективність використання моделей глибинного навчання для автоматизації аналізу зображень МПК. Якість такого детектування помітно залежить від різноманіття даних і представленості рідкісних класів дефектів. У подальших дослідженнях доцільно розши-

рити тестування на зображеннях із різними режимами освітлення та різною геометрією деталей, а також перевірити вплив налаштувань гіперпараметрів моделі на стабільність метрик. При цьому слід враховувати, що запропонований підхід є інструментом автоматизації процедури, але кінцеве рішення щодо критичності дефекту та придатності виробу має приймати кваліфікований фахівець із неруйнівного контролю.

Подяка

Цю роботу виконав Центр компетенцій з мехатроніки та чистих технологій «Мехатроніка, інновації, робототехніка, автоматизація та чисті технології» – MIRACle за фінансової підтримки контракту № BG16RFPR002-1.014-0019-C01, що фінансується Європейським фондом регіонального розвитку (ЄФРР) через Програму «Дослідження, інновації та цифровізація для розумної трансформації» (PRIDST) 2021–2027.

Список літератури/References

1. International Organization for Standardization (2016) ISO 9934-1:2016 *Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Pt 1 General principles*. Geneva, ISO.
2. Яקותюк В.С., Глабець С.М., Лисенко Ю.Ю., Момот А.С. (2025) Практичний досвід застосування та аналіз ефективності різних магнітних суспензій. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 44–48. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.04.06>
3. Yakotiuk, V.S., Hlabets, S.M., Lysenko, Yu.Yu., Momot, A.S. (2025) Practical experience of using and analyzing the efficiency of various magnetic suspensions. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 4, 44–48 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.04.06>
4. Yang, Y., Yang, Y., Li, L. et al (2022) Automatic defect identification method for magnetic particle inspection of bearing rings based on visual characteristics and high-level features. *Appl. Sci.*, 12(3), 1293. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031293>
5. Mao, Z., Wu, Q., Qin, X. et al (2023) Magnetic particle inspection. Status, advances, and challenges. Demands for automatic non-destructive testing. *NDT & E International*, 143, 103030. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.103030>
6. Wu, Q., Qin, X., Dong, K. et al (2023) A learning-based crack defect detection and 3D localization framework for automated fluorescent magnetic particle inspection. *Expert Systems with Applications*, 214, 118966. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118966>
7. Tout, K., Meguenani, A., Urban, J.-P., Cudel, C. (2021) Automated vision system for magnetic particle inspection of crankshafts using convolutional neural networks. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, 112(8), 3307–3326. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06467-4>
8. Chen, J., Tong, J., Su, J. (2025) Design of a real-time abnormal detection system for rotating machinery based on YOLOv8. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11, 1683572. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1683572>
9. Momot, A., Kretsul, V., Muraviov, O., Galagan, R. (2024) Automated defect detection in printed circuit boards based on the YOLOv5 neural network. *The Paton Welding J.*, 4, 46–52. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.04.07>
10. Shi, A., Wu, Q., Qin, X. et al (2024) Lightweight detector based on knowledge distillation for magnetic particle inspection of forgings. *NDT & E International*, 143, 103052. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103052>
11. Wu, Q., Qin, X., Xiong, X. (2025) Investigating the effects of data and image enhancement techniques on crack detection

- accuracy in FMPI. *Advanced Engineering Informatics*, 65(PA), 103169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103169>
11. Wang, H., Du, W., Xu, G. et al (2024) Automated crack detection of train rivets using fluorescent magnetic particle inspection and instance segmentation. *Sci. Reports*, **14**, 10666. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61396-6>
 12. Ivasenko, I.B., Vorobel, R.A., Uchanin, V.M. et al. (2023) Detection of chalcopyrite in digital images of copper ore sample sections. *Information Extraction and Processing*, 51(127), 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2023.51.052>
 13. Storozhyk, D., Protasov, A., Kuts, Yu. et al. (2024) Enhancing neural network efficiency in automated image analysis for thermal nondestructive testing. *J. of Theoretical and Applied Mechanics*, **54**, 242–252. DOI: <https://doi.org/10.55787/jtams.24.54.2.242>
 14. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. (2016) You only look once: Unified, real-time object detection. In: *Proce. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640>
 15. Wang, J., Wang, Y., Li, X. et al (2025) SCI-YOLO11: An improved defect detection algorithm for transmission line insulators based on YOLO11. *Plos One*, 20(10), e0322561. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322561>
 16. Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C.K.I. et al (2010) The PASCAL visual object classes (VOC) challenge. *Int. J. of Comput. Vis.*, **88**, 303–338. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>

AUTOMATION OF THE DEFECTS DETECTION PROCESS IN MAGNETIC PARTICLE INSPECTION IMAGES

A.S. Momot¹, V.S. Yakotyuk¹, Iu.Yu. Lysenko^{1,3}, R.M. Galagan¹, Y. Mirchev^{2,3}

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: j.lysenko@kpi.ua

²Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences. 1113, Acad. G. Bonchev Str., Sofia, Bulgaria

³Center of Competence for Mechatronics and Clean Technologies «Mechatronics, Innovation, Robotics, Automation and Clean Technologies» – MIRACle, Bulgaria. E-mail: a.momot@kpi.ua

This paper considers the possibilities of applying deep learning models of the YOLO11 family to the task of automating defect detection in magnetic particle inspection images. Magnetic particle inspection is widely used to test ferromagnetic parts, and decisions based on its results affect operational safety and costs. At the same time, magnetic particle inspection images often contain a grainy background, uneven lighting and glare, which masks low-contrast magnetic patterns and reduces the reliability of simple analysis methods. A software approach is proposed in which camera frames are automatically processed by a neural network, and the output forms defect localization frames and classifies them by type. Real images were used to train the models, the number of which was increased by augmentation through transformations that simulate typical deviations in shooting parameters. The dataset was labelled according to three defect classes and divided into training, validation, and test sets. Training and comparison of the YOLO11n, YOLO11s, YOLO11m, and YOLO11l models were performed using the Precision, Recall, mAP50, and mAP50-95 metrics and frame processing time. It was shown that increasing the size of the model does not provide a proportional increase in quality on the available dataset. The best balance between accuracy and speed was provided by the YOLO11m model with an mAP50-95 score of 0.238 and a frame processing time of 29.5 ms. Analysis of the training results showed higher quality detection of linear defects and complexity in detecting small group defects, which is due to the lack of training data and noisy background. Recommendations are given on methods to reduce false positives and expand data to improve the representativeness of the training set. 16 Ref., 4 Tabl., 5 Fig.

Keywords: magnetic particle inspection, defect detection, computer vision, artificial intelligence, neural networks

Acknowledgment

This work was accomplished by the Center of Competence for Mechatronics and Clean Technologies «Mechatronics, Innovation, Robotics, Automation and Clean Technologies» – MIRACle, with the financial support of contract No. BG16RFPR002-1.014-0019-C01, funded by the European Regional Development Fund (ERDF) through the Programme «Research, Innovation and Digitalisation for Smart Transformation» (PRIDST) 2021–2027.

ORCID

Момот А.С. – <https://orcid.org/0000-0001-9092-6699>, Якотюк В.С. – <https://orcid.org/0009-0006-5253-4241>,
Лисенко Ю.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-9110-6684>, Галаган Р.М. – <https://orcid.org/0000-0001-7470-8392>,
Мірчев Й. – <https://orcid.org/0009-0002-4882-5282>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

А.С. Момот

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, Україна, м. Київ, Берестейський проспект, 37.

E-mail: a.momot@kpi.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

А.С. Момот, В.С. Якотюк, Ю.Ю. Лисенко, Р.М. Галаган, Й. Мірчев (2026) Автоматизоване розпізнавання дефектів на зображеннях магнітопорошкового контролю на основі моделі YOLO11. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **03**, 38–47. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.03.03>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 01.06.2026

Отримано у переглянутому вигляді 29.07.2026

Підписано до друку 06.09.2026

Оприлюднено 22.09.2026

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЦЕСУ УКЛАДАННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ

А.Г. Протасов, Я.В. Стешенко

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

Статтю присвячено удосконаленню замкненої автоматизованої системи керування процесом укладання асфальтобетонного покриття шляхом розробки алгоритму нейромережевої ідентифікації об'єкта керування та інтеграції його в контур системи. На основі багатосарового персептрона (perceptron) сформовано логічну схему, що відтворює нелінійний комплексний вплив термічних і механічних чинників на формування щільності покриття. Запропонований підхід дозволяє подолати ключову проблему традиційних аналітичних моделей, а саме, їхню низьку адаптивність до мінливих польових умов і необхідність постійного лабораторного перерахунку та калібрування емпіричних коефіцієнтів при переході до іншого складу суміші чи типу обладнання. Завдяки процедурі стандартизації вхідних ознак і застосуванню механізмів регуляризації вдалося знизити середню абсолютну помилку визначення щільності асфальтобетонного шару на тестовій вибірці. Це забезпечує підвищення точності та достовірності контролю, гарантуючи надійне виявлення потенційних зон недоуцільнення ще на етапі укладання суміші. Доведено високу обчислювальну ефективність алгоритму, оскільки експериментально зафіксований середній час інференції (inference time) нейромережевої моделі становить 4,038 мс, що підтверджує придатність моделі для систем реального часу. Для чисельного підтвердження переваг нейромережевого підходу було проведено порівняльний аналіз статистичних метрик точності для базової аналітичної моделі, класичної лінійної регресії та побудованого багатосарового персептрона. Розглянуто збіжність фактичних і прогнозованих нейромережевою моделлю значень щільності асфальтобетонного покриття. Характер розподілу точок підтверджує, що розроблена структура MLP (Multilayer Perceptron) здатна з високою точністю відтворювати складні взаємозв'язки між вхідними технологічними чинниками та підсумковим показником якості без системних зміщень чи накопичення похибок на краях діапазону. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: автоматичне керування, асфальтобетонне покриття, нейромережева ідентифікація, багатосаровий персептрон, час інференції

Вступ. Укладання асфальтобетонного покриття є одним із найчутливіших етапів дорожнього будівництва з точки зору керування якістю: температура суміші, тиск ущільнення та вологість повітря взаємодіють нелінійно, а відхилення будь-якого з параметрів від допустимого діапазону веде до передчасного руйнування покриття. Регулятор із внутрішньою моделлю (Internal Model Control, ІМС) є перспективним рішенням для керування таким процесом, однак його ефективність напряму залежить від точності моделі об'єкта, вбудованої в структуру регулятора. Традиційно цю модель отримують аналітично через диференціальні рівняння або передавальні функції, проте для реальних умов укладання такий підхід дає обмежені результати: калібрувальні коефіцієнти, визначені в лабораторії, змінюються при переході до іншого складу суміші чи обладнання, а самі залежності між керуючими діями та щільністю покриття є суттєво нелінійними. Використання нейромережевої ідентифікації може вирішити такі питання інакше: модель об'єкта будується безпосередньо

за даними вимірювань без необхідності виводити аналітичні вирази для кожного конкретного випадку. Нейронні мережі здатні відтворювати складні нелінійні відображення між вхідними та вихідними змінними процесу з високою точністю, що підтверджено для задач ідентифікації динамічних систем різної природи [1, 2]. Водночас поєднання нейромережевої моделі з ІМС-регулятором дозволяє зберегти аналітично обґрунтовані властивості цієї архітектури керування, позбувшись необхідності точної параметричної ідентифікації нелінійного об'єкта.

Мета роботи – вирішення інженерної задачі нейромережевої ідентифікації об'єкта керування для інтелектуальних систем дорожнього будівництва, що дозволить підвищити адаптивність традиційних аналітичних моделей до мінливих польових умов, які безпосередньо впливають на якість технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень. Проблемі розробки замкнених автоматизованих систем керування технологічними процесами при укладанні асфальтобетонних покриттів присвячено [3]. Застосування таких систем дозволяє підвищити

© Протасов А.Г., Стешенко Я.В., 2026.

Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

якість асфальтобетонного покриття, оптимізувати витрати ресурсів і забезпечити відповідність готової продукції нормативним вимогам. Основним результатом дослідження авторів є розробка структурної схеми замкненої системи керування технологічним процесом, яку побудовано на принципі оперативного контролю та регулювання технологічних параметрів у процесі укладання асфальтної суміші, що дає змогу адаптувати процеси ущільнення та нагріву асфальтобетону до зміни зовнішніх факторів.

У [4] запропоновано інтелектуальну систему адаптивного керування, яка дозволяє вирішити проблему затримки реакції традиційних автоматизованих комплексів на стохастичні зміни зовнішніх чинників під час укладання асфальтобетону. Проте існують певні обмеження, які потребують подальшого вивчення. Верифікацію та валідацію системи було проведено переважно на ділянках із рівною геометрією та в обмеженому температурному діапазоні, що не повною мірою відображає складність робіт на об'єктах зі складним рельєфом, поворотами або ухилами.

Автори [5] розглянули проблему відсутності інструменту для безперервного контролю якості ущільнення гарячої асфальтобетонної суміші безпосередньо під час будівництва. Для вирішення цієї проблеми автори висунули гіпотезу, що вібраційний коток і шар гарячої суміші утворюють зв'язану динамічну систему, вібраційні характеристики якої змінюються в міру ущільнення матеріалу. На цій основі вони розробили аналізатор ущільнення, де нейронна мережа класифікувала весь частотний спектр прискорення барабана котка. Вхідними даними разом із вібраційними сигналами були: температура суміші, товщина шару й тиск ущільнення. Цільовою змінною виступав рівень ущільнення, виражений як клас, а не числове значення щільності.

Отримані результати підтвердили, що нейронна мережа здатна класифікувати рівні ущільнення в реальному часі з точністю, достатньою для польового контролю якості. Аналізатор успішно ідентифікував недоущільнені ділянки під час проходження котка, що давало оператору можливість вжити заходів до завершення робіт.

Разом із тим робота має кілька обмежень, важливих у контексті задачі ідентифікації об'єкта керування. По-перше, нейронна мережа виконувала класифікацію рівнів ущільнення, а не регресійне прогнозування числового значення щільності, що робить її непридатною безпосередньо як кількісну модель об'єкта в структурі регулятора. По-друге,

модель навчалась для конкретних типів суміші та потребувала повторного калібрування при переході до іншого матеріалу. По-третє, задача ідентифікації вирішувалась автономно, поза будь-якою структурою керування, тому питання використання отриманої моделі в алгоритмі регулятора залишилось поза межами дослідження.

У [6] автори порушили проблему недостатнього розвитку інтелектуального ущільнення для асфальтобетонних покриттів. Авторами було розроблено нейромережевий класифікатор на базі ANN (Artificial Neural Network) і проведено польовий експеримент із реальним вібраційним котком. У процесі ущільнення збирались вібраційні сигнали барабана, після чого виконувалась обробка сигналів із виділенням частотних ознак. Для з'ясування впливу структури прихованих шарів на якість класифікації розглядалось чотири конфігурації мережі з різною кількістю нейронів. Навчання та тестування проводились на польових даних конкретного будівельного об'єкта.

Результати показали, що ANN-класифікатор стабільно визначає рівень ущільнення в реальному часі, а його прогнози добре узгоджувались із вимірюваннями без'ядерного щільноміра. Автори зробили висновок про значний потенціал даного підходу для застосування в умовах реального будівництва. Як і в [5], нейронна мережа вирішувала задачу класифікації рівнів ущільнення, а не регресійного прогнозування числового значення щільності. Питання про те, як отримана модель могла б використовуватись у структурі регулятора, не розглядалось.

У [7] було розглянуто проблему недостатньої точності існуючих систем інтелектуального ущільнення, які враховують лише обмежений набір параметрів – зазвичай температуру або кількість проходів котка – без урахування складної взаємодії між технічними характеристиками обладнання, властивостями суміші та зовнішніми умовами.

Для побудови моделі прогнозування щільності автори розробили комплексну систему збору даних безпосередньо з котка, оснащеного GPS-модулем, інерційними датчиками (IMU), термодатчиками та акселерометрами. Дані збирались у процесі ущільнення гарячої суміші на реальних дорожніх об'єктах із одночасним відбором кернів для верифікації моделі. Після синхронізації за координатами, очищення від шумів і нормалізації сигнали подавались на вхід трьох моделей машинного навчання – XGBoost, ANN та Random Forest, які порівнювались між собою. Найбільш значущими факторами за результатами аналізу виявились:

температура суміші, амплітуда коливань барабана, швидкість руху котка та кількість проходів.

Найкращу точність показала модель XGBoost: $R^2 = 0,94$, $MAE = 0,018 \text{ г/см}^3$, $RMSE = 0,026 \text{ г/см}^3$. На основі результатів прогнозування автори сформували інтерактивну карту ущільнення, що візуалізувала щільність у кожній точці покриття в реальному часі.

Разом із тим це дослідження має кілька вагомих обмежень. Модель тестувалась виключно на ділянках із рівною геометрією, тому її придатність для складних топографічних умов – ухилів і поворотів – не встановлена. Діапазон температур укладання в дослідженні становив $145 \dots 165 \text{ }^\circ\text{C}$, тобто ефективність методу за нижчих температур залишається невизначеною. Ключовим обмеженням у контексті даної роботи є те, що модель розглядалась суто як інструмент прогнозування щільності, а не як внутрішня модель об'єкта в структурі регулятора. Питання про її застосування в алгоритмі керування залишилось поза межами дослідження.

Фундаментальну проблему теорії керування, а саме, як застосувати добре обґрунтовану архітектуру ІМС (In-Memory Computing) до нелінійних систем, для яких аналітична модель є або невідомою, або надто складною для практичного використання, порушили автори [8]. Вони запропонували використовувати нейронну мережу двояко – як пряму модель нелінійного об'єкта в структурі ІМС, так і інверсну модель для формування керуючого сигналу. Нейронна мережа навчалась апроксимувати нелінійне відображення вхід-вихід системи за даними спостережень. Окремо досліджувалось питання існування та характеристики інверсних операторів для класу нелінійних динамічних систем, оскільки інвертованість моделі є необхідною умовою застосовності підходу. Для верифікації концепції автори використали симуляційні приклади нелінійних систем різної складності.

Результати показали, що нейромережевий ІМС забезпечує якісне керування нелінійними об'єктами навіть тоді, коли лінійний регулятор не здатний забезпечити стійкість системи. Разом із тим робота має обмеження, які безпосередньо стосуються завдань даного дослідження. Уся верифікація проводилась виключно на симуляційних моделях без прив'язки до конкретних технологічних процесів. Точність нейромережевої моделі об'єкта та якість апроксимації інверсної динаміки залежать від обсягу та якості навчальних даних, що в умовах реального виробничого процесу з нестационарними характеристиками є нетривіальною проблемою.

Автори не розглядали питання практичної реалізації підходу для об'єктів із багатовимірними входами та виходами, де координатне ущільнення кількох контурів керування суттєво ускладнює задачу ідентифікації.

Аналіз вище розглянутих досліджень виявляє стійку закономірність: роботи, присвячені нейромережевому прогнозуванню щільності асфальтобетону [5, 6, 7], вирішують задачу ідентифікації об'єкта як автономну задачу прогнозування й не розглядають отримані моделі як компонент регулятора. Робота [8] вирішує обернену задачу – демонструє, як нейромережева модель об'єкта може використовуватись в ІМС-структурі, однак залишається в рамках симуляційних прикладів і не прив'язана до жодного конкретного технологічного процесу.

Таким чином, у літературі відсутні роботи, де нейромережева модель об'єкта будується на даних реального технологічного процесу укладання асфальтобетону й водночас розглядається як внутрішня модель для ІМС-регулятора замкненої системи керування. Саме ця прогалина є предметом даного дослідження. Для її усунення пропонується побудувати нейромережеву модель об'єкта керування на основі технологічних даних процесу укладання, верифікувати її точність порівняно з аналітичною моделлю, що використовується в раніше розробленій системі авторів [1, 2], та оцінити придатність отриманої моделі для інтеграції в ІМС-регулятор.

Виклад основного матеріалу. Для перевірки ефективності запропонованого методу нейромережевої ідентифікації було реалізовано комплексне комп'ютерне моделювання процесу ущільнення асфальтобетонного покриття в середовищі розробки Python із використанням бібліотек TensorFlow та Scikit-learn. На основі математичних залежностей, що враховують нелінійний термічний та механічний вплив на матеріал, було згенеровано масив даних обсягом 1000 стохастичних зразків. Кожен запис у базі даних містить інформацію про температуру навколишнього повітря, стан основи, поточну температуру суміші, вологість, швидкість руху й тиск котка.

Сформований масив даних пройшов процедуру випадкового розщеплення у класичному для інженерних задач співвідношенні: 64 % даних було спрямовано на безпосереднє навчання вагових коефіцієнтів, 16 % склали ізольовану валідаційну вибірку для запобігання перенавчанню, а решта 20 % сформували тестовий масив для фінальної перевірки точності ідентифікації. З огляду на суттєву

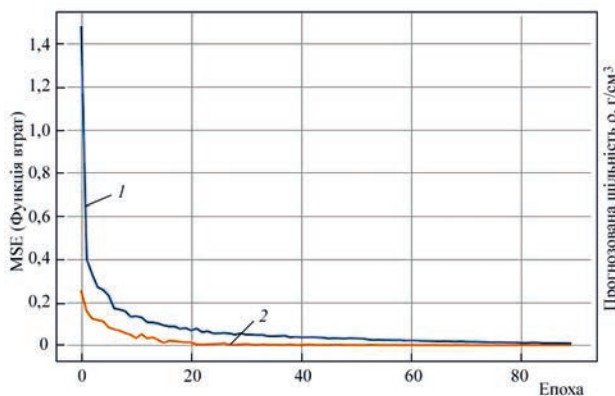


Рис. 1. Динаміка зміни функції втрат на етапах навчання та валідації MLP-моделі: 1 – навчання (Train Loss), 2 – валідація (Val Loss)

різницю в масштабах вимірювання фізичних величин, усі вхідні ознаки нормалізувалися за (1):

$$x' = (x - \mu) / \sigma, \quad (1)$$

де x' – стандартизоване значення ознаки; x – вихідне значення; μ – середнє значення по вибірці; σ – стандартне відхилення.

Архітектура досліджуваної багат шарової нейронної мережі прямого поширення (MLP) містить вхідний шар, два приховані шари з кількістю нейронів 64 та 32 відповідно, а також один вихідний елемент із лінійною функцією активації для прогнозування числового значення щільності матеріалу. Для оптимізації навчання використано алгоритм Adam зі стартовим кроком 0,005, а критерієм зупинки виступила функція мінімізації середньоквадратичної помилки на валідаційних даних. Вихід кожного прихованого шару обчислюється за (2):

$$h = \text{ReLU}(Wx + b), \quad (2)$$

де h – вектор активацій шару; W – матриця вагових коефіцієнтів; x – вектор входів; b – вектор зміщень; $\text{ReLU}(z) = \max(0, z)$ – функція активації.

