

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені Інституту електрозварювання 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, Польща;

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 електрозварювання
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 Малевича, 11
Тел.: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/tdnk

Передплата 2026

Передплатний індекс 74475. Чотири випуски на рік.
Друкована версія: 1680 грн. за річний комплект з
урахуванням доставки рекомендованою банделероллю.
Електронна версія: 1680 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf). Передплата можлива на попередні
випуски за будь-який рік.

За зміст рекламних матеріалів видавець
відповідальності не несе.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

*Пащин М.О., Кот В.Г., Міходуй О.Л., Пекар Є.Д.,
Храмков О.О., Кражановський Д.М.* Удосконалення
неруйнівного ультразвукового методу визначення
залишкових напружень у зварних з'єднаннях із низь-
колегованих сталей.....3

*Лобанов Л.М., Махненко О.В., Міленін О.С., Вели-
коіваненко О.А., Розинка Г.П., Саприкіна Г.Ю., Сави-
цька О.М.* Комп'ютерна програма для моделювання
напружено-деформованого стану кільцевого звар-
ного з'єднання 8

*Осадчук С.О., Ниркова Л.І., Гончаренко Л.В., Єлагін В.П.,
Коваленко С.Ю.* Пошкодження нержавяких вальцьо-
ваних труб установки охолодження парів бензину
нафтопереробного підприємства23

Глуховський В.Ю., Міленін О.С. Принципи та
технології теплового контролю та діагностики
відповідальних конструкцій і об'єктів (Огляд) 32

Глабець С.М., Єременко В.С., Куц Ю.В. Дослідження
структури сигналів при контролі труб з поліетилену
високої щільності дифракційно-часовим методом.....47

ІНФОРМАЦІЯ

Новини Українського товариства неруйнівного
контролю та технічної діагностики54

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;

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

Subscription 2026

Subscription index 74475. 4 issues per year, back issues available. 116€, subscriptions for the printed (hard copy) version, air postage and packaging included. 96€, subscriptions for the electronic version (sending issues of Journal in pdf.format). Subscription is possible for previous issues for any year.

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

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Pashchyn M.O., Kot V.G., Mikhodui O.L., Pekar Ye.D., Khramkov O.O., Krazhanovskyi D.M. Improvement of non-destructive ultrasonic method for determining residual stresses in welded joints made of low-alloy steels3

Lobanov L.M., Makhnenko O.V., Milenin O.S., Malhin M.G., Saprykina G.Yu., Savitskaya O.M. The application of artificial intelligence in welding and related technologies8

Osadchuk S.O., Nyrkova L.I., Goncharenko L.V., Yelahin V.P., Kovalenko S.Yu. Damage of stainless rolled pipes of gasoline vapor cooling units in oil refineries ...23

Glukhovskiy V.Yu., Milenin O.S. Principles and technologies of thermal testing and diagnostics of critical structures and objects (Review)32

Glabet S.M., Eremenko V.S., Kuts Yu.V. Analysis of signal structure in high-density polyethylene pipe inspection using the time-of-flight diffraction technique47

INFORMATION

News of the Ukrainian society for non-destructive testing.....54

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

УДОСКОНАЛЕННЯ НЕРУЙНІВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ІЗ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

М.О. Пашин, В.Г. Кот, О.Л. Міходуй, Є.Д. Пекар, О.О. Храмков, Д.М. Кражановський

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

Запропоновано заходи, що направлені на вдосконалення ультразвукового методу (УЗ-хвиль) визначення залишкових зварювальних напружень (ЗЗН), які базуються на умові «рівноваженості» епюр стиску та розтягу ЗЗН. Це, на відміну від традиційного застосування методу УЗ-хвиль, дозволяє використовувати останній для визначення ЗЗН розтягу в зоні пластичних деформацій. Розроблено умови реалізації методу з урахуванням особливостей формування напружено-деформованого стану зварних з'єднань із низьколегованих і низьковуглецевих сталей, які можуть бути застосовані для експрес-визначення ЗЗН у натурних конструкціях. Проведено апробацію удосконаленого методу при визначенні компоненти σ_x ЗЗН уздовж зварного шва в зразку стикового з'єднання із низьковуглецевої сталі 09Г2С завтовшки 12 мм. Верифікацію результатів розподілу σ_x отриманих методом УЗ-хвиль, проводили на базі електронної спекл-інтерферометрії (ESPI). Встановлено задовільну достовірність отриманих значень ЗЗН розтягу в зоні шва зварних з'єднань дослідного зразка. Отримані результати можуть бути застосовані при розробленні експрес-методики визначення ЗЗН у натурних зварних конструкціях у процесі їхнього виготовлення та експлуатації. Бібліогр. 11, рис. 4.

Ключові слова: залишкові зварювальні напруження, ультразвуковий метод (УЗ-хвиль), електронна спекл-інтерферометрія (ESPI), зразок стикового з'єднання, епюри стиску та розтягу, поздовжня компонента напружень, низьколегована сталь, метод визначення напружень, рівноваженість епюр напружень

Вступ та актуальність роботи. Залишкові зварювальні напруження (ЗЗН), що виникають у зварних з'єднаннях, негативно впливають на точність, довговічність та корозійну стійкість конструкцій. Для сучасного виробництва актуальною є проблема моніторингу ЗЗН у конструкціях як на стадії їх виготовлення, та і в процесі експлуатації. Це спонукає до розробки надійних і простих у використанні неруйнівних методів визначення ЗЗН [1]. У сучасній науці та виробництві використовуються такі неруйнівні методи оцінки ЗЗН як: рентгівівський, магнітний, ультразвуковий (УЗ-хвиль), електроімпульсний [2, 3].

Метод УЗ-хвиль забезпечує визначення мембранних ЗЗН, тобто таких, що є усередненими по товщині металу [4]. При цьому результати вимірювання пружних напружень методом УЗ-хвиль є достовірними за умови відсутності пластичних деформацій на дослідній ділянці [1]. Також метод УЗ-хвиль є неруйнівним і досить простим у реалізації. Тому його використання для експрес-моніторингу ЗЗН у натурних зварних конструкціях (за умови виключення негативного впливу залишкових пластичних деформацій від зварювання) є актуальним завданням інженерної практики.

Основні положення та мета роботи. Як відомо, особливістю ЗЗН є наявність епюр розтягу

та стиску, які мають рівні площі, тобто взаємно «урівноважені» (рис. 1, а, в). При цьому, якщо на ділянці стиску має місце виключно пружний стан, то на ділянці розтягу – пружно-пластичний, який є наслідком формування залишкових пластичних деформацій $\epsilon_{пл}$ стиску металу зварного з'єднання (рис. 1, а, б). Формування $\epsilon_{пл}$ є результатом усадкового скорочення металу шва при його вистиганні, а наявність $\epsilon_{пл}$ вносить похибку в значення пружно-акустичного коефіцієнта пропорційності (ПАКП), на застосуванні якого базується метод УЗ-хвиль. При наближенні до центру шва значення $\epsilon_{пл}$ різко зростають (рис. 1, б). Це збільшує похибку значень ПАКП при наближенні до центру шва та ускладнює отримання достовірних значень ЗЗН розтягу в зварному шві методом УЗ-хвиль. Враховуючи наведене вище, достовірність результатів оцінювання ЗЗН розтягу в зварному шві та на лінії сплавлення методом УЗ-хвиль є дискусійним питанням. Це можна бачити на прикладі вимірювання ЗЗН у зварних з'єднаннях із алюмінієвого сплаву АМг6 методом УЗ-хвиль [1]. Таким чином, застосування УЗ-хвиль для коректного визначення ЗЗН розтягу є доцільним за умови урахування впливу $\epsilon_{пл}$.

На відміну від ЗЗН розтягу, ЗЗН стиску мають суттєво менший градієнт і розподілені на ділянці поперечного перерізу зварного з'єднання, де відсутні $\epsilon_{пл}$ [5, 6] (рис. 1, в). Тобто при вимірюванні ЗЗН стиску методом УЗ-хвиль на результати їх оцінювання виключено негативний вплив $\epsilon_{пл}$. Та-

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ким чином, застосовуючи даний метод, можна із заявленою точністю [1, 2] визначити розподіл ЗЗН стиску, які при наближенні до шва досягають нульового значення з наступним переходом у розтяг [7, 8] (рис. 1, в).

Якщо розглядати напівширину зварного з'єднання з урахуванням умови «врівноваженості» епюр, то площа епюри стиску має дорівнювати площі епюри розтягу. Епюра поздовжньої (вздовж шва) компоненти σ_x ЗЗН розтягу в зварному з'єднанні із низьколегованих сталей має геометричну форму трапеції (рис. 1, в, крива 1), яку (враховуючи високий градієнт σ_x ЗЗН розтягу) можна (при експрес-оцінці) навести у формі прямокутника (рис. 2), на відміну від сплавів на основі Al, де σ_x ЗЗН розтягу мають складніший характер (рис. 1, в, крива 2).