Результати та обговорення. На рис. 1 наведено динаміку зміни функції втрат на етапах навчання та валідації мережі прямого поширення

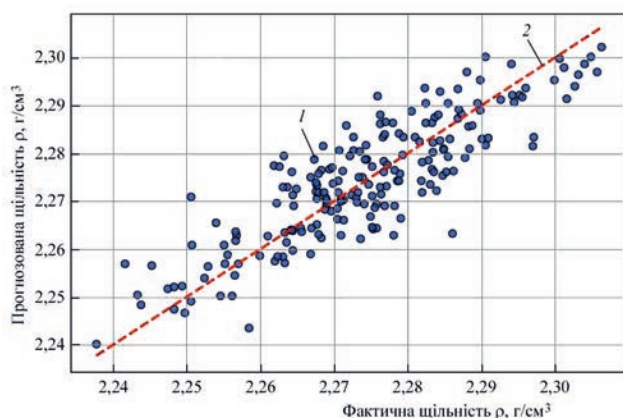


Рис. 2. Збіжність фактичних і прогнозованих нейромережевою моделлю значень щільності асфальтобетонного покриття: ● – прогнози MLP, -- – ідеальний збіг

MLP-моделі. Аналіз отриманого графіка зміни середньоквадратичної помилки дозволяє стверджувати, що процес навчання мережі пройшов стабільно. Початкове стрімке падіння значень функцій втрат як для навчального, так і для валідаційного масивів свідчить про високу швидкість адаптації оптимізатора до нелінійних властивостей імітованого об'єкта. Як видно з графіків, починаючи з тридцятої епохи, криві виходять на стійке плато, при цьому відсутність розходження між ними вказує на ефективну роботу регуляризації та повну відсутність ефекту перенавчання.

Для наочності якості ідентифікації доцільно розглянути розподіл прогнозів нейромережевої структури відносно фактичних значень цільової змінної на тестовій вибірці (рис. 2).

Представлене візуальне співвідношення показує, що сформована стохастична хмара прогнозів концентрується безпосередньо вздовж лінії ідеального збігу в межах реалістичного фізичного діапазону щільності 2,24...2,31 г/см³. Такий характер розподілу точок підтверджує, що розроблена структура MLP здатна з високою точністю відтворювати складні взаємозв'язки між вхідними технологічними чинниками та підсумковим показником якості без системних зміщень чи накопичення похибок на краях діапазону.

Для чисельного підтвердження переваг нейромережевого підходу було проведено порівняльний аналіз статистичних метрик точності для базової аналітичної моделі, класичної лінійної регресії та побудованого багат шарового перцептрона (табл.). Для оцінювання використовувались метрики (3)–(5):

$$\text{MSE} = (1/n) \sum (y_i - \hat{y}_i)^2; \quad (3)$$

$$\text{MAE} = (1/n) \sum |y_i - \hat{y}_i|; \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}}, \quad (5)$$

де n – кількість зразків у тестовій вибірці; y_i – фактичне значення щільності; $\hat{y}_i$ – значення, передбачене моделлю.

Числові значення помилок MAE та RMSE свідчать про високу прогностичну здатність нейромережевої моделі в межах робочого діапазону. Абсолютне відхилення прогнозу щільності від фактичних значень для MLP становить усього 0,0057 г/см³, що дозволяє системі своєчасно реагувати на найменші відхилення від технологічної норми та гарантувати точність ідентифікації недоущільнених ділянок.

Порівняння точності моделей об'єкта керування

Модель	R ²	MAE, г/см³	RMSE, г/см³
Аналітична модель [5]	0,7000	0,0284	0,0317
Лінійна регресія	0,8096	0,0050	0,0060
MLP (нейромережева модель об'єкта)	0,7296	0,0057	0,0071

Окремого аналізу потребує характер розподілу коефіцієнта детермінації. Вище значення R^2 для лінійної регресії у поєднанні з низькою загальною дисперсією цільової змінної в стабільному технологічному коридорі вказує на те, що лінійна модель добре описує усереднену тенденцію. Водночас мінімальні значення абсолютних помилок нейромережі доводять її здатність компенсувати локальні нелінійні збурення, які класичні структури регресії ігнорують.

Окрім точності відтворення статичних характеристик об'єкта, ключовим фактором для побудови систем реального часу є швидкість обчислення керуючого впливу. Було проведено серію випробувань для оцінки часових витрат на інференцію сформованої моделі.

Результати оцінки часових характеристик підтверджують обчислювальну ефективність запропонованого рішення. Середній час інференції побудованої багатошарової нейромережі на один такт керування становить 4,038 мс. Такий показник швидкодії повністю задовольняє жорстким критеріям функціонування систем реального часу.

Зважаючи на те, що реальна швидкість руху дорожніх котків під час ущільнення гарячих сумішей зазвичай коливається в межах 2...5 км/год, просторове зміщення робочого органу за час одного обчислювального такту є мізерно малим. Це дозволяє використовувати розроблену MLP-структуру як внутрішню модель об'єкта в контурі ІМС-регулятора без ризику виникнення затримок у каналі формування керуючих впливів. Побудована модель здатна забезпечити безперервний і точний моніторинг динаміки формування фізико-механічних властивостей покриття безпосередньо в процесі його укладання.

Висновки

Запропонований підхід нейромережевої ідентифікації об'єкта керування дозволив подолати ключову проблему традиційних аналітичних моделей, а саме, їхню низьку адаптивність до мінливих польових умов і необхідність постійного лабораторного перерахунку та калібрування емпіричних коефіцієнтів при переході до іншого складу суміші чи типу обладнання.

Процедура стандартизації вхідних ознак і застосування механізмів регуляризації дозволили знизити середню абсолютну помилку визначення щільності асфальтобетонного шару на тестовій вибірці до рівня 0,0057 г/см³, що забезпечує підвищення точності та достовірності контролю й гарантує надійне виявлення потенційних зон недоущільнення ще на етапі укладання суміші.

Доведено високу обчислювальну ефективність запропонованого алгоритму, який експериментально показав середній час інференції нейромережевої моделі у 4,038 мс, що підтверджує придатність моделі для використання в системі реального часу.

Напрями наступних досліджень. Попри досягнуті переваги, запропонований метод на поточному етапі має кілька недоліків, які визначають межі його застосування. Головним обмеженням розробленої моделі є її висока чутливість до чистоти вхідних даних, адже апаратні збої або високий рівень шуму польових датчиків, як-от оптичних пірометрів чи сенсорів тиску, можуть призвести до локальних спотворень прогнозу щільності. Крім того, архітектура багатошарового персептрона у поточному вигляді є статичною й не здатна враховувати накопичувальний ефект від зміни властивостей суміші впродовж усього робочого дня під впливом коливань температури навколишнього середовища.

У межах майбутніх досліджень планується зосередитися на вирішенні цих обмежень. Наступним кроком наукової роботи стане інтеграція в контур обробки сигналів алгоритмів фільтрації Калмана для мінімізації апаратних шумів вимірювальних пристроїв. Також планується здійснити перехід від класичної структури MLP до рекурентних нейронних мереж або мереж із довгою короткочасною пам'яттю (LSTM). Це дозволить враховувати часові послідовності та динаміку охолодження матеріалу в процесі кількох послідовних проходів котка, забезпечуючи адаптивне самонавчання системи керування безпосередньо під час виконання дорожніх робіт.

Список літератури/References

1. Forgiione, M., Piga, D. (2021) Continuous-time system identification with neural networks: Model structures and fitting criteria. *European J. of Control*, **59**, 69–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2021.01.008>
2. Dong, A., Starr, A., Zhao, Y. (2023) Neural network-based parametric system identification: A review. *Intern. J. of Systems Science*, **54**(13), 2676–2688. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207721.2023.2241957>
3. Стешенко Я.В., Протасов А.Г. (2025) Автоматизована система керування технологічним процесом укладання асфальтобетонного покриття. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 30–35. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.02.05>
4. Steshenko, Y. V., Protasov, A. G. (2025) Automated control system for the technological process of asphalt concrete coating laying. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **2**, 30–35 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.02.05>
5. Стешенко Я.В., Протасов А.Г. (2026) Інтелектуальна система адаптивного керування технологічним процесом укладання асфальтобетону на основі нейромережевих моделей. *Наукові новини КПІ*, **142**(1), 32–39. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2026.1.350095>
6. Steshenko, Y. V., Protasov, A. G. (2026) Intelligent system for adaptive control of the technological process of laying asphalt concrete based on neural network models. *KPI Science News*, **142**(1), 32–39 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2026.1.350095>

5. Commuri, S., Mai, A.T., Zaman, M. (2011) Neural network-based intelligent compaction analyzer for estimating compaction quality of hot asphalt mixes. *J. of Construction Engineering and Management*, 137(9), 634–644. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000343](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000343)
6. Xue, Z., Cao, W., Liu, S. et al. (2021) Artificial neural network-based method for real-time estimation of compaction quality of hot asphalt mixes. *Appl. Sci.*, 11(15), 7136. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11157136>
7. Yu, S., Shen, S., Lu, M. (2023) Data sensing and compaction condition modeling for asphalt pavements. *Automation in Construction*, 154, 105021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105021>
8. Hunt, K.J., Sbarbaro, D. (1991) Neural networks for nonlinear internal model control. *IEE Proc. D: Control Theory and Applications*, 138(5), 431–438. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-d.1991.0059>

NEURAL NETWORK IDENTIFICATION OF CONTROL OBJECT IN THE SYSTEM OF AUTOMATED ASPHALT CONCRETE LAYING PROCESS

A.G. Protasov, Y.V. Steshenko

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

The article is devoted to the improvement of a closed-loop automated control system for the asphalt concrete paving process by developing an algorithm for neural network identification of the control object and its integration into the system circuit. Based on a multilayer perceptron, a logical structure has been formed that reproduces the nonlinear complex influence of thermal and mechanical factors on the formation of coating density. The proposed approach overcomes the key problem of traditional analytical models, namely their low adaptability to changing field conditions and the need for constant laboratory recalculation and calibration of empirical coefficients when switching to a different mixture composition or equipment type. It was possible to reduce the average absolute error in determining the density of the asphalt concrete layer on the test sample owing to the procedure for standardizing the input features and the use of regularization mechanisms. This provides increased accuracy and reliability of control, guaranteeing reliable detection of potential areas of under compaction even at the stage of placing the mixture. At the same time, the high computational efficiency of the algorithm has been proven, since the experimentally recorded average inference time of the neural network model is 4.038 ms, which confirms the suitability of the model for real-time systems. A comparative analysis of statistical accuracy metrics was conducted for the basic analytical model, classical linear regression, and the constructed multilayer perceptron to numerically confirm the advantages of the neural network approach. The convergence of the actual and predicted by the neural network model values of the density of asphalt concrete paving is considered. The nature of the distribution of points confirms that the developed MLP (Multilayer Perceptron) structure is capable of reproducing with high accuracy the complex relationships between the input technological factors and the final quality indicator without systematic biases or accumulation of errors at the range edges. 8 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

Keywords: automatic control, asphalt concrete paving, neural network identification, multilayer perceptron, inference time

ORCID

Протасов А.Г. – <https://orcid.org/0009-0003-8770-7251>, Стешенко Я.В. – <https://orcid.org/0009-0003-5367-1529>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

А.Г. Протасов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37.

E-mail: a.g.protasov@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

А.Г. Протасов, Я.В. Стешенко (2026) Нейромережева ідентифікація об'єкта керування в системі автоматизованого процесу укладання асфальтобетонного покриття. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 03, 48–53.

DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.03.04>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 12.08.2026

Отримано у переглянутому вигляді 28.08.2026

Підписано до друку 06.09.2026

Оприлюднено 22.09.2026

НОВА КНИГА

Ниркова Л.І., Осадчук С.О. Корозійне розтріскування сталей магістральних газопроводів: оцінювання та запобігання. — Київ: Наукова Думка, 2023. — 216 с. ISBN 978-966-00-1845-7.