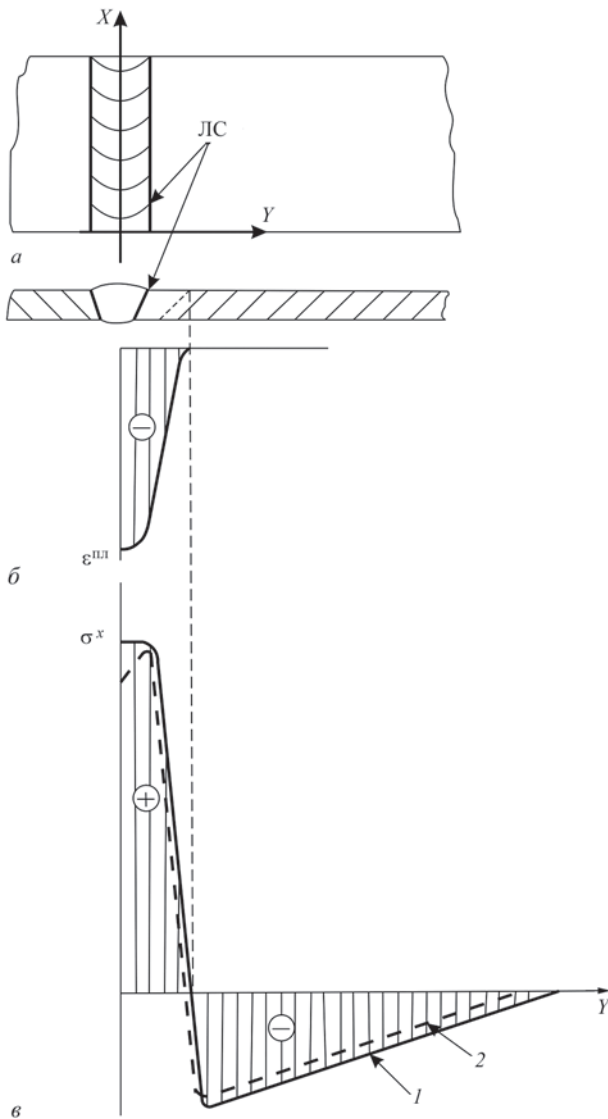


Рис. 1. Залишкові зварювальні напруження (ЗЗН): а – схема зварного з'єднання (ЗЗ), де X і Y – напрямки компонент ЗЗН, ЛС – лінія сплавлення; б – розподіл пластичних деформацій ϵ_x^{pl} у ЗЗ; в – типові форми епюр поздовжньої компоненти σ_x ЗЗН, де 1 – σ_x у ЗЗ із низьколегованих сталей, 2 – σ_x у ЗЗ зі сплавів на основі Al

Знаючи площу $S4$ епюри σ_x ЗЗН стиску (рис. 2) за умови $S3 = S4$, де $S3$ – площа епюри ЗЗН розтягу (у формі прямокутника), можна визначити розподіл ЗЗН розтягу в зварному з'єднанні із низьколегованої (низьковуглецевої) сталі виключно застосуванням методу УЗ-хвиль із урахуванням умови «врівноваженості» епюр ЗЗН стиску та розтягу.

Також методом УЗ-хвиль можна із заявленою точністю [1, 2] визначити розмір ділянки AB на осі Y (рис. 2), де діють ЗЗН стиску і, відповідно, розмір ділянки OA , де діють ЗЗН розтягу. Достовірність отримання методом УЗ-хвиль значення AB базується на тому факті, що на даній ділянці відсутній вплив ϵ_{pl} на ПАКП.

Із дотриманням розглянутих вище положень запропоновано експрес-методику неруйнівного визначення ЗЗН методом УЗ-хвиль, яка може бути застосована до зварних з'єднань із низьколегованих і низьковуглецевих сталей. Дана експрес-оцінка дозволяє швидко провести неруйнівне визначення ЗЗН не тільки в зразках зварних з'єднань, але й в натурних конструкціях [9].

Мета роботи – розробка експрес-методики неруйнівної оцінки мембранних ЗЗН, яка базується на застосуванні методу УЗ-хвиль за умови «врівноваженості» епюр стиску та розтягу. У даній роботі розглядали визначення поздовжньої компоненти σ_x ЗЗН, але розроблена методика може бути застосовна й для визначення поперечної (по нормалі до шва) компоненти ЗЗН – σ_y .

Опис етапів реалізації методики. При застосуванні експрес-методики приймаються наступні допущення:

1. Значення ЗЗН у зоні розтягу є однаковими від точки O до точки A – переходу ЗЗН від стиску до розтягу (рис. 2).
2. Епюра ЗЗН розтягу має геометричну форму прямокутника $AODE$.

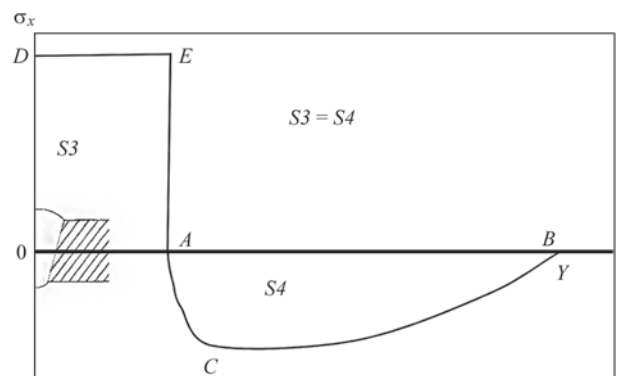


Рис. 2. Епюра мембранних ЗЗН, де $S3$ і $S4$ – площі епюр розтягу та стиску відповідно, відрізки OD і OA – значення максимальних мембранних ЗЗН розтягу та довжина ділянки дії напружень розтягу відповідно [9]

3. Висота OD прямокутника $AODE$ дорівнює максимальному значенню ЗЗН розтягу.

Значення ЗЗН розтягу визначається із застосуванням методики [9] у наступній послідовності:

1. Методом УЗ-хвиль визначається розподіл ЗЗН (у поперечному перерізі на ділянці дії напружень стиску (вздовж лінії AB)) на осі Y (рис. 2).

2. Із застосуванням, наприклад, середовища PTC MathCad розраховується значення площі епюри $S4$ стиску (рис. 2) наступним чином [10]:

2.1. Проводиться інтерполяція нормованих даних локалізованою поліноміальною регресією (функція loess, параметр span = 0,75);

2.2. Чисельно інтегрується отримана функція для значень $\sigma_t < 0$;

3. Приймали, за умови «врівноваженості» епюр, рівність площ $S3$ і $S4$ (рис. 2): $S3 = S4$ (1).

Тоді для прямокутника $AODE$ справедливим є вирази (2) і (3): $OD \cdot AO = S4$ (2); $OD = S4 / AO$ (3), де значення OD висоти прямокутника $AODE$ дорівнює максимальній величині поздовжньої компоненти σ_x ЗЗН розтягу (рис. 2).

Методика досліджень. Визначали достовірність методики при оцінюванні ЗЗН, де об'єктом досліджень був модифікований метод УЗ-хвиль. В якості предмета досліджень використовували зразок зварного стикового з'єднання пластин із низьколегованої сталі 09Г2С ($\sigma_{0,2} = 345$ МПа) загальними розмірами $255 \times 200 \times 12$ мм (рис. 3).

З'єднання (рис. 3) виконували ручним механізованим зварюванням із застосуванням порошко-

вого дроту марки ППС-АН1 на режимі при напрузі, струмі та швидкості процесу відповідно $U_{зв} = 30$ В, $I_{зв} = 180$ А і $V_{зв} = 2,2$ мм/с. Проводили визначення компоненти σ_x ЗЗН на ділянці центрального поперечного перерізу зразка методом УЗ-хвиль. Рух давача УЗ-хвиль по поверхні пластини з боку кореня шва здійснювали у напрямках, що вказані стрілками 12 і 13 на рис. 3.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 4 наведено розподіл σ_x ЗЗН вздовж лінії 13 на рис. 3. Слід зазначити, що характеристики ЗЗН стиску вздовж ліній 12 і 13, які визначені методом УЗ-хвиль, є аналогічними, тому в подальшому розглядали виключно ЗЗН вздовж лінії 13. За умови «врівноваженості» епюр площа $S4$ зони стиску, що є ділянкою, яку окреслено прямою AB на осі Y і кривою ACB , дорівнює площі $S3$ епюри розтягу, яка має форму прямокутника $ODEA$. Умова рівності площ $S3$ і $S4$ дозволяє визначити висоту OD прямокутника $ODEA$, яка дорівнює величині σ_x розтягу ЗЗН. Таким чином, маючи величину площі $S4$ і дотримуючись умови $S3 = S4$, із використанням середовища PTC MathCad розраховували значення σ_x ЗЗН розтягу в дослідному зразку (рис. 3), яке не перевищує 280 МПа.

Верифікацію результатів, отриманих методом УЗ-хвиль, здійснювали методом електронної спекл-інтерферометрії (ESPI), що базується на пружному розвантаженні напружень у результаті висвердлювання отворів діаметром та глибиною відповідно 1,0 і 0,5 мм на поверхнях дослідних

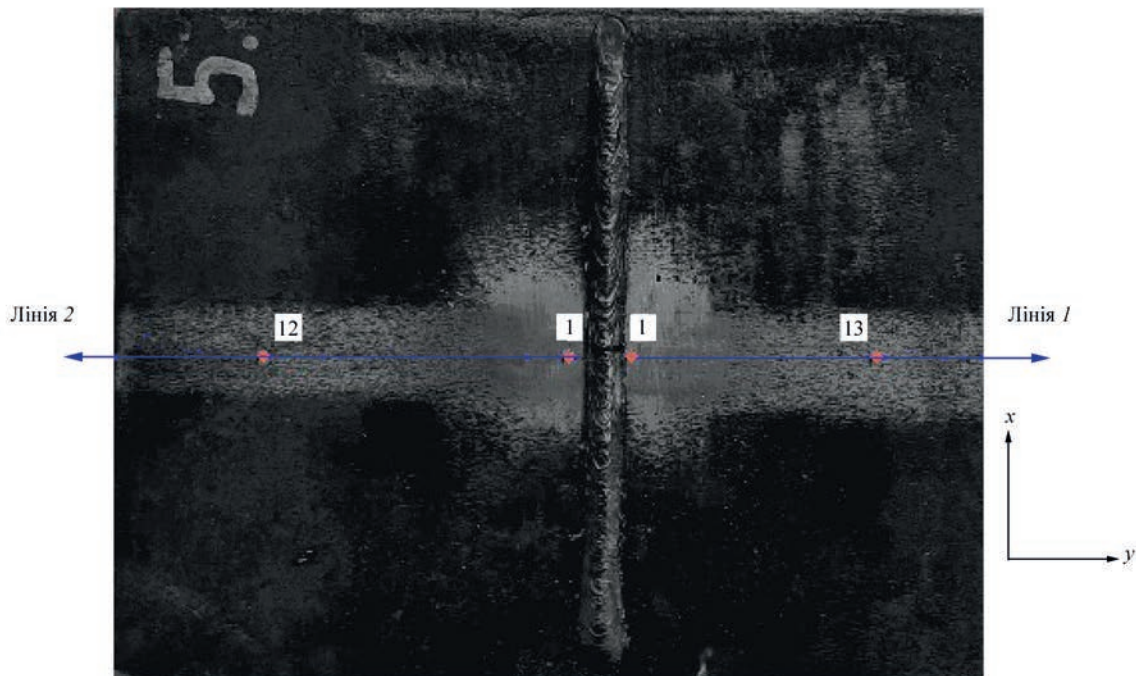


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразка стикового з'єднання пластин зі сталі 09Г2С, де стрілками 12 і 13 показано напрямок реєстрації компоненти σ_x ЗЗН із застосуванням методу УЗ-хвиль, осі X і Y – напрямки компонент ЗЗН

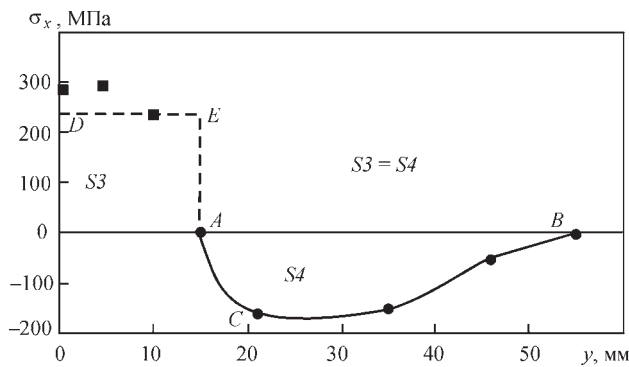


Рис. 4. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у зразку зварного з'єднання зі сталі 09Г2С (рис. 3), де ● – метод УЗ-хвиль, ■ – ESPI метод, S3 і S4 – відповідно площі епюр розтягу та стиску ЗЗН, точки A, B, C, D, E – пояснення в тексті

зразків [11]. Значення σ_x ЗЗН отримували з обох боків пластини вздовж лінії 13 на рівновіддалених ділянках біля центру шва. Мембранні σ_x розраховували як усереднені по товщині значення σ_x у рівновіддалених від центру шва точках, які були отримані на зовнішній і зворотній поверхнях зразка. Можна бачити, що значення мембранних σ_x , отриманих в околі точок D (центр шва) та E (навколо шва) дорівнюють 287 і 285 МПа відповідно, що задовільно узгоджується з розрахованими на умові «врівноваженості» епюр (лінія DE).

Таким чином, при порівнянні значень σ_x ЗЗН, отриманих методами УЗ-хвиль і ESPI, можна бачити задовільне узгодження результатів, отриманих обома методами на ділянці біля шва (рис. 4). Визначення ЗЗН на базі УЗ-методу за умови рівності площ – «врівноваженості» епюр стиску та розтягу може бути використано для неруйнівної діагностики напружених станів натурних зварних конструкцій із низьколегованих сталей.

Висновки

1. Розроблено методику неруйнівного визначення ЗЗН у зварних з'єднаннях із низьколегованих сталей, яка базується на застосуванні УЗ-методу при дотриманні умові «врівноваженості» епюр ЗЗН стиску та розтягу.

2. Встановлено, що значення ЗЗН розтягу біля центру зварного з'єднання низьколегованої сталі 09Г2С, отримані УЗ-методом, є близькими до величин ЗЗН, що визначені методом електронної спекл-інтерферометрії (ESPI), який узятो в якості еталонного.

3. Встановлено, що визначення ЗЗН на базі УЗ-методу за умови рівності площ – «врівноваженості» епюр стиску та розтягу може бути використано для неруйнівної діагностики напружених станів натурних зварних конструкцій із низьколегованих сталей.

Список літератури

1. Гузь А.Н. (1986) *Упругие волны в телах с начальными напряжениями. Т. 2. Закономерности распространения*. Киев, Наукова думка.
2. Касаткин Б.С. и др. (1981) *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений*. Киев, Наукова думка.
3. Lobanov, L.M., Savitsky, V.V., Shutkevych, O.P., Shyan, K.V., Kyanets, I.V. (2024) Nondestructive method of residual stress determination in welded joints based on application of high-density current pulses and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 51–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.01.08>
4. Луценко Т.М. (20232) Нові системи та технології неруйнівного контролю для промисловості України за поточних умов. *Тези допов. наук. конф. «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України»*. Під ред. О.Т. Зельніченка. Київ, Міжнародна Асоціація «Зварювання», с. 66.
5. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.Й. (1977) *Введение в акустоупругость*. Киев, Наукова думка.
6. Гуца О.Й., Махорт Ф.Г. (1995) Применение акустического метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 8–15.
7. Винокуров В.А. (1968) *Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения*. Москва, Машиностроение.
8. Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*. Pergamon Press.
9. Лобанов Л.М., Книш В.В., Пашин М.О., Кот В.Г., Миходуй О.Л., Пекар С.Д., Луи Huang, Альошин А.О. (2023) Неруйнівне визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях на базі поєднання ультразвукового методу та електронної спекл-інтерферометрії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.01>
10. PTS Math Prime. <https://www.mathcad.com/>
11. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, 1, 25–30.

References

1. Guz, A.N. (1986) *Elastic waves in bodies with initial stresses. Vol 2. Patterns of propagation*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Kasatkin B.S. et al. (1981) *Experimental methods for studying deformations and stresses*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
3. Lobanov, L.M., Savitsky, V.V., Shutkevych, O.P., Shyan, K.V., Kyanets, I.V. (2024) Nondestructive method of residual stress determination in welded joints based on application of high-density current pulses and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 51–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.01.08>
4. Lutsenko, T.M. (20232) New systems and technologies of non-destructive testing for Ukrainian industry under current conditions. In: *Abstr. of papers of the scientific conf. on Welding and Technical Diagnostics for the Recovery of Ukraine's Economy*. Ed. by O.T. Zelnichenko. Kyiv, IAW, 66 [in Ukrainian].
5. Guz, A.N., Makhort, F.G., Gushcha, O.Y. (1977) *Introduction to Acoustoelasticity*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
6. Guscha, O.Y., Makhort, F.G. (1995) Application of the acoustic method for determining residual stresses in welded structure. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 4, 8–15 [in Russian].
7. Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*. Pergamon Press.
8. Lobanov, L.M., Knysh, V.V., Pashchin, M.O., Kot, V.G., Mikhodui, O.L., Pekar, Ye.D., Luyi Huang, Alyoshyn, A.O. (2023) Nondestructive evaluation of residual stresses in welded joints on the base of a combination of ultrasonic

- testing and speckle-interferometry. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 2, 22–27 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.01>
9. PTS Math Prime. <https://www.mathcad.com/>
10. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 24–29.

IMPROVEMENT OF NON-DESTRUCTIVE ULTRASOUND METHOD FOR DETERMINING RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS MADE OF LOW-ALLOY STEELS

M.O. Pashchin, V.G. Kot, O.L. Mikhoduy, E.D. Pekar, O.O. Khramkov, D.M. Krazhanovskyi

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

E-mail: svarka2000@ukr.net

Measures are proposed aimed at improving the ultrasonic method (ultrasonic waves) for determining residual welding stresses (RWS), which are based on the condition of ‘equilibrium’ between the compression and tension diagrams of RWS. This, unlike the traditional application of the US wave method, allows the latter to be used to determine tensile RSW in the plastic deformation zone. The conditions for implementing the method have been developed, taking into account the peculiarities of the stress-strain state of welded joints of low-alloy and low-carbon steels, which can be used for rapid determination of RWS in full-scale structures. The improved method has been tested in determining the σ_x component of RWS along a weld in a sample of a butt joint made of low-carbon steel 09G2S with a thickness of 12 mm. Verification of σ_x distribution results obtained by the ultrasonic wave method was carried out using electronic speckle interferometry (ESPI). The satisfactory reliability of the obtained values of tensile strength in the weld zone of the test sample welded joints was established. The results obtained can be used in the development of an express method for determining RWS in full-scale welded structures during their manufacture and operation. 11 Ref., 4 Fig.

Keywords: residual welding stresses, ultrasonic method (US waves), electronic speckle interferometry (ESPI), butt joint sample, compression and tension diagrams, longitudinal stress component, low-alloy steel, stress determination method, stress diagram equilibrium

ORCID

Пашин М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Кот В.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4759-9992>,
 Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Пекар Є.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-5025-4445>,
 Храмков О.О. – <https://orcid.org/0009-0003-1664-8362>, Д.М. Кражановський – <https://orcid.org/0000-0001-7292-7188>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

М.О. Пашин

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

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

М.О. Пашин, В.Г. Кот, О.Л. Міходуй, Є.Д. Пекар, О.О. Храмков, Д.М. Кражановський (2026) Удосконалення неруйнівного ультразвукового методу визначення залишкових напружень у зварних з’єднаннях із низьколегованих сталей. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 01, 3–7. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.01.01>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 17.09.2025

Отримано у переглянутому вигляді 05.12.2025

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 23.04.2026

November 2026

NDTonline 

Free • Online • On-demand

Organized by

NDTnet 

**International Online Conference on
 Nondestructive Testing 2026**

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЗВАРЮВАННІ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Л.М. Лобанов, О.В. Махненко, О.С. Міленін, М.Г. Мальгін, Г.Ю. Саприкіна, О.М. Савицька

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Застосування систем штучного інтелекту (ШІ) на основі загальних мовних моделей надає великі можливості спеціалістам зі зварювання для аналізу великих об'ємів наявної в мережі Інтернет інформації при підготовці наукових статей і звітів, а також для вирішення типових задач у галузях математики, фізики, хімії тощо. Доцільним є використання у зварюванні спеціалізованих моделей ШІ, які можуть ефективно вирішувати такі задачі як: оптимізація параметрів режиму зварювання, аналіз якості зварювання за допомогою методів комп'ютерного зору, роботизація зварювання для виконання повторюваних завдань, моніторинг стану відповідальних зварних конструкцій і створення систем цифрових двійників, а також навчання зварників. Використання систем ШІ у зварюванні та споріднених технологіях може забезпечити суттєві переваги при розробці нових зварних виробів і зварювальних технологій завдяки оптимізованим процесам. Бібліогр. 46, табл. 1, рис. 11.