Монографію присвячено проблемі корозійного розтріскування трубних сталей магістральних газопроводів. Викладено результати багаторічних досліджень та висвітлено методологію щодо дослідження та оцінювання в лабораторних умовах схильності трубної сталі (на прикладі сталі X70) до корозійного розтріскування за катодного захисту. Проаналізовано механізм корозійного розтріскування залежно від потенціалу поляризації. Наведено рекомендації для комплексного протикорозійного захисту лінійної частини магістральних газопроводів на потенційно корозійно-небезпечних ділянках. Зазначені результати впроваджено під час розроблення основних положень СОУ 60.3-30019801-070, ДСТУ Н Б А.3.1-29, зміни № 1 до ДСТУ 4219.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, що досліджують питання забезпечення довготривалої корозійної та корозійно-механічної стійкості зварних трубопроводів.

З книгою можна ознайомитись в бібліотеці ІЕЗ ім. Є.О. Патона та в редакції журналу.

XIV ЄВРОПЕЙСЬКА КОНФЕРЕНЦІЯ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

XIV Європейська конференція та виставка з неруйнівного контролю (ECNDT 2026) проходила в італійській Вероні. З 15 по 19 червня 2026 р. цей провідний європейський захід, присвячений неруйнівному контролю, зібрав у виставковому центрі Veronafiere фахівців, компанії, університети, дослідницькі центри, органи сертифікації та установи з усього світу.

Конференція та виставка підтвердили стратегічну роль неруйнівного контролю у забезпеченні безпеки, якості, надійності та сталості промислових процесів, водночас надаючи міжнародну платформу для обговорення технологічних інновацій, прикладних досліджень, навчання, кваліфікації персоналу та розвитку ринку.

Результати ECNDT 2026 сміливо можна назвати видатними: представлено 54 країни; число учасників 3900; понад 330 компаній-експонентів; оприлюднено 944 науково-технічні доповіді; понад 20 000 м² виставкової та конференційної площі; п'ять днів конференцій, технічних виставок, можливостей для спілкування та соціальної програми.

Цифри підтверджують міжнародний масштаб заходу та зростаючий інтерес до технологій інспекції, контролю якості, моніторингу, технічного обслуговування та управління цілісністю матеріалів, компонентів та інфраструктури.

Конференція ECNDT 2026 пропонувала комплексну науково-технічну програму, велику виставкову площу та численні можливості для спілкування, сприяючи діалогу між дослідницькою, промисловою та сертифікаційною спільнотами. Участь міжнародних експертів, доповідачів та

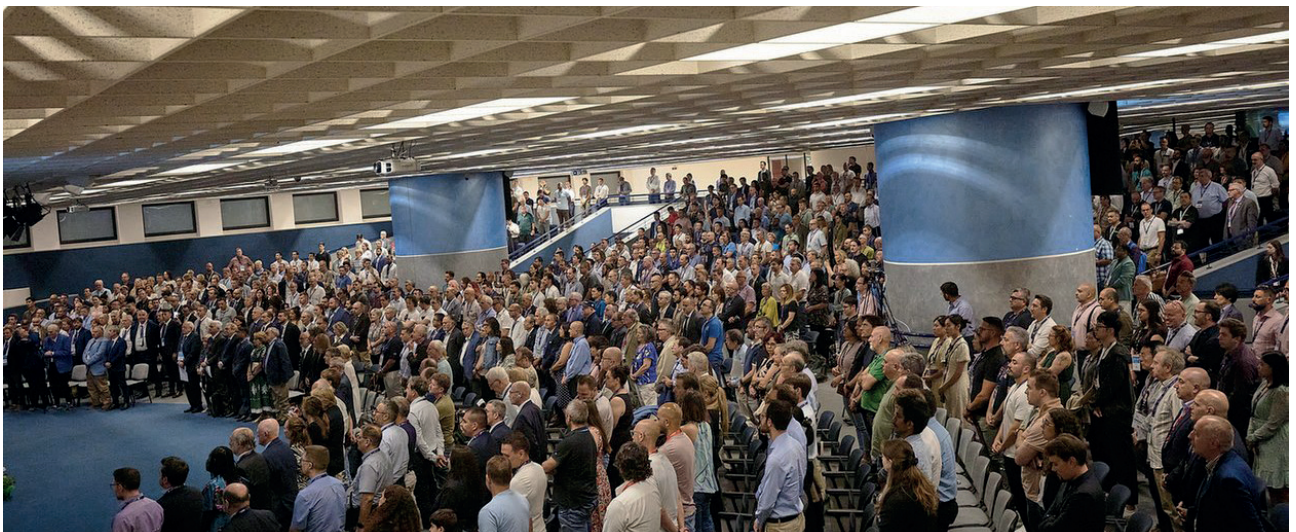
компаній зробила Верону глобальним центром майбутнього інспекції та неруйнівного контролю.

На закритті конференції Даніеле Бізі, президент XIV ECNDT 2026, віце-президент Італійського товариства неруйнівного контролю (AIPnD) зазначив, що ECNDT 2026 стала надзвичайно важливою віхою для світової спільноти неруйнівного контролю. Якість наукового внеску, активна участь промисловості та обмін досвідом між фахівцями з усього світу підтверджують значну роль нашої галузі у просуванні промислових і технологічних інновацій.

В емоційному виступі Еджіо Тубероза, співголова XIV ECNDT 2026, президент Італійського товариства неруйнівного контролю (AIPnD) сказав: «Мрією було повернути Європейську конференцію до Італії, і ця мрія стала реальністю завдяки всім вам. Однак мрії можна досягти лише з великою пристрастю та відданістю, і перш за все завдяки співпраці та підтримці сильної команди. Як оператори та техніки НК, ми прагнемо бути будівниками кращого світу. Ми несемо відповідальність за інциденти, які ніколи не трапляються. Ми виступаємо за світ миру та братерства, будуючи мости між країнами. З цієї причини логотип ECNDT 2026 зображує три арки, три мости, які ідеально об'єднують нації та народи».

Усі фахівці можуть самостійно познайомитися з перебігом конференції на сайті www.ecndt2026.org.

Спонсорами конференції були провідні світові виробники засобів неруйнівного контролю Gilardoni (www.gilardoni.it), Smartndt (www.smartndt.it), ADG (www.adgsrl.com), CGM Cigiemme (www.cgm-



Урочисте відкриття XIV Європейської конференції з НК

cigiemme.com), Eddyfi Technologies (www.info.eddyfi.com.en), Evident (www.ims.evidentscientific.com), TPAC (www.thephasedarraycompany.com), Waygate Technologies (www.bakerhughes.com), ZEISS (www.zeiss.com) та ін.

Участь українських фахівців у роботі ECNDT 2026 була організована Українським товариством НКТД. У конференції взяли участь члени Правління УТ НКТД Валентин Учанін (ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України), Юрій Посипайко (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України), Світлана Щупак (НААУ), а також Юлія Лисенко (НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»). Українське товариство НКТД було представлено окремим стендом у розділі національних товариств із НК на виставці.

Науковці, інженери та виробничники України регулярно брали участь у подібних Європейських та Світових конференціях і виставках із 1998 р. Групи фахівців з України складали 20–30 осіб, а число представлених доповідей було 10–20. Цього року до програми конференції були включені 7 доповідей українських авторів:

ID121, Detection of Fatigue Cracks in Multilayer Riveted Aircraft Structures by Double Differential Eddy Current Probes (Виявлення тріщин втоми у багатошарових клепанних конструкціях літаків за допомогою подвійних диференціальних вихрострумових перетворювачів), Валентин Учанін,

Giuseppe Nardoni (Італія), Mario Turconi (Італія), Marco Feroldi (Італія);

ID122, Parameters of the Magnetic Hysteresis Loop as Information Features for Non-Destructive Evaluation of the Mechanical Characteristics and Hydrogen Concentration of Ferrous Steels (Параметри петлі магнітного гістерезису як інформаційні ознаки для неруйнівної оцінки механічних характеристик і концентрації водню в чорних сталях), Валентин Учанін, Giuseppe Nardoni (Італія), Андрій Сиротюк, Орест Осташ, Віталій Овсяников;

ID123, Ultrasonic Monitoring of the Large-scale Threaded Connections during in-service Maintenance in the Oil and Gas Industry (Ультразвуковий моніторинг великогабаритних різьбових з'єднань під час експлуатаційного обслуговування в нафтогазовій промисловості), Олег Карпаш, Giuseppe Nardoni (Італія), Ігор Рибіцький, Валентин Учанін;

ID315, Monitoring the Technical Condition of the Fuel Storage Facility at the Ukrainian Antarctic Academic Vernadsky Station (Моніторинг технічного стану резервуарів для палива на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський»), Юрій Посипайко, Анатолій Андреев;

ID345, Application of NDT Magnetic Property (Coercivity) Measuring Method for Indicating Mechanical State of Steel after Induction Pipe Bending (Застосування методу вимірювання магнітних властивостей (коерцитивної сили) неруйнівним



На стенді компанії I&T Nardoni Institute: зліва направо – Юрій Посипайко, Юлія Лисенко, Giuseppe Nardoni (Президент I&T Nardoni Institute), Валентин Учанін



Юрій Посипайко та Світлана Щупак на стенді УТ НКТД контролем для індикації механічного стану сталі після індукційного згинання труб), Роман Соломаха, Connor O'Shea (Канада), Геннадій Безлюдько;

ID382, Analytical-Numerical Signal Modeling for Eddy Current Probe in Subsurface Defect Detection Tasks (Аналітико-чисельне моделювання сигналів вихрострумowego перетворювача в задачах виявлення підповерхневих дефектів), Юлія Лисенко, Юрій Куц, Валентин Учанін, Yordan Mirchev (Болгарія);



Учасники конференції перед початком опери Д. Верді «Аїда»

ID633, Evaluation of Defect Measurement Uncertainty in Welds of Polyethylene Pipes using ToFD (Оцінка невизначеності вимірювання дефектів у зварних швах поліетиленових труб за допомогою методу ToFD), Сергій Глабець, Володимир Єременко, Yordan Mirchev (Болгарія).

Слід зазначити, що д.т.н. Валентин Учанін із ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України був членом Наукового комітету конференції та модератором засідань секції «Вихрострумний контроль».

Серед учасників виставки була відома Харківська науково-виробнича фірма «Спеціальні Наукові Розробки» (www.cmdiag.com), яку заснував і був багаторічним директором Геннадій Безлюдько. На сьогодні фірма працює як в Україні, так і за кордоном.

На частині виставкової площі були розміщені інформаційні некомерційні стенди національних товариств неруйнівного контролю Європи та міжнародних організацій. Серед них був і стенд Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. На стенді спілкувалися з відвідувачами Світлана Щупак, Юлія Лисенко та Юрій Посипайко. Плакати, що були розміщені на стенді, створив учений секретар УТ НКТД Андрій Шекеро.

Поряд із науковою програмою та технічною виставкою учасники високо оцінили також соціальну програму. Розроблена для того, щоб запропонувати учасникам досвід, що поєднує професійний нетворкінг, теплу гостинність і популяризацію культурної спадщини Італії, вона виявилася однією з родзинок заходу.

Серед пам'ятних моментів був Соціальний вечір, що відбувся в Палаццо делла Гран-Гуардія, у самому серці Верони. Це дало можливість для делегатів, експонентів, доповідачів, представників установ і міжнародних партнерів зустрітися в неформальній обстановці на тлі одного з найвідоміших історичних місць міста – давньоримської Арени. А ввечері учасники конференції спостерігали за дійством на сцені Арени – оперою Д. Верді «Аїда».

Учасників наступної XV ECNDT-2030 буде приймати іспанська Севілья 3–7 червня 2030 р.