Ключові слова: зварювання, штучний інтелект, нейронні мережі, оптимізація параметрів зварювання, контроль якості зварювання, роботизоване зварювання, системи моніторингу, навчання зварників

Вступ. Зварювання – складний багатофакторний технологічний процес, що успішно застосовується в багатьох галузях промислового виробництва. Обсяг зварних конструкцій, що постійно зростає, розширення номенклатури конструкційних і зварювальних матеріалів, поява нових технологій зварювання, підвищення вимог до якості виробів і скорочення термінів розробки вимагає використання ефективних методів вирішення комплексної проблеми зварюваності в поєднанні з забезпеченням заданих технічними умовами механічних і експлуатаційних характеристик зварних з'єднань і конструкцій. Сьогодні, враховуючи високий існуючий рівень комп'ютеризації та інформатизації суспільства, задачі розробки та оптимізації технологічних циклів зварювання, проєктування зварних конструкцій, планування їхньої експлуатації та обслуговування раціонально розв'язувати за допомогою сучасних засобів математичного та чисельного моделювання. Це дозволяє врахувати складну просторово неоднорідну природу нестационарних фізичних явищ у прогресивних матеріалах, які визначають якість з'єднання, зварюваність і працездатність зварної конструкції. До таких явищ відноситься: кінетика температурного поля, розвиток напружено-деформованого стану, гідрота газодинамічні явища, електромагнітні явища, мікроструктурні перетворення, пошкодження та руйнування матеріалу тощо.

Для чисельного прогнозування таких складних фізичних явищ прийнято використовувати два принципово різних підходи, а саме: детерміністич-

не або статистичне моделювання. Детерміністичне моделювання – це процес побудови математичних моделей, у яких стан системи в будь-який момент часу однозначно визначається заданими початковими умовами, параметрами та певними законами фізики. Такі моделі базуються на детермінованих фізичних або технічних законах (наприклад, рівнянні теплопровідності, рівняннях Нав'є-Стокса, рівняннях Максвелла тощо), і при однакових умовах результат розрахунку завжди такий же самий. Основними математичними об'єктами при цьому є звичайні та частинні диференціальні рівняння, інтегральні рівняння, системи алгебраїчних рівнянь.

Проте як складність технологічних реальних процесів, так і мультимасштабність відповідних фізичних явищ зумовлюють появу природної невизначеності вхідних даних щодо стану системи та результатів моделювання на основі детерміністичних математичних моделей. У цьому випадку раціонально використовувати так зване статистичне моделювання – процес побудови математичних моделей, що описують залежності між змінними на основі вибіркового даних, із урахуванням випадковості, варіативності, неповноти або невизначеності у спостереженнях чи у фізичних явищах. Такий підхід особливо важливий у разі невизначеності в тенденціях протікання фізичних процесів, але дозволяє виявити необхідні закономірності на основі аналізу великих масивів наявних даних. Одним із способів реалізації методів статистичного моделювання є використання систем штучного інтелекту (ШІ), які знаходять все ширше використання для розв'язання практичних задач [1]. У рамках даної роботи проведено критичний аналіз

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

і виявлено основні тенденції використання ШІ в галузі зварювання та експлуатації відповідальних зварних конструкцій.

Штучний інтелект – це системи або програми, здатні виконувати завдання, які зазвичай потребують людського інтелекту, такі як: навчання, логічне міркування, сприйняття інформації або прийняття рішень, часто шляхом використання даних, знань і досвіду для ефективних дій у нових або невизначених ситуаціях [2–4]. До типових задач, що розв’язуються системами ШІ, відносяться: аналіз великих об’ємів інформації; пошук розв’язку задач математики, фізики й т.і.; розпізнавання мови чи зображень; генерування зображень і звуків; комп’ютерний зір тощо.

Історія розвитку ШІ як наукової дисципліни розпочалася у 1956 р. на Дартмутському семінарі, на якому вперше було введено термін «штучний інтелект». З того часу ШІ пройшов низку етапів розвитку [5, 6], що змінювалися періодами, в яких інтерес до ШІ знижувався, що було пов’язано з недоліком обчислювальних потужностей та недостатнім рівнем розвитку комп’ютерної техніки.

Одними з перших дослідників ШІ в Україні, які заклали основи комп’ютерної інформатики та наукових підходів до проблеми ШІ, можна назвати видатного математика й кібернетика, засновника Інституту кібернетики НАН України академіка В.М. Глушкова; відомого хірурга, академіка М.М.

Амосова, а також знаного вченого у галузі інформатики, автоматичного керування та математичного моделювання академіка О.Г. Івахненка. У 60-х роках минулого століття було опубліковано ряд наукових робіт [7–12], в яких викладалися основні принципи переробки інформації та моделювання інтелектуальних систем, які сьогодні використовуються в системах ШІ. Треба зауважити, що монографія М.М. Амосова «Моделювання мислення та психіки» була опублікована в перекладі англійською мовою, зокрема видавництвом Springer [13] (рис. 1).

Одним із етапів розвитку в області ШІ була розробка потужних комп’ютерних систем, відомих як експертні системи (ЕС). ЕС є комп’ютерною системою, що імітує здатність людини до прийняття рішень [14]. Вона призначена для вирішення складних завдань через міркування на основі знань, представлених здебільшого у вигляді правил «якщо–тоді», а не традиційного процедурного коду. ЕС складається з двох основних підсистем: механізму логічного висновку та бази знань. База знань містить факти та правила, у той час як механізм логічного висновку застосовує ці правила до відомих фактів, щоб отримати нові. Механізми логічного висновку можуть також містити функції для пояснення та налагодження. Перші експертні системи були розроблені в 1970-х р., а в 1980-х р. стали широко використовуваними, у тому числі



Рис. 1. Перші праці з дослідження проблеми ШІ в Україні

інженерами-зварниками та дослідниками, які займаються проблемами зварювання та споріднених технологій. Для підготування та планування зварювальних робіт створювалися засоби, що базувалися на обчислювальній техніці, які з точки зору обробки та подання інформації умовно можна розділити на два види: експертні системи й традиційні програми. ЕС, використовуючи символічну логіку та евристики (емпіричні правила) при розв'язанні проблем, роблять певні висновки навіть при неповних або «зашумлених» вхідних даних. Було розроблено програмні комплекси в рамках проєктів групового фінансування з дослідження та розробки ЕС. Найвідоміші з них – проєкт Британського інституту зварювання «Expert System in Welding», Американського інституту зварювання «Welding Information Network», Німецького союзу зварювальної техніки «Schweisstechnik», спільні роботи Британського інституту зварювання та Міністерства енергетики Великобританії, фірм Babcock Power, British Nuclear Fuels & ESAB. У цей же час в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України під керівництвом академіка В.І. Махненка велися роботи зі створення експертних систем, призначених для різних видів зварювання: точкове контактне зварювання, паяння, електрошлакове лиття, наплавлення, дугове зварювання під флюсом. Деякі з цих систем були доведені до рівня дослідницького прототипу [15, 16].

Таким чином, ЕС спрямовані на надання спеціалізованих знань і здатностей до розв'язання проблем, що допомагає користувачам ухвалювати рішення або вирішувати складні завдання. Але інтерес до ЕС дещо знизився через ручне кодування тисяч правил для складних завдань, і це стало непрактичним. Крім цього, виникла проблема невизначеності: коефіцієнти впевненості погано долають імовірнісні сценарії, а також виникла конкуренція з боку статистичних методів – машинне навчання (регресійні дерева, метод опорних векторів). Це показало, що ЕС ефективні лише в обмежених областях.

Об'єднання ЕС з машинним навчанням, розвиток напрямку великих даних (big data), нейромереж (НМ) та обчислювальних потужностей дозволило їх модернізувати, зберігши логічну прозорість і додавши адаптивності.

Еволюція ЕС – це шлях від жорстких правил до симбіозу логіки та даних. Сучасні гібридні підходи дозволяють подолати обмеження класичних ЕС, зберігши їхню головну перевагу – прозорість рішень. У майбутньому нейросимволічний ШІ може стати основою для систем, які не тільки імі-

тують експертів, але й навчаються у них, адаптуючись до світу, що динамічно змінюється [5, 17, 18].

На початку 2010-х р. стався справжній прорив у галузі НМ, пов'язаний з розвитком глибокого (машинного) навчання. Цьому сприяли збільшення обчислювальних потужностей, особливо поява графічних процесорів і доступність великих обсягів даних. Зараз спостерігається справжній бум у застосуванні нейронних мереж у системах ШІ [19].

На сьогоднішній день широке використання отримали системи ШІ на основі загальних мовних моделей. Найвідоміші сучасні розробки таких систем ШІ:

- ChatGPT – чат-бот зі штучним інтелектом від компанії OpenAI, заснований на великій мовній моделі; здатний працювати в діалоговому режимі природними мовами;
- Gemini – розмовний чат-бот з генеративним ШІ, розроблений компанією GoogleAI, який базується на мовних моделях;
- DeepSeek – нейромережа, розроблена однойменною китайською компанією, пише тексти, аналізує документи, програмує й т.і.

Найвживаніші методи ШІ в галузі зварювання. Стрімкий розвиток ШІ демонструє величезний потенціал удосконалення традиційних промислових процесів. Інтеграція ШІ у зварювальне виробництво відображає загальну тенденцію до впровадження передових технологій для вирішення таких завдань як: брак кваліфікованої робочої сили, потреба у високій якості зварних виробів і необхідність збільшення рівня автоматизації виробничих процесів [20].

ШІ може аналізувати дані у масштабах, недоступних жодній людині. Методи ШІ та їхнє використання поступово розширюється. Слід зазначити, що у додатках для використання ШІ виділяються такі методи як: штучні нейронні мережі (ANN), машинне навчання (МН), метаевристичні та гібридні методи тощо. Ці методи й орієнтовані на різні цілі. У таблиці коротко наведено переваги та недоліки цих популярних методів штучного інтелекту, що застосовується у зварюванні [21].

Нейронні мережі. Методологія та основи побудови. Штучні нейронні мережі (ШНМ), які зазвичай просто називають нейронними мережами (НМ) або нейромережами, – це математична модель, а також її програмна або апаратна реалізація, що побудована за принципом організації нервових мереж – мереж нервових клітин нейронів живого організму. НМ застосовуються для розпізнавання прихованих закономірностей у не-

Методи ШІ в галузі зварювання

Штучні нейронні мережі	ШНМ здебільшого орієнтовані на навчання та застосовуються для прийняття рішень у нелінійних системах або системах, в яких інформація про саму систему є неповною та неточною. Складність перенесення існуючих експертних знань для вирішення задачі та переснащення задачі під час навчання – важливий недолік ШНМ.
Нечітка логіка	Завдяки правилам, створеним за допомогою НЛ, висновок робиться на основі логічних операцій, дотримуючись причинно-наслідкового зв'язку. Найсильнішим аспектом НЛ є використання наявних експертних знань, що є серйозним недоліком у тому випадку, коли експертні знання в повному обсязі недоступні.
Алгоритми оптимізації	АО – це оптимальні алгоритми пошуку рішень. Цим алгоритмам, що працюють на базі законів імовірності, потрібна лише цільова функція. Розглядається певна частина простору рішень. Таким чином, шляхом активних пошуків вони досягають рішення в коротші терміни.
Машинне навчання	МН – це підгалузь штучного інтелекту, що складається з моделювання та алгоритмів, а також прогнозування/кластеризації/класифікації. Його головною перевагою є здатність давати дуже хороші результати прогнозування з мінімальними навчальними даними, за найкоротший час оброблення та без перенавчання.
Гібридні системи	НЛ, ШНМ тощо можуть використовуватися окремо, а також як гібридні системи, враховуючи переваги та недоліки кожного методу. Таким чином, можуть бути розроблені набагато ефективніші методи.

оброблених даних (завдань регресії), класифікації, а також розв'язання завдань у галузі ШІ та машинного навчання. Штучний нейрон є фундаментальним будівельним блоком нейронних мереж, слугує перетворювачем інформації в нейронних мережах. Він названий за аналогією з біологічним, але реалізує свої функції через математичні операції.

Функціонування штучного нейрона (рис. 2) може бути описане такими математичними рівняннями [22]:

$$u_k = \sum_{i=1}^n w_{ki} \cdot x_i, \quad y_k = f(u_k + b_k),$$

де w_{ki} – вага синапсу, що визначає силу зв'язку; b_k – значення зміщення, яке додається до виваженої суми; u_k – результат підсумовування зважених вхідних сигналів та зміщення; x_i – i -й компонент вхідного вектора (вхідний сигнал); y_k – вихідний сигнал нейрона; n – число входів нейрона; f – нелінійне перетворення або функція активації.

Ваги являють собою числові значення, пов'язані з кожним зв'язком між нейронами в нейронній мережі. Вони визначають силу та важливість цього зв'язку, вказуючи, наскільки сильно ця вхідна ознака впливає на вихідний прогноз.

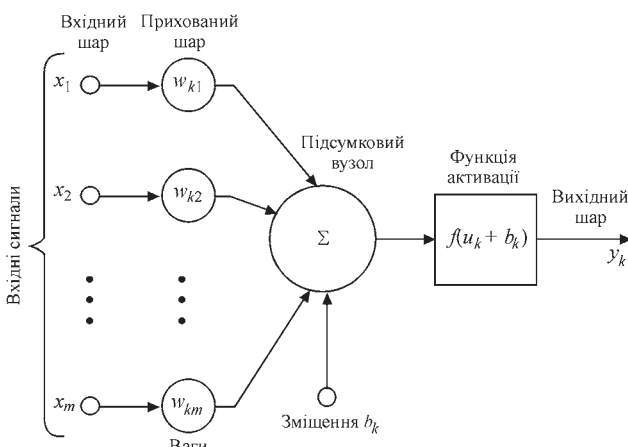


Рис. 2. Схема побудови нелінійної моделі нейрона [22]

Зміщення – це додаткові параметри, що навчаються в моделі машинного навчання, які дозволяють точно налаштувати та корегувати прогнози. Вони дають моделі можливість враховувати фактори, які не можуть бути повністю охоплені тільки вхідними ознаками, і дозволяють нейронній мережі робити прогнози, навіть коли всі вхідні ознаки дорівнюють нулю.

Шари. У багатошарових нейронних мережах нейрони згруповані в шари. Кожен нейрон попереднього шару пов'язаний з усіма нейронами наступного шару (так звані повнозв'язні або «щільні» шари), при цьому всередині шарів зв'язки між нейронами відсутні. Нейронні мережі складаються з кількох шарів нейронів, кожен з яких з'єднаний з нейронами наступного шару, формуючи свої складні нелінійні залежності між вхідними та вихідними даними. При правильному налаштуванні гіперпараметрів (таких як: кількість шарів, кількість нейронів у кожному шарі, функції активації та швидкість навчання) штучні нейронні мережі здатні виявляти та ефективно моделювати складні залежності в даних. Цей процес можна представити як складну просторову багатокомпонентну інтерполяцію.

Навчання нейронної мережі – це ітеративний процес налаштування її внутрішніх параметрів (ваг і зміщень) з метою мінімізації різниці (похибки) між передбачуваними мережею вихідними даними та фактичними цільовими значеннями. Спочатку виконується накопичення необхідного обсягу даних у датасеті, після чого починається основний етап навчання нейронних мереж, мета якого – отримання навченої моделі, що є файлом з оптимізованими вагами та зміщеннями нейронів. Основний процес навчання містить пряме поширення, при якому вихідні дані оцінюються на основі вхідних, і зворотне поширення помилки, у ході якого корегуються ваги та зміщення для міні-

німізації помилки. У ході навчання підбираються такі параметри як: кількість прихованих шарів; кількість нейронів у кожному шарі; кількість нейронів, що активуються на кожному етапі, а також кількість ітерацій навчання, відомих як епохи. У результаті багаторазових ітерацій підбору параметрів навчання модель оптимізується доти, доки не буде досягнуто найкращого показника точності. Після цього навчання може бути завершено та навчена модель зберігається у вигляді файлу, що містить усі необхідні ваги та параметри для прогнозування. Ця модель готова до використання в подальшому, наприклад у рамках глобальної екосистеми цифрового двійника, де вона може бути інтегрована у вигляді модуля, що підключається.

Майбутнє інтелектуального керування, ймовірно, буде полягати в синергії традиційних методів керування з потенціалом систем, заснованих на штучних нейронних мережах [23, 24]. Такі методи керування пропонують значні переваги, як то: відсутність обмежень лінійних систем, ефективність в умовах шуму, можливість керування в реальному часі після навчання та велику адаптивність до реальних умов. Але залишаються й виклики, такі як забезпечення надійності, оскільки штучні нейронні мережі можуть бути неточними навіть при коректному функціонуванні, що вимагає їхнього дублювання іншими системами для критично важливих завдань. Розроблені та знаходять застосування нові типи нейронних мереж, такі як: згорткові нейронні мережі (CNN) і рекурентні нейронні мережі (RNN), які мають свої унікальні особливості, а їхнє використання дозволяє уникнути недоліків штучних нейронних мереж. Дослідження, які постійно продовжуються в галузі архітектури, алгоритмів навчання та апаратної оптимізації, будуть визначати шляхи розвитку й цієї області, яка стрімко розвивається у даний час.

Застосування ШІ в галузі зварювання та споріднених технологій. Розглянемо докладніше напрямки застосування ШІ в галузі зварювання та споріднених технологій. Застосування систем ШІ на основі загальних мовних моделей надає великі можливості спеціалістам зі зварювання для аналізу великих обсягів наявної в мережі Інтернет інформації при підготовці наукових статей і звітів, а також для вирішення типових задач у галузі математики, фізики, хімії тощо. Доцільним є використання в зварюванні спеціалізованих моделей ШІ, які можуть ефективно вирішувати наступні задачі:

- Оптимізація параметрів зварювання в режимі реального часу в залежності від типу матеріалу, товщини та конфігурації з'єднання.

- Аналіз якості зварювання за допомогою методів комп'ютерного зору для виявлення дефектів у реальному часі.
- Співпраця з роботизованими зварювальними системами для виконання повторюваних завдань.
- Створення систем моніторингу стану відповідальних зварних конструкцій і цифрових двійників.
- Навчання зварників.

Використання систем ШІ в зварюванні та споріднених технологіях може забезпечити суттєві переваги при розробці нових зварних виробів і зварювальних технологій завдяки оптимізованим процесам проектування та виробництва.