Юрій Посипайко





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



Технології та засоби для НК

МЕТОДИ ДЕФЕКТОСКОПІЇ В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ ТА ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ (СТ-МОНІТОРИНГ КОНСТРУКЦІЙ)

В.О. Троїцький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: usndt@ukr.net; ndt.inpat@gmail.com

Прагматичний швидкий пошук тріщин у старих і пошкоджених металоконструкціях без зачистки їхньої поверхні. Тріщиноутворення, корозійне ураження та старіння металу є основним недоліком довго експлуатованих металоконструкцій [1, 2]. Найчастіше ці споруди мають і несприятливі умови для задовільної зачистки їхньої поверхні, що потрібно за правилами неруйнівного контролю. У воєнний час є багато руйнувань конструкцій і споруд, долю яких потрібно вирішувати негайно.

Для оцінки стану таких об'єктів у КНР з'явився електромагнітний метод АСFM (Alternative Current Field Measurement – Метод вимірювання полів змінного струму). Назва не є дуже вдалою (переклад з китайської та англійської мов). Цей метод – прагматичний та швидкий, його розроблено для моніторингу старих металоконструкцій.

Прилади АСFM призначені тільки для виявлення протяжних небезпечних уражень у вигляді глибоких тріщин без зачистки поверхні об'єкта. Важливо знайти критичне велике внутрішнє напруження на грані руйнування. Такий підхід до пошуку критично небезпечних зон надалі будемо

називати Crack Testing (СТ). Принцип СТ може реалізуватися не тільки методом АСFM, але й традиційними методами ЕМА, MFL, ВТ, НЧ УЗК [3–7]. У табл. 1 систематизовано результати порівняння вищенаведених методів із позиції СТ-моніторингу.

При СТ-обстеженні старих зовнішньо цілісних металоконструкцій цінується швидкість, низька вартість, відсутність «хибних» рішень, безперечність результату. При цьому, важливо застосовувати не той метод НК, який є найчутливішим до дрібних дефектів, а той, який не пропустить великий небезпечний дефект без зачистки ізоляції. Дрібних дефектів завжди багато. Вони не можуть бути причиною аварій найближчим часом. Інформація про дрібні дефекти в ідеології СТ малоцікава. Зазвичай найнебезпечнішим дефектом є велика закрита тріщина. Як правило, пошук небезпечної тріщини на «поганих» (кородованих) поверхнях повинен здійснюватися через захисні шари різних покриттів, тобто з великими зазорами між НК-перетворювачем та поверхнею об'єкта. СТ-моніторинг не розрахований на високу чутливість і складну якісну зачистку поверхні. Важливішою

Таблиця 1. Порівняння можливостей спорідненими методами НК у режимі СТ-моніторингу (прихованих великих зон напруження без зачистки)

Властивості \ Метод НК	РТК	АСFM	MFL	BC	ЕМА	МПК	НЧ УЗК
Суб'єктивність думки оператора	–	+	–	–	+	+	+
Вплив якості поверхні	–	+	±	±	–	–	–
Витратні матеріали	–	–	–	–	–	+	–
Можливість контролю кольорових металів	+	+	–	+	+	–	+
Вплив вимірювання товщини	–	+	+	–	+	±	–
Залежність сигналів від зазорів	–	+	±	±	+	±	+
Контакт із поверхнею	–	–	–	+	–	+	–
Умовна загальна вартість НК 1 п. м	1	1	5	10	1	1	0,5
Швидкість рішення умов	1	1	0,5	0,1	1	0,5	10

Примітки: РТК, АСFM, MFL, BC, ЕМА, МПА, НЧ УЗК [1]

+ так; ± прийнятно, частково обмежено; – ні

є можливість безеталонного визначення розмірів небезпечних тріщин. Тому цікаво принцип АCFM порівнювати зі спорідненими методами: ЕМА, MFL, магнітопорошковим (МПК) та вихрострумовим (ВС) методами контролю, які можуть мати перевагу в порівнянні з АCFM у конкретних умовах.

Результати порівняння близьких, альтернативних до АCFM приладів НК, які можуть бути застосовані для виявлення прихованих великих тріщин і корозійних зон, показано в табл. 1. Прилади АCFM, що випускаються зараз, забезпечують швидкість сканування до 0,3 м/с. Це – швидкий, простий метод пошуку та оцінки великих несутцільностей без еталонування та зачистки поверхні. І в цьому – його перевага! Але є й інші рішення на основі традиційних методів НК, які можуть бути кращими.

Прилади АCFM, розроблені компанією TSC Inspection Systems (TSC) на початку 1990-х років для морських споруд, застосовуються зараз у різних країнах. Таких приладів немає в Україні. У АCFM-перетворювача (рис. 1) є індуктор з двома котушками, якими протікає змінний електричний струм, під впливом якого індукується струм в об'єкті контролю. Якщо великих несутцільностей немає, то наведений струм рівномірно розподілений під перетворювачем. За наявності дефекту (тріщини) рівномірність потужного електричного випромінювання (вихрового струму) порушується. Тріщини можуть бути розпізнані та кількісно оцінені за сигналами магнітної матриці або одиночного датчика, що розташовується між індуктором і виробом.

На рис. 2 наведено типові зображення сигналів на дисплеї приладу АCFM (рис. 3) при проходженні перетворювача над дефектом. Протяжність дефекту визначається впадиною на графіку. Найглибша точка цієї кривої відповідає найглибшій частині тріщини. Піки на цьому графіку вказують на розташування кінців тріщини. Щоб полегшити інтерпретацію результатів у правій стороні екрана, побудовано характерну петлю дефекту. Форма цієї петлі характеризує дефект, як при вихрострумовому методі. Ця фігура є нечутливою до швид-

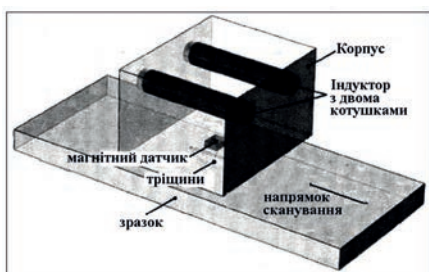


Рис. 1. Конструктивна схема перетворювача СТ-методу АCFM TSC Amigo

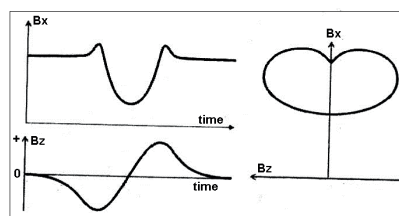


Рис. 2. Інформація про тріщину на екрані приладу АCFM: B_x , B_z – складові магнітного поля над дефектом за координатами X і Z

кості контролю та покращує розуміння результатів контролю. Програмні алгоритми приладу миттєво визначають довжину та глибину тріщини, будують графіки.

Індуковані перетворювачем АCFM струми протікають у тонкому шарі поверхні металу. Глибина проникнення змінного електромагнітного поля для феритних матеріалів менша, ніж для кольорових металів.

Сигнал від підповерхневої аномалії набагато менш «гострий», ніж сигнал від тріщини на поверхні. Тому для виявлення дефектів, що знаходяться під поверхнею, необхідно посилювати збудження. З цієї причини слід використовувати нижчі частоти. Глибина проникнення в металах із низькою електричною провідністю (таких як нержавка сталь, титан, нікелеві сплави, бронза і т.п.) становить близько 5...8 мм при 5 кГц. Глибина проникнення в металах із високою електричною провідністю (таких як алюміній, мідь і вольфрам) менша і становить близько 1...2 мм. У порівнянні з РТК об'ємні дефекти, такі як корозія або пористість при АCFM, дають набагато слабкіші сигнали, ніж плоскі дефекти. Не викликає сумніву, що зношений метал має меншу щільність, магнітну та електричну провідність, що теж треба враховувати. Прилади АCFM засновані на індукуванні вихрових струмів і зчитуванні за допомогою магнітних датчиків (рис. 1–3). Проте в арсеналі традиційних методів НК є набагато більше можливостей. Перспективним є СТ-моніторинг, тобто пошук великих тріщин за допомогою ультразвуку. Це, наприклад, електромагнітоакустичний (ЕМА) метод, який не



Рис. 3. Система АCFM компанії TSC Amigo для виявлення значних тріщин

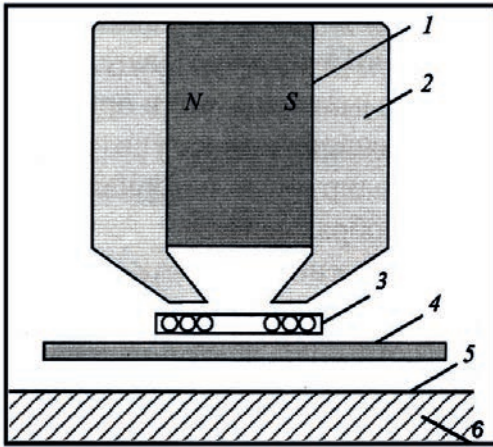


Рис. 4. Схема ЕМА-перетворювача: 1 – магніт; 2 – концентратори магнітного поля; 3 – котушка збудження; 4 – протектор; 5 – зазор; 6 – об'єкт

вимагає контакту з поверхнею об'єкта, що є дуже важливим для СТ-моніторингу. На рис. 4, 5 наведено схему та фізичні принципи ЕМА-перетворювачів. При ЕМА УЗК є можливість роботи через неметалеве (діелектричне) покриття до 4 мм. Тому метод ЕМА, також як при ACFM, для СТ-ідеології є дуже перспективним.

Magnetic Flux Leakage (MFL) Technology – технологія магнітного неруйнівного контролю, що реалізується, наприклад, на основі датчиків Холла, є також перспективною. У цьому випадку, внаслідок локального намагнічування матеріалу з'являється магнітний потік розсіювання над поверхнею об'єкта, який реєструється датчиками Холла. Проте цей метод гірше працює за наявності зазору між перетворювачем і об'єктом контролю (ОК).

Сьогодні методи ЕМА та MFL успішно застосовуються для товщинометрії.

Вихрострумний (ВС) метод, залежно від розмірів котушок збудження та зазору, може виявляти

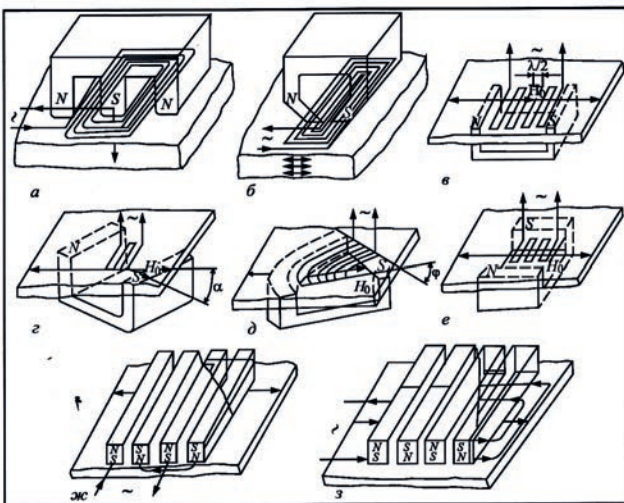


Рис. 5. ЕМА для збудження та прийому УЗ хвиль: а – поздовжньої; б – поперечної; в-з – хвилі Лемба та зсувних нормальних (SH) хвиль

ти найменші дефекти, аж до визначення структури матеріалу. Магнітне поле вихрових струмів є протилежним до первинного магнітного поля збуджуючої обмотки, тому результуюче поле залежить від електромагнітних властивостей старого металу та від зазору між ОК і датчиком. Проте за завданням СТ-моніторингу, тобто пошуку тільки великих тріщин, збуджуючі обмотки повинні бути потужними, великих розмірів і витягнутими. Тому в табл. 1 класичний метод ВС має багато мінусів. Використання міцних вихрострумних перетворювачів робить СТ-контроль на порядок дорожчим. ВС-перетворювач для СТ-контролю – це перспектива ACFM.

Усі сім методів НК (табл. 1) можуть бути застосовані для СТ-моніторингу.