Використання локальних мовних моделей. Сьогодні локальні великі мовні моделі стають дедалі доступнішими для практичного застосування завдяки відкритим розробкам і активному розвитку спільноти. Моделі, такі як: Mistral, LLaMA, Gemma, Phi, Qwen, GPT-OSS та інші, можуть бути розгорнуті на власному обладнанні, як то: персональні комп'ютери або робочі станції з GPU. Це дозволяє використовувати їх локально без звернення до зовнішніх хмарних сервісів. Водночас варто зазначити, що ці моделі були навчені на узагальнених зовнішніх датасетах і не містять повною мірою галузеву специфіку користувача, таку як: процеси та режими зварювання, контроль якості, роботизація, системи моніторингу стану зварних конструкцій, навчання зварників тощо. Тому для отримання продуктивної взаємодії користувача з великими мовними моделями у професійних задачах необхідне їхнє додаткове навчання. Проте цей процес є тривалим, технічно складним і потребує суттєвих обчислювальних ресурсів. Найефективнішою альтернативою у таких випадках є використання підходу Retrieval-Augmented Generation (RAG), який передбачає, що мовна модель не намагається «пам'ятати» всю інформацію, а витягує її із зовнішніх джерел знань [25]. Це особливо корисно, коли мова йде про роботу з великими масивами власних даних: технологічні інструкції, наукові звіти, моделі, розрахунки, бази результатів інтерпретацій тощо.

Було досліджено використання RAG з фреймворк LangChain, інтегровано різні великі мовні моделі з тестовими базами знань, векторними сховищами та зовнішніми утилітами [26]. LangChain підтримує обробку різноманітних форматів даних: текст, PDF, Excel, зображення з текстом, SQL-бази, і дозволяє створювати власну базу знань, яка постійно доповнюється та оновлюється користува-

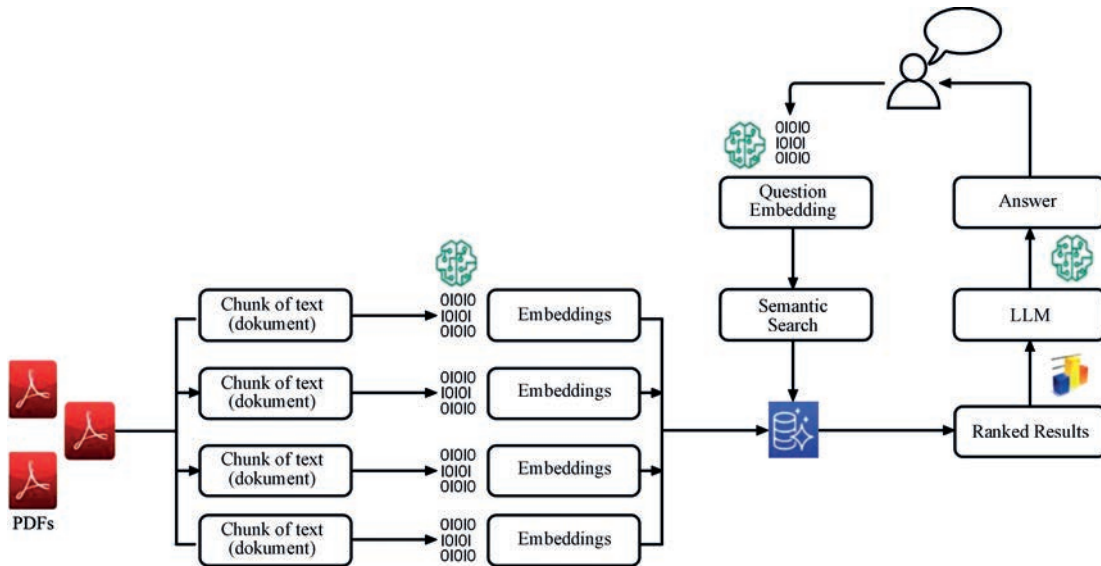


Рис. 3. Загальна схема взаємодії векторної бази даних з великими мовними моделями на базі фреймворку LangChain [26]

чем. Досліджено можливість побудови ланцюжків дій, які містять:

- формулювання запиту природною мовою (через текст);
- витяг релевантної інформації із документів;
- запуск спеціалізованих утиліт або розрахункових програм;
- звернення до баз даних з параметрами;
- генерацію текстового та графічного звіту через LLM.

Встановлено робочий процес у вигляді того, як з початку автоматично обробляються наукові звіти у форматі PDF: кожен документ розбивається на фрагменти тексту, які проходять через етап векторизації. Цей процес генерує числові представлення (embeddings), що зберігають семантичний зміст кожного текстового блоку (рис. 3).

Усі ці вектори зберігаються у векторній базі даних. Коли користувач ставить запитання природною мовою, наприклад: «Який процес зварювання застосувати для з'єднання листів завтовшки 6 мм із алюмінієвого сплаву 2219-T81», система перетворює це запитання у векторне представлення та виконує семантичний пошук у базі знань. Найрелевантніші фрагменти витягуються, ранжуються за схожістю до запиту та передаються до LLM. Мовна модель на основі цих фрагментів формує відповідь, яку отримує користувач. Таким чином, зображення демонструє, як зі звичайних технологічних інструкцій або наукових документів створюється динамічна база знань, яка працює в інтерактивному режимі. LangChain виступає як координатор усіх етапів – від підготовки даних, пошуку, виклику LLM до повернення результату користувачу. Такий підхід дозволяє інтегрувати навіть великі архіви в єдину систему знань.

Оптимізація параметрів процесу зварювання.

У сучасній промисловості поширюється використання легких і міцних матеріалів, що зумовлено орієнтацією на зниження викидів парникових газів. Одним із найбільш екологічно чистих методів зварювання, що потребує значно менших енергетичних витрат у порівнянні з традиційними методами зварювання, зокрема, дуговим та електрошлаковим, можна назвати зварювання тертям з перемішуванням. Його можна застосовувати для зварювання легованих сталей, легких кольорових металів і сплавів (однорідних і різномірних), зокрема сплавів титану, магнію, міді та алюмінію.

Процес зварювання тертям з перемішуванням (рис. 4) – це процес зварювання в твердій фазі, без розплавлення матеріалу, за допомогою інструменту, що обертається та має більшу твердість, ніж матеріал, що зварюється. Спочатку інструмент, що обертається, занурюється в стик матеріалів, потім тепло від тертя розм'якшує зварюваний матеріал і, зрештою, за рахунок перемішування формується міцне з'єднання. Подібним чином піддаються зварюванню всі матеріали, які можна перевести у в'язкий стан, а також існує можливість зварюван-

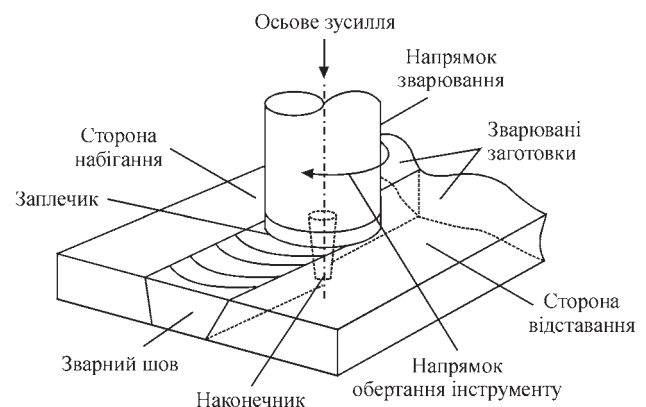


Рис. 4. Схема процесу зварювання тертям з перемішуванням

ня термопластичних полімерів з металами (зварювання різнорідних матеріалів і металів – змішане з’єднання).

Автори [21, 27–29] розглядають ключові методи ШІ, які застосовують для оптимізації параметрів зварювання тертям з перемішуванням, а також прогнозування властивостей зварного з’єднання та поліпшення якості процесу. Виділено п’ять підходів для застосування ШІ у зварюванні тертям з перемішуванням:

1. Алгоритми *штучних нейронних мереж* (рис. 5) знайшли застосування для прогнозування механічних властивостей (границя міцності, твердість, знос), мікроструктури зварних з’єднань.

Методи із застосуванням алгоритмів ШІ на базі штучних нейронних мереж показали високу точність (до 95...99 %), здатність моделювати нелінійні залежності, але для їхнього впровадження потрібний великий об’єм даних для навчання. В однорівневій моделі (рис. 5, а) на вхідному рівні застосовані такі параметри: швидкість обертання інструменту (TRS), швидкість зварювання (WS). На вихідному рівні отримуємо дані стосовно механічних властивостей матеріалу зварного з’єднання: твердість металу шва, твердість ЗТВ, відносне подовження, границя плинності, границя міцності.

Застосування багаторівневої моделі штучної нейронної мережі (рис. 5, б) демонструє високу точність прогнозування вертикальної сили (осьове зусилля) притискання робочого інструменту, успішно враховуючи нелінійні залежності між параметрами процесу [29]. Архітектура даної мережі містить: тип мережі (багаторівнева пряма нейронна мережа з алгоритмом зворотного поширення помилки); вхідні параметри – чотири вузли – швидкість обертання інструменту (ω , об/хв); швидкість зварювання (v , мм/хв); відношення швидкості обертання інструменту до швидкості зварювання (ω/v); термін оброблення (t , с); вихідний параметр – один вузол – вертикальна сила (F , кН); приховані рівні складаються з двох рівнів по чотири нейрони

у кожному; функції активації – це приховані рівні та вихідний рівень; алгоритм навчання – алгоритм Левенберга-Макгвардта; метрика якості – середньоквадратична похибка.