При виборі фізичного методу для реалізації СТ-ідеї треба зуміти відповісти на питання: «Який найбільший дефект не може бути пропущений?» при «непідготовленому» або погано підготовленому об'єкті під НК. На «поганих», кородованих поверхнях через старі захисні покриття СТ-моніторинг не повинен бути надчутливим. У КНР прилади ACFM можуть надійно виявляти тріщини завдовжки 10 мм та завглибшки 1 мм на багатопрохідних зварних швах, або завдовжки 5 мм та завглибшки 0,5 мм на «хороших» поверхнях, тобто різниця визначається якістю поверхонь.

Правильне проведення СТ-моніторингу старих металоконструкцій має складатися з трьох етапів:

- загальна оцінка стану металу, наприклад, за проходженням УЗ-коливаль. Якщо УЗ-коливання не проходять, то це вже не сталь, не тверде кристалічне тіло.

- СТ-моніторинг та оцінка необхідності подальших процедур НК.

- традиційний НК згідно з регламентом до та після ремонту, якщо в цьому буде потреба.

У пошуках небезпечної тріщини істотним є взаємна орієнтація перетворювача та площини тріщини. У разі одного чутливого датчика в НК-перетворювачі сканування повинно проводитися з повертанням на 90°, щоб виявляти поздовжні та поперечні тріщини. Після визначення орієнтації тріщини проводиться сканування вздовж тріщини для визначення її розмірів. Усе вирішується простіше в разі матричного датчика всередині НК-перетворювача.

Таким чином, для пошуку тільки великих тріщин, корозійних уражень та ін. без ретельної підготовки поверхні (СТ-ідея) найкраще буде працювати той метод, в якому функції збудження та виявлення розділені. З часом СТ-моніторинг буде працювати на різних принципах, включаючи ЕМА-ультразвук, вихрострумний та MFL мето-



Рис. 6. Типова система для рентгенотелевізійного контролю

ди. Якщо знайдено неприпустиму велику тріщину (інша несущість), то традиційний НК не потрібен. Так само, якщо встановлено, що метал так постарів, що втратив властивості твердого тіла (не пропускає ультразвук), то подальше вивчення об'єкту може бути здійснене тільки за допомогою РТК [8–12] (рис. 6).

Низькочастотний ультразвуковий контроль протяжних об'єктів, оцінка деградації металу, великих внутрішніх дефектів протяжних об'єктів. У період відродження України після воєнного часу треба звернути увагу на низькочастотний далекодіючий ультразвуковий контроль (НЧ УЗК). Свого часу один із розробників даної технології, британський вчений Peter Mudge із Британського інституту технологій зварювання запросив (рис. 7) запросив УТ НКТД взяти участь у двох великих європейських наукових проєктах із НЧ УЗК: LRUCM (Long Range Ultrasonic Condition Monitoring) і ShipInspector, які завершилися створенням апаратури НЧ УЗК. Технологія НЧ УЗК швидко просувається в США, Англії, Німеччині та інших країнах. Зважаючи на це, як ця ідея за останній десяток років просунулась у світі, можна припустити, що за



Рис. 7. Ділове спілкування з Peter Mudge з проблематики методу LRUT

нею майбутнє в моніторингу різних технологічних трубопроводів. Технологічні трубопроводи в Україні зараз поступово руйнуються, не маючи регламентів і гідної нормативної бази для їхнього моніторингу. Технологічних трубопроводів набагато більше, ніж магістральних, а регламентів із НК для них в Україні немає зовсім!

На основі проходження НЧ УЗ-коливань можливо оцінювати ступінь старіння металу. Відомо, що згодом, залежно від того, як експлуатувався металевий об'єкт, відбувається швидка або повільна деградація металу. З роками метал перетворюється на порошок. Покажемо, як на основі глибини проходження НЧ УЗ-коливань можна ввести бальність деградації металу. У новому металі хвиля низької частоти поширюється на відстань L у сотні метрів. У сильно деградованому металі, який значно втратив пружні властивості твердого тіла, ці коливання швидко загасають та майже не поширюються ($L \gg 0$).

За основу призначення бала повноцінності Q металу може бути взята довжина Δ зондувального імпульсу, властива всім УЗ-випромінювачам: $Q = (L - \Delta)/L$. Тоді, якщо УЗ-коливання загасають лише на рівні протяжності цієї зони ($L < \Delta$ чи $L \approx \Delta$), то якість металу як твердого тіла приблизно дорівнює нулю, тобто це вже потерть, поцяткована міжкристалітною корозією, а не тверде кристалічне тіло. Відповідно, для нового кристалічного металу $Q \approx 1$, коли довжина проходження НЧ-коливань $L \gg \Delta$. Можливо, хтось зацікавиться цією ідеєю загальної оцінки стану металу та глибоко пропрацює цю можливість.

Старий метал є небезпечним. Труби з такого металу є неприпустимими для експлуатації. Наші дослідження на складах теплообмінних пунктів і на теплових трасах показали, що досить часто НЧ-коливання повністю загасають, не пройшовши й кількох метрів, тоді як ззовні ці труби виглядають благополучними. При цьому не можна забувати про характер, тип ізоляції та чим заповнена труба. Запропонована вище оцінка деградації стосується труб без їхнього заповнення та ізоляції.

Існує багато способів оцінки створення рівня стану металу, які порівнюють багато властивостей, а не тільки акустичні властивості нового та старого металу. Нами пропонується метод безеталонний, тобто без еталону з непрацюючого металу, де не потрібний зразок аналогічного нового металу. Кожне відомство може для своїх експлуатаційників встановлювати свою бальність деградації, рівень допустимості до роботи старого металу. Наприклад, для труб немагістрального газотранспортного сортаменту може бути рекомендована 5-бальна система оцінки старіння металу:

- I – висока якість, новий метал: $Q = 1; L \geq 10\Delta$;
- II – середня якість: $Q = 0,9; L \leq 10\Delta$;
- III – тимчасово допустиме до експлуатації: $Q \approx 0,8; L \approx 5\Delta$;
- IV – низька якість: $Q < 0,8; L < 5\Delta$;
- V – неприпустима експлуатація: $Q \ll 0,8; L \ll 5\Delta$.

Буде чи ні прийнятий такий метод оцінки деградації, але ясно одне, що перш ніж застосовувати НЧ-діагностику, слід поцікавитися якістю металу, а не його віком, як і тим, чим був заповнений трубопровід, наявністю на ньому ізоляції, її акустичних властивостей. Усі ці обставини повинні бути відображені у відомчих стандартах на цей метод. Без урахування цих відомостей метод НЧ УЗК не є надійним. Однак він має серйозне майбутнє, тому що дуже простий.

Багато сил та часу нами у мирний час витрачено на поширення в Україні низькочастотного УЗК для оцінки стану технологічних трубопроводів. Ейфорія, пов'язана з універсальністю, можливостями цього методу, вже пройшла. Зараз ми зрозуміли, яке місце цей вид моніторингу стану може зайняти під час діагностики протяжних об'єктів. Для того щоб цей метод знайшов широке застосування в Україні, потрібна відомча нормативна база. Про порівняння традиційних методів УЗК і низькочастотного наведу досвід США, де були дуже цікаві «перегони» на Аляскінському нафтопроводі. В американському журналі TNT, що видається для інженерів-практиків NDT, опубліковано статтю «Альтернативні NDT технології для розшифрування пошкоджень, що сталися на трубопроводі в затоці Прудхое на Алясці». Дані аварії спонукали уряд США до пошуку нетрадиційних методів діагностики трубопроводів, що, на диво, збіглося за часом з тим, що робилося нами в Україні разом з англійцями з TWI за низькочастотними технологіями. У серпні 2006 р. велика нафтова компанія на Алясці пережила другий інцидент, пов'язаний з аварією на нафтопроводі, з порушенням екологічно крихкої природи Аляски. Обидві аварії були результатом внутрішньої піттингової корозії на нафтопроводах у чотири нитки, кожна діаметром 0,85 м. Цими лініями транспортується 400000 барелів агресивної нафти на день із Аляски. У США після першої аварії чотири нитки нафтопроводу були обстежені традиційним ручним та автоматизованим УЗК. Після другої аварії було зроблено негайне перекриття поставок нафти з Аляски в 48 штатів, доки не буде виконано повний повторний НК усього нафтопроводу. Інформація про потенційну небезпеку екологічної катастрофи швидко дійшла до національних засобів масової інформації. Уся Америка почала спостерігати за фахівцями з НК, від оперативності яких залежали розмі-

ри збитків. Міністерство транспорту США видало припис про терміновий автоматизований УЗК усіх чотирьох ниток нафтопроводів тільки в найнебезпечнішій зоні від 4 до 8 год, тобто було вирішено відмовитися від досліджень верхньої частини нафтопроводу. Контроль за допомогою традиційного УЗК вимагав видалення поліуретанової ізоляції та ретельної підготовки поверхні труб. Знадобилася велика кількість робітників, які займаються зачисткою ізоляції. Для робіт із УЗК одного км труби необхідно було 108 робітників. Тому постало завдання знайти альтернативні методи традиційному УЗК, які будуть за точністю не гірше, ніж традиційні УЗ-засоби. Треба було виявити внутрішні корозійні язви з $>50\%$ товщини стінки при співвідношенні геометричних розмірів у плані 3:1. Після того як виникла друга аварія, ці вимоги до НК посилилися. Тепер зажадали забезпечення всі 100 % виявлення будь-якої несущальності. Для виконання традиційного УЗК кожна нитка трубопроводу була розділена на контрольовані ділянки по 0,3 м, що призвело до створення 52 тис. окремих ділянок. Ділянки перевірялися за допомогою ручного ультразвуку для оцінки мінімальної та середньої товщини стінки у межах сегменту від 4 до 8 год, тобто в нижній частині труби нафтопроводу, де постійно присутня нафта. Одна група з 108 спеціалістів традиційним УЗК перевіряла у середньому 283 сегменти на день. Був застосований ручний і традиційний автоматизований УЗК. Цього було недостатньо. Південні штати потребували нафти. Швидкість автоматизованого УЗК дорівнювала 4,5...6,0 м на команду за зміну – це дуже низька швидкість, тому що потрібно було додаткове уточнення АУЗК ручним скануванням. Якщо б не був застосований низькочастотний метод УЗК, то контроль 52000 ділянок зайняв би більшу половину року, тобто 184 дні.

Крім традиційного УЗК із використанням п'єзовипромінювачів по зачищеній поверхні, були проведені випробування без зняття ізоляції електромагнітоакустичних перетворювачів (ЕМАП), орієнтованих по осі корозії в точці торкання опори труби, тобто в положенні 6 год. Було визначено, що ЕМА-технологія дозволяє виявляти утонення стінки більш ніж на 30 % на відстані 0,5 м від опори. Із застосуванням ЕМАП було призупинено зняття ізоляції. Далі виконувався вже автоматизований УЗК на основі ЕМАП через антикорозійне покриття завтовшки 4 і 8 мм. Випробування за допомогою ЕМАП по ізольованій трубі є повністю еквівалентними до контролю по трубі без ізоляції, що суттєво пришвидшувало діагностику, але цього було недостатньо. Без низькочастотного ультразвуку (НЧ УЗК) обійтись було неможливо,

він дозволяє десятикратно збільшити продуктивність НК. Якщо ЕМАП технологія широко розповсюджена в США та признана в документі ASTM E1816, то технології як п'єзоелектричного низькочастотного УЗК, так і електромагніто-акустичного (ЕМАП) низькочастотного контролю були абсолютно новими, не мали нормативної бази. Однак уряд вимагав прискорення робіт. Незабаром результати польових випробувань показали, що:

- команда з двох осіб за допомогою НЧ УЗК, ЕМАП змогла перевірити 300 м за зміну;
- технологія низькочастотного ЕМАП дає не точкові зображення, а всього контролюваного сегменту 4...8 год;
- після закінчення робіт із традиційним ЕМАП необхідно було виконувати уточнюючі УЗ вимірювання товщини звичайними методом;
- НЧ УЗК продемонстрував 100 % виявленість ізольованого піттингу при втраті 25 % товщини стінки щодо розмірів дефекту в плані 3:1;
- результати НЧ УЗК, отримані на зачищеній поверхні дають рівень помилкових надлишкових сигналів менше за 1 %.

НЧ УЗК дає результати кращі, ніж автоматизований традиційний УЗК або ЕМАП при ізоляції із фторполімеру. При цьому довжина об'єкта, що контролювалася командою з двох осіб, що використовувала ручний прилад для НЧ УЗК через допоміжні операції, не перевищувала 60 м/день. При автоматизації та покращених кріпленнях датчиків НЧ ЕМК (антени) продуктивність сканування підвищилася до 3 м/хв, тобто за робочий день вже контролювалося понад 1 км труби. Це був успіх низькочастотного УЗК. До появи НЧ УЗК, альтернативного традиційним технологіям, сотні знімачів ізоляції, очищувачів ізоляції та техніків УЗК працювали одночасно 24 год на добу. Новий альтернативний метод НЧ УЗК був прийнятий Міністерством транспорту США.

Перші стандарти з методу НЧ УЗК почали з'являтися тільки з 2009 р. (італійський стандарт UNI/TS 11317 – 2009 р., японський стандарт JIS-NDIS 2427 – 2010 р.). На західний ринок виходить вже декілька поколінь цих систем контролю якості без сканування поверхні об'єкта.

У наших умовах метод і системи НЧ УЗК повинні використовуватись для випадків [13]:

- перетину доріг трубопроводів при проходженні через стіну, під дорогами;

- коли необхідний 100 % контроль обсягу перерізу труби;

- контроль при застосуванні різних типів опор;
- контроль наявності корозії під ізоляцією (з мінімальним видаленням ізоляції);

- порівняння якості кільцевих монтажних швів і т.ін.

Зараз існують методики підготовки та сертифікації персоналу з методу НЧ УЗК відповідно до загального стандарту з неруйнівного контролю EN 14748:2004.

У відділі № 4 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ розроблено два діагностичні ультразвукові комплекси для визначення корозійного зносу трубопроводів діаметром до 330 і 630 мм із резонансною частотою 36 і 16,3 кГц (рис. 8–11).

Вони складаються з наступних блоків:

- акустичної антени (кільцевого блоку акустичних перетворювачів, розташованих рівномірно по діаметру труби із зовнішнього боку, притиснутих до труби);
- блоку збудження зондувальних імпульсів, прийому відбитих сигналів і програмного управління режимами;
- персонального комп'ютера для реєстрації, обробки та аналізу отриманої інформації.

Порівняльні результати вимірювання відстаней до дефектів за допомогою рулетки та отримані на екрані монітора за допомогою НЧ УЗК наведено на рис. 8 та у табл. 2. Розрахунок відстані до шва та дефектів виконувався за формулою $L = vt/2$, де t – час проходження відбитого луно-сигналу на ос-

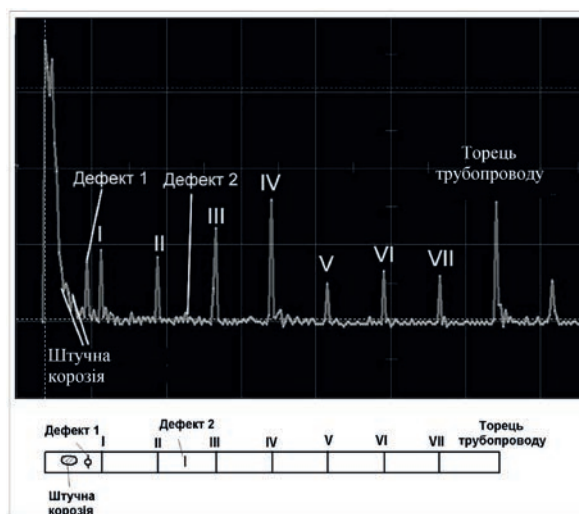


Рис. 8. Осцилограма луно-сигналу на експериментальній ділянці трубопроводу завдовжки 48 м. Римськими цифрами показано нумерацію швів трубопроводу

Таблиця 2. Порівняльні результати вимірювання відстаней до дефектів

Метод	Д1	I	II	Д2	III	IV	V	VI	VII	Торець
Розрахунковий по УЗК, м	4,15	6,05	12,12	14,97	18,35	24,48	30,78	36,59	42,88	48,68
Вимірювання рулеткою, м	4,25	6,04	12,09	15,25	18,34	24,45	30,56	36,62	42,69	48,69

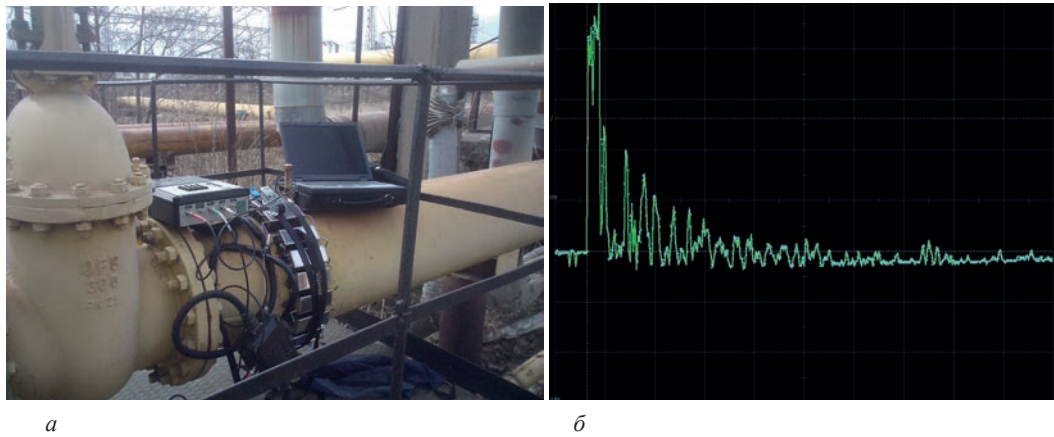


Рис. 9. Контроль наземної ділянки (а) газопроводу завдовжки 150 м та осцилограма (б) НЧ УЗ луно-сигналу

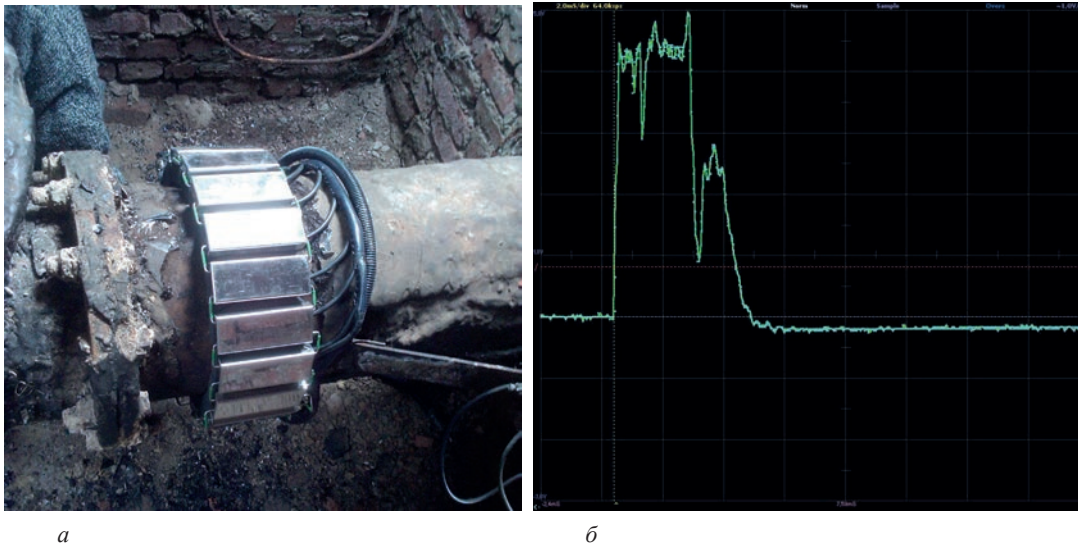


Рис. 10. Контроль підземної ділянки газопроводу з протикорозійною бізольною (а) ізоляцією та осцилограма луно-сигналу (б)

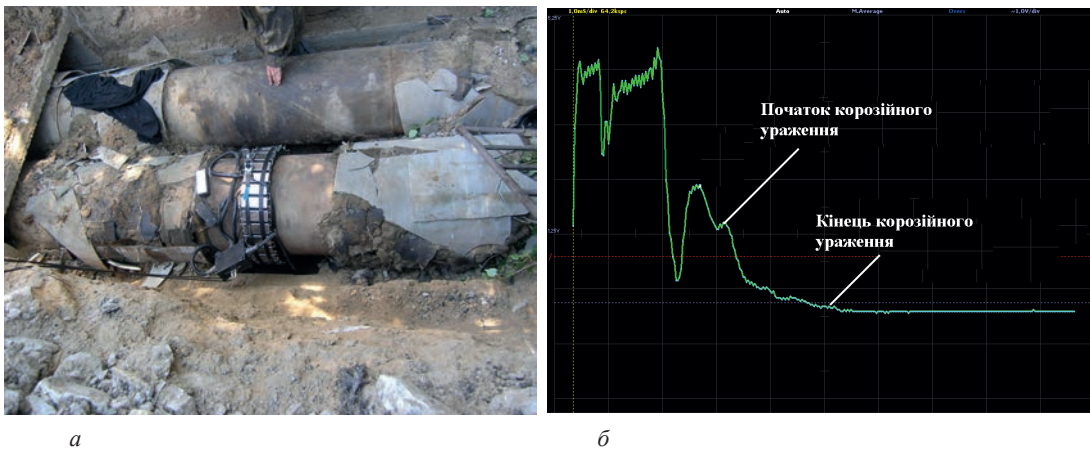


Рис. 11. Контроль підземної ділянки (а) діючої теплотраси та осцилограма (б) луно-сигналу від корозійно-ураженого трубопроводу

цилограмі; v – швидкість поширення ультразвуку для торсійних хвиль.

Усі сім швів цього трубопроводу виконані одним зварником ручним дуговим зварюванням, проте, як випливає з рис. 8, тільки два кільцеві монтажні шви V–VII приблизно рівної якості. Особливо неякісним є шов IV, тоді як акустичні портрети кільцевих монтажних швів мають бути однаковими.

Цікаві результати нами отримані на відкритих ділянках газопроводу Красноперекопського бромзаводу (рис. 9), труба $\varnothing 330$ мм, товщина стінки 8 мм. Вони показали потенційні можливості, успішність використання НЧ УЗ методу для обстеження протяжних ділянок трубопроводів до 150 м від місця встановлення антени. Там же проводилися обстеження підземної ділянки газопроводу, вкри-

тої посиленою протикорозійною брізольною ізоляцією завтовшки 9 мм (рис. 10). Тут акустичні хвилі практично згасали одразу ж, не рухаючись у тіло труби.

Цікаві тривалі дослідження щодо визначення можливості виявлення корозійних уражень методом НЧ УЗ проводилися нами й на складі-полігоні труб ТЕЦ у м. Вишневе Київської області з досить великою кількістю нових і вживаних труб із різними видами захисної ізоляції. Було експериментально підтверджено, що для бітумних покриттів із великим поглинанням УЗ-коливань дальність акустичного контролю трубопроводів не перевищувала 1...3 м. Досить добре пружні хвилі проходять по трубах із теплоізоляцією, подібної, наприклад, до пінопласту, з подальшою гідроізоляцією. Довжина експериментальних зразків труб досягла 8...12 м. При цьому виявлялися ділянки корозійних уражень, зони отворів, врізок тощо.