На цьому прикладі була перевірена властивість моделі прогнозувати вертикальну силу за умов, що не включені до навчального набору. Для цього використали два підходи: метод, в якому кожен експеримент по чергово виключався з навчальних даних, і метод, коли модель тестувалась на виключених даних. Результат показав низький рівень похибок і високу кореляцію (коефіцієнт кореляції між даними, що прогнозувалися, та експериментальними даними склав $R = 0,9928$, що підтверджує сильний лінійний зв’язок). Після тестування на нових даних модель з успіхом передбачила криві вертикальної сили для параметрів, які не брали участь в навчанні. Похибки залишилися у межах $\pm 5\%$ для етапу зварювання і $\pm 10\%$ для занурення інструменту.

Дана модель успішно передбачила вертикальну силу навіть при динамічній зміні ω і v під час зварювання. Це демонструє можливість її застосування для *адаптивного керування* (регулювання параметрів у реальному часі для підтримання стабільної сили), *створення неоднорідних з’єднань* – різні зони зварювання можуть мати різні механічні властивості. Таким чином, прогнозування сили допомагає уникати дефектів і оптимізувати параметри зварювання. На рис. 6 показано порівняння пікових значень вертикальної сили (F , кН) на етапі зварювання, передбачених штучними нейронними мережами та отриманими експериментально. Значення F на графіку відповідає очікуваній поведінці вертикальної сили як функції від швидкості обертання інструменту ω та швидкості зварювання v , що підтверджує ефективність моделі на основі штучної нейронної мережі.

2. *Нечітка логіка* може застосовуватись для керування процесом зварювання на базі експертних знань із застосуванням лінгвістичних правил. Перевага цього підходу полягає в тому, що враховується невизначеність і проста інтерпре-

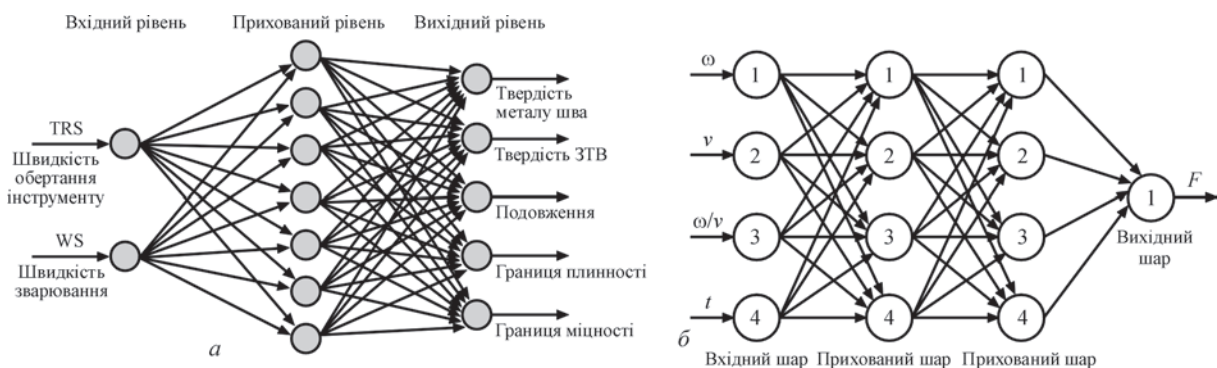
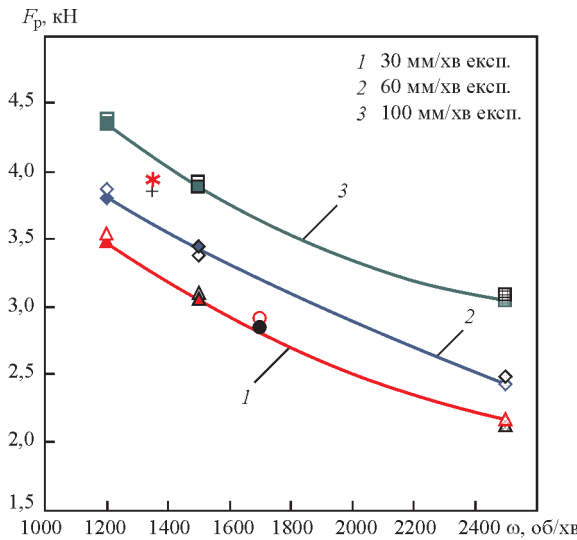


Рис. 5. Схеми штучних нейронних мереж: одношарова [27] (а) та багатшарова модель [28] (б)



ω, об/хв	v, мм/хв	Експерим.	Прогнозов.
1200	30	▲	△ ANN1
1200	60	▲	△ ANN2
1200	100	▲	△ ANN3
1500	30	◆	◇ ANN4
1500	60	◆	◇ ANN5
1500	100	◆	◇ ANN6
2500	30	■	□ ANN7
2500	60	■	□ ANN8
2500	100	■	■ ANN9
1350	80	+	* ANN
1700	45	●	○ ANN

Рис. 6. Порівняння експериментальних і прогнозованих пікових значень вертикальної сили під час зварювання як функції параметрів зварювання

тація правил, але існує залежність від експертних знань і складність налаштування функцій належності.

3. *Машинне навчання* – прогнозування дефектів і класифікація якості зварювання. Наприклад, метод опорних векторів використаний для класифікації міцності зварного з’єднання. Ефективний при роботі з невеликим об’ємом даних і має високу швидкість навчання, але має певні обмеження, тому що потрібен ретельний вибір ознак.

4. *Евристичні алгоритми* має сенс застосовувати при оптимізації параметрів зварювання, а саме, швидкості обертання та лінійної швидкості інструменту. Перевагами алгоритмів цього типу можна назвати глобальний пошук та адаптивність, але їхнім недоліком є висока обчислювальна складність.

5. *Гібридні системи* використовують з метою підвищення точності та стабільності для аналізу акустичних сигналів, прогнозування міцності з’єднань, а також для оптимізації параметрів зварювання. Перевагами цих методів є зниження похибок і синергія методів, але складність налаштування можна назвати недоліком.

Схематично етапи розробки процесу оптимізації технологічних параметрів на прикладі зварювання тертям з перемішуванням наведено на рис. 7.

Виявлення дефектів і контроль якості та оптимізація процесу зварювання. ШІ за допомогою машинного зору здатний виявляти дефекти в зварних швах (наприклад, пористість, тріщини, підрізи, зміщення). Це сприятиме підвищенню якості зварного з’єднання, запобіганню появі браку та, що найголовніше, виявленню подібних проблем на ранній стадії [29, 30].

Процес зварювання пов’язаний з керуванням багатьма параметрами (напруга, струм, швидкість і т.і.) та геометрією зварного з’єднання. Традиційні методи стикаються з такими проблемами, як дефекти швів (пористості, непровари, деформації), що виникають через нелінійність процесів (рис. 8). Сучасні системи з датчиками та при застосуванні роботів покращують контроль, але не вирішують проблем повністю. ШІ пропонує рішення для прогнозування та адаптивного керування в реальному часі.

Для контролю якості процесу зварювання автори [29] зробили висновок, що доцільно використовувати для прогнозування геометричних параметрів зварного шва (висота валика, глибина проплавлення) *штучні нейронні мережі*, а для оптимізації параметрів зварювання (швидкості зварювання та подачі дроту) з урахуванням фак-

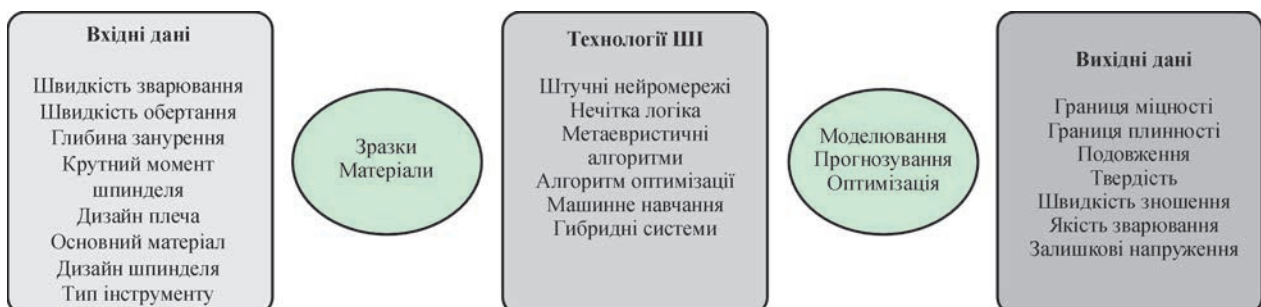


Рис. 7. Етапи розробки (оптимізації технологічних параметрів) процесу зварювання тертям з перемішуванням