Там же успішно пройшли дослідження з виявлення корозійних уражень на підземних ділянках діючої теплотраси (рис. 11). При гідравлічних випробуваннях теплотраси несподівано з'явився витік на одній із її ділянок. Після шурфування на відкритому трубопроводі нам дозволили встановити акустичну антену. Так було виявлено ділянку майбутнього корозійного ураження на відстані 6 м з точністю до 30 см, яка потенційно могла би бути зоною чергового прориву теплотраси. Цей випадок показав потенційні можливості використання методу НЧ УЗ для виявлення старих труб із високим ступенем корозійних уражень. Причому інтерпретація результатів контролю в цьому випадку є порівняно простою – сигнал на ділянці сильного корозійного ураження практично повністю згасає. Таким чином, на складі вживаних труб вдалося розсортувати, ви-

брати для подальшого використання достатньо хороші труби (6...8 м), в яких не було сильного поглинання УЗ коливань.

Усі види НК починаються та закінчуються (після виконання ремонту) візуально-вимірним контролем (ВВК). Для підвищення об'єктивності та швидкості ВВК в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблено відповідну апаратуру з використанням лазерних променів. На рис. 13 наведено фото такого приладу, в якому на магнітних колесах великого діаметра (Ø 110 мм) по поверхні металокопункції у будь-яких просторових положеннях переміщуються два лазерні вказівники та відеокамера, що формує цифрове зображення зварного шва. Інформація про місцезположення та розміри дефектів транслюється на екран смартфона (на монітор комп'ютера) для докладного обстеження зварного з'єднання.

Список літератури

1. Троицкий В.А. (2022) *Мониторинг состояния конструкций. Введение в профессию. 120 учебно-методических плакатов и методик по НК*. Киев.
2. Пашин М.О., Кот В.Г., Миходуй О.Л та ін. (2026) Удосконалення неруйнівного ультразвукового методу визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях із низьколегованих сталей. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 3–7. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.01.01>
3. Троицкий В.О., Карманов М.Н., Михайлов С.Р. (2022) Досягнення ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в галузі рентгенотелевізійного, ультразвукового та інших методів неруйнівного контролю (Огляд). *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 35–43. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.05>
4. Троицкий В.О. (2025) Дефектоскопія у воєнний час. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 49–53.
5. Троицкий В.О. (2025) Технології оцінки напруженого стану металу в зоні зварного шва. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 55–60.
6. Троицкий В.О. (2024) *Моніторинг труб магістральних та промислових трубопроводів*. Київ, Інтерсервіс.
7. Troitskiy, V.A. (2026) *Main directions of defectoscopy and monitoring. Album of educational porters on NDT*. Kyiv, Interservice.
8. Троицкий В.О. (2020) Перспективи радіаційного контролю магістральних трубопроводів та інших складних конструкцій. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 28–36 DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.03>
9. Троицкий В.О., Карманов М.М., Михайлов С.Р. та ін. (2020) Скануючі рентгенівські системи на основі мініатюрних твердотільних перетворювачів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 43–47. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.03.06>
10. Троицкий В.О. (2023) Дефектоскопія зварних з'єднань, моніторинг стану конструкцій радіоскопічними засобами. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 55–57.
11. Троицкий В.О., Карманов М.М., Михайлов С.Р., Шалаев В.О. (2024) Підвищення точності рентгенівського 2D сканування з використанням мінісенсора. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 43–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.04.07>
12. Троицкий В.О., Михайлов С.Р. (2023) Оцінка якості бронепластин за допомогою рентгенотелевізійного контролю. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 55–56.
13. Троицкий В.О. (2024) Про можливості практичного застосування низькочастотного ультразвукового контролю протяжних об'єктів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 53–56.



Рис. 13. Рухома магнітна платформа з відеокамерою для візуально-вимірним контролем
Описане вище обладнання з РТК, НЧ УЗК, ВВК розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, є працездатним та чекає на своїх замовників.

Вітаємо Голову УТ НКТД, професора ТРОЇЦЬКОГО ВОЛОДИМИРА ОЛЕКСАНДРОВИЧА

з престижною нагородою Європейської федерації з неруйнівного контролю!

Даною нагородою відзначаються особи, які діють на благо європейської та міжнародної спільноти НК, за вагомі досягнення у сфері популяризації та розширення діяльності EFNDT, стандартизації методів НК, сертифікації персоналу з НК.

Про престижність цієї нагороди свідчить той факт, що вона присуджується один раз на чотири роки всього лише трьом діячам під час урочистої церемонії відкриття Європейської конференції з НК. Цього-річ її лауреатами крім В.О. Троїцького стали також David Gilbert – Генеральний секретар Міжнародного комітету з НК (ICNDT), Виконавчий директор Британського інституту з НК (BINDT) та Ezio Tuberosa – Президент Італійського товариства з НК, Віце-президент Європейської федерації з НК (EFNDT).



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»

■ Деменкова Світлана Дмитрівна

старша викладачка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій 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»

■ Защепкіна Наталія Миколаївна

д.т.н., професорка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

■ Здоренко Валерій Георгійович

д.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

■ Кубай Микола Михайлович

керівник відділу ТзОВ «Кипер-Пласт», м. Львів

■ Лисенко Володимир Валерійович

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

■ Лисенко Юлія Юріївна

к.т.н., доцентка кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

■ Львов Сергій Геннадійович

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

■ Павловський Олексій Михайлович

к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних 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»

■ Плєснецов Сергій Юрійович

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

■ Плєснецов Юрій Олександрович

к.т.н., професор 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»

Стандартизація (питання та відповіді)

Які ознаки офіційних текстів національних стандартів?

Наказом ДП «УкрНДНЦ» №25 від 27.02.2026 р. затверджено Технічний опис ознак офіційних текстів національних нормативних документів для друкованих та електронних форматів.

Документ встановлює єдині вимоги до оформлення офіційних текстів нормативних документів, що забезпечує їхню автентичність, захист та уніфікованість незалежно від формату.

Офіційні тексти стандартів мають чіткі ознаки ідентифікації, зокрема:

- QR-код на інформаційній сторінці для перевірки документа;
 - водяні знаки на кожній сторінці з даними про реєстраційний номер, покупця та дату придбання;
 - захищений електронний формат (PDF), що унеможливує несанкціоноване редагування.
- Прийняття цього рішення сприятиме:
- однаковому відтворенню текстів у друкованих та електронних версіях;
 - підвищенню довіри до офіційних публікацій;
 - посиленню захисту від несанкціонованого використання;
 - наближенню практик до міжнародних підходів.

Як формується вартість робіт зі стандартизації та хто бере участь у їх фінансуванні?

Розроблення стандартів – це комплексна експертна робота, яка містить аналіз, підготовку, погодження та гармонізацію вимог із міжнародними й європейськими стандартами.

Відповідно до Закону України «Про стандартизацію» фінансування робіт зі стандартизації може здійснюватися:

- за рахунок коштів державного бюджету;
- за рахунок коштів суб'єктів господарювання;
- у межах програм і проєктів;
- з інших джерел, не заборонених законодавством.

Участь бізнесу у фінансуванні окремих робіт зі стандартизації є сталою практикою в країнах ЄС та світі. Такий підхід дозволяє швидше оновлювати стандарти, підтримувати розвиток сучасних технологій і підвищувати конкурентоспроможність продукції. Законодавством України також передбачена можливість виконання окремих робіт зі стандартизації на договірних засадах.

Вартість робіт зі стандартизації залежить від:

- складності та обсягу робіт;
- необхідності залучення профільних експертів;
- опрацювання міжнародних і європейських документів;
- проведення технічних погоджень і процедур.

Окремі європейські стандарти можуть прийматися як національні методом підтвердження – мовою оригіналу. Такий підхід є швидшим і менш витратним, ніж переклад, однак може створювати ризики неоднозначного тлумачення окремих положень.

За потреби замовник може отримати в ДП «УкрНДНЦ» деталізовані розрахунки вартості робіт.

Чому не всі національні стандарти доступні безкоштовно?

Доступ до національних стандартів в Україні формується відповідно до законодавства та міжнародних зобов'язань у сфері стандартизації.

Закон України «Про стандартизацію» визначає, що ДП «УкрНДНЦ» як національний орган стандартизації обов'язково публікує у відкритому доступі:

- національні стандарти, обов'язковість застосування яких встановлена нормативно-правовими актами;
- національні стандарти, розроблені за рахунок бюджетних коштів.

Водночас значна частина стандартів – це гармонізовані міжнародні та європейські документи. Їхнє розповсюдження відбувається за правилами організацій, які їх розробили – зокрема CEN та CENELEC.

У європейській системі стандартизації діє комерційна модель: стандарти є об'єктом авторського права, а їхній продаж – одним із ключових механізмів фінансування системи стандартизації. Саме тому стандарти, які Україна приймає як національні та гармонізує з європейськими і міжнародними, розповсюджуються на комерційній основі – відповідно до міжнародних правил. Такий підхід забезпечує:

- отримання міжнародних зобов'язань;
- інтеграцію України до європейської системи стандартизації;
- сталий розвиток національної інфраструктури якості.

Стандарти – це не лише документи. Це – результат експертної роботи, який має свою цінність. Тому стандарти, які Україна приймає як національні та гармонізує з європейськими і міжнародними, ДП «УкрНДНЦ» розповсюджує на комерційній основі – відповідно до правил європейської системи стандартизації.

За матеріалами фейсбук-сторінки Національного органу стандартизації ДП «УкрНДНЦ»
<https://www.facebook.com/uas.org.ua>

КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ ТА ВИСТАВОК З НК 2026–2028

12–15 жовтня 2026	Коламбус, США	ASNT 2026 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
02–22 листопада 2026	Online	International Online Conference on Nondestructive Testing 2026 (NDTonline 2026) (Міжнародна онлайн конференція з НК)	NDT.net
03–05 листопада 2026	Гонконг, Китай	1 st Asia Non-Destructive Testing Equipment & Technology Expo (1-а Азійська виставка з обладнання і технологій НК)	China NDT Management Association
11–13 листопада 2026	Франтішкова Лазня, Чехія	NDE for Safety 2026 (НК для безпеки)	Чеське товариство з НК
17–18 листопада 2026	Хайдерабад, Індія	36 th Annual Conference & Exhibition on Non-Destructive Evaluation (NDE 2026) (36-а щорічна конференція та виставка з оцінки методами НК)	Indian Society for NDT
17–18 листопада 2026	Селангор, Малайзія	8 th Malaysia International NDT Conference and Exhibition (8 th MINDTCE) (8-а Малайзійська міжнародна конференція і виставка з НК)	Malaysian Society for NDT
18–19 листопада 2026	Ель-Крам, Туніс	8 th African Conference on NDT (8-а Африканська конференція з НК)	African Federation for NDT
08–09 березня 2027	Сінгапур	6 th Singapore International Non-Destructive Testing Conference and Exhibition (SINCE 2027) (6-а Сінгапурська міжнародна конференція і виставка з НК)	NDT Society of Singapore
11–14 травня 2027	Штутгарт, Німеччина	38 th Control 2027 (Міжнародна торгова ярмарка з проблем гарантії якості)	P E Schall GmbH & Co KG
15–18 червня 2027	Квебек, Канада	4 th International Conference & Exhibition on NDE 4.0 (4-а Міжнародна конференція з інтелектуального НК)	American Society for NDT
19–21 червня 2027	Вальядолід, Іспанія	16 th National Congress and the 3rd Iberian NDT Congress (15-й Національний та 23-й Іберійський конгрес з НК)	Spanish Association of NDT
30 серпня – 03 вересня 2027	Кобе, Японія	NDT Next 2027 (Міжнародна конференція з НК для нового покоління)	Asia Pacific Federation 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

November 2026



Free • Online • On-demand

Organized by



International Online Conference on

Nondestructive Testing 2026