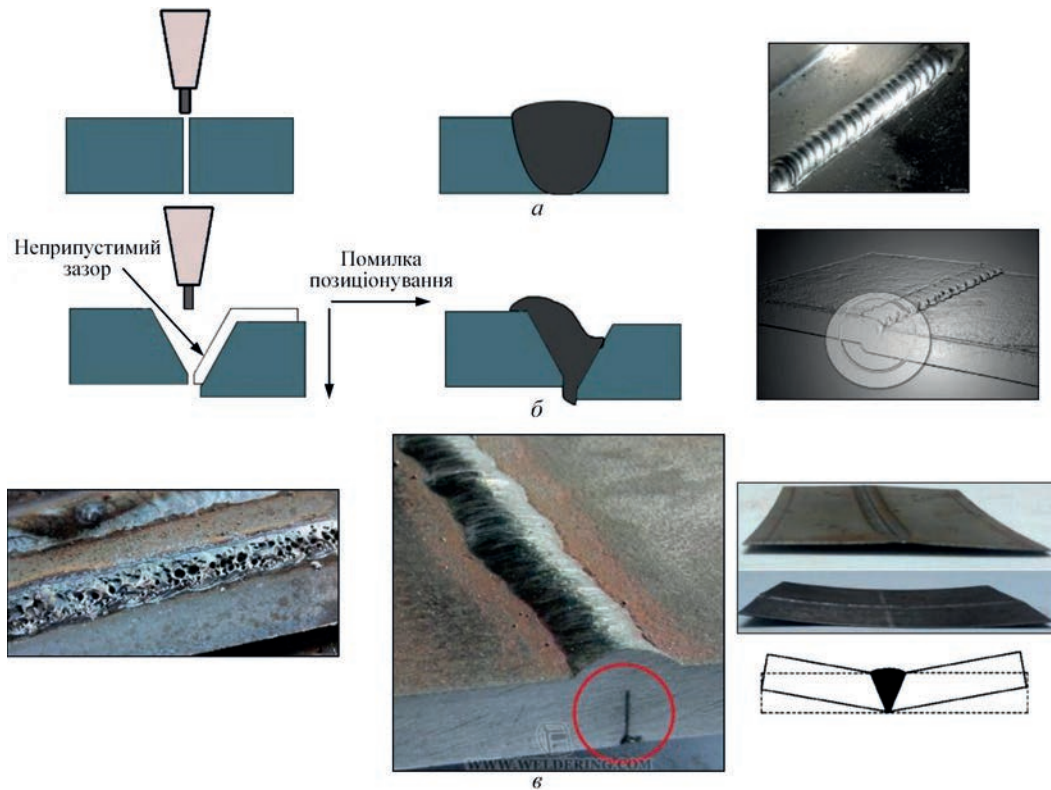


Рис. 8. Розповсюджені дефекти зварювання, які можна усунути за допомогою ШІ при автоматизації зварювального процесу: а – ідеальне положення зварного з'єднання; б – невідповідність положення зварного з'єднання; в – дефекти (пористість, неповне проплавлення, деформація)

торів зварюваності та продуктивності – *генетичні алгоритми*. У цій роботі на прикладах продемонстровано, що ШІ підвищує точність контролю за якістю швів, але динамічна оптимізація в реальному часі дуже рідко використовується.

Роботизоване зварювання. ШІ може бути використаний для керування роботизованими системами зварювання, забезпечуючи стійкість процесу та високу якість зварних швів. ШІ також може бути використаний не тільки для зміни параметрів процесу зварювання, але й для таких завдань, як завантаження та розвантаження деталей.

Роботизація промисловості має безліч переваг, як то: підвищення ефективності та продуктивності, зниження витрат, покращення якості продукції, збільшення гнучкості та безпеки. У [31] розглянуто інтелектуальну та адаптивну систему, засновану на вимірі зварювальних з'єднань за допомогою лазерного сканування та подальшого аналізу отриманої множини точок для адаптації зварювальних траєкторій. Дане дослідження зосереджено на оптимізації Т-подібних з'єднань у конкретних зварювальних умовах і є основою для розширення застосування алгоритму на більш широкий спектр зварювальних задач (рис. 9).

Методи ШІ та їхнє ефективне використання з датчиками призвели до вдосконалення зварювальних технологій. З'явилися роботи для зварювання, в

яких інтегровано системи ШІ й адаптивні системи, що можуть працювати з різними типами заготовок. Незважаючи на ці здобутки, досі спостерігається використання неавтономних системи, де оператори вручну задають роботам точки зварювання.

Проектування та розробка зварювального робота, який використовує методи ШІ та машинного навчання для ідентифікації та відстеження траєкторії зварювання для зменшення помилок оператора та покращення якості зварювання, розглянуто в [32]. У рамках цього дослідження планується розробити та реалізувати роботизовану систему, яка автономно визначатиме траєкторію зварювання за допомогою методів ШІ та виконувати зварювальний процес. Розроблено прототип, що містить тримач для ручки початкових експериментів з траєкторіями. Також було спроектовано та виготовлено тримач для пальника. Систему підготовлено до заключних випробувань із використанням високоякісної камери та ШІ для визначення траєкторій. Високоякісна камера захоплюватиме зображення заготовок, а методи обробки зображень будуть визначати зварювальні шляхи. Алгоритми покращуватимуть якість зображень за наявності шуму. Система буде підтримувати 2D і 3D рух для зварювання заготовок різних форм (наприклад, S-подібних, зигзагоподібних).

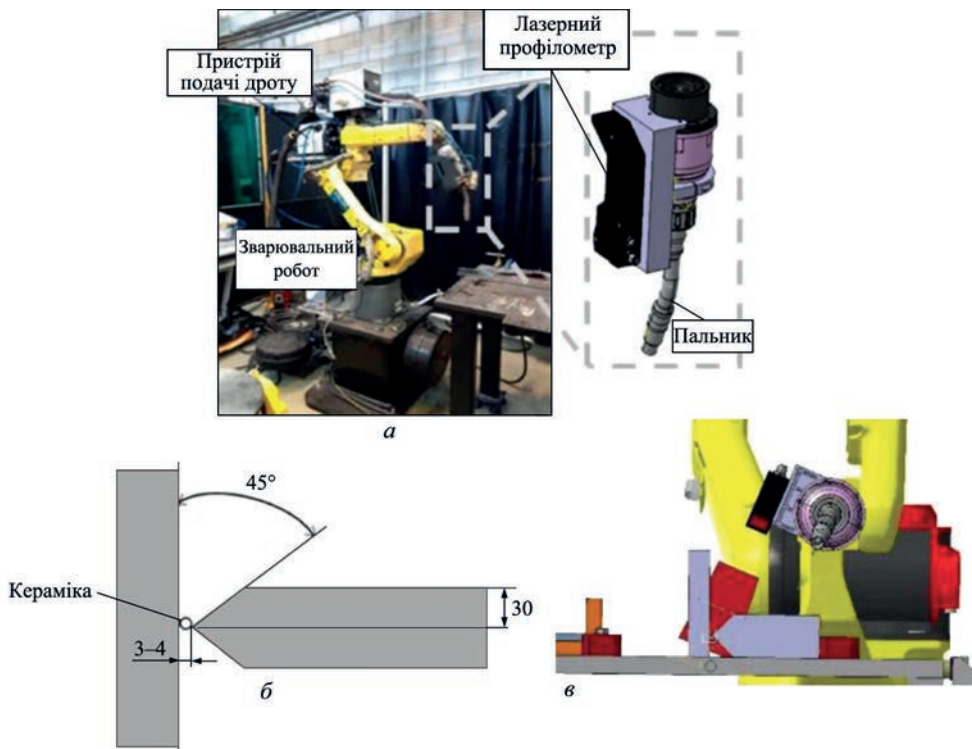


Рис. 9. Роботизована установка для зварювання (а), Т-подібне з'єднання великої товщини (б), схема сканування з'єднання за допомогою лазерного профілометра (в)

У дослідженні використовувалися різні методи ШІ та машинного навчання (МН):

- *Згорткові нейронні мережі (CNNs)*. Для зменшення шуму та розпізнавання траєкторій.
- *Faster-RCNN*. Для відстеження швів.
- *Генеративні змагальні мережі (GAN)*. Для зменшення шуму та розпізнавання траєкторій.

Автори [30] розглядають застосування ШІ для керування зварювальними роботами на деяких фірмах Фінляндії з метою проектування траєкторій, запобігання зіткненням та адаптації до змін у робочому середовищі. Рис. 10 демонструє відстеження шва та вимірювання термопрофілю па-

раметрів зварювання для контролю зварювального процесу за допомогою ШІ.

Прогнозування відмов зварювального обладнання. Застосування ШІ для прогнозування працездатності зварювального обладнання та планування профілактичного ремонту – це ключовий елемент концепції передиктивного обслуговування. Такі системи дозволяють мінімізувати простой, знизити витрати на ремонт та запобігти аварійним поломкам.

Передиктивне обслуговування відрізняється від профілактичного тим, що для передбачення часу потрібного обслуговування спирається на фактичний стан обладнання, а не на середні або

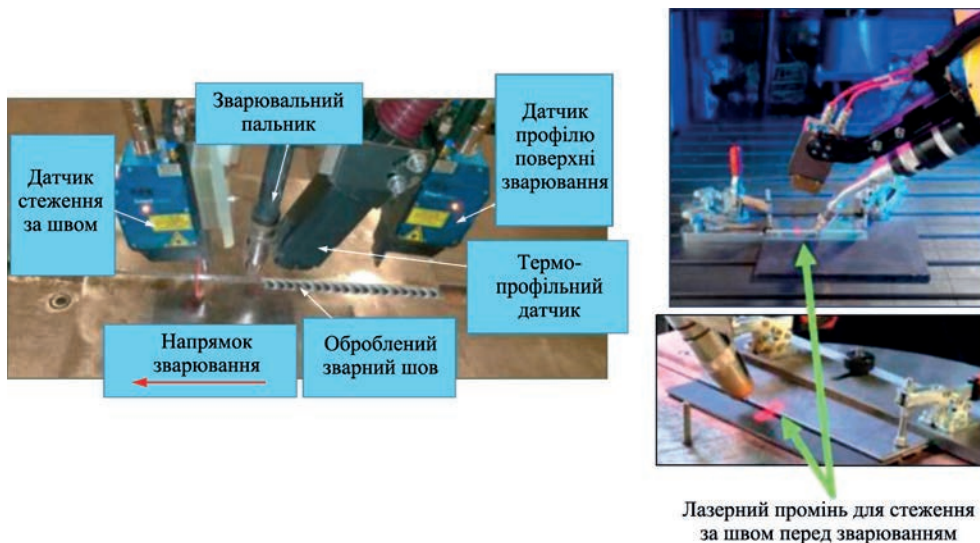


Рис. 10. Відстеження шва та аналіз спектра дуги або теплового поля

очікувані статистичні дані щодо терміну служби. Для визначення фактичного стану системи та прогнозування її майбутніх станів застосовуються підходи машинного навчання [33].

Для прогнозування використовуються типи даних: дані датчиків (вібрація (акселерометри)), температура (термопари, ПЧ-датчики), струм і напруга дуги, тиск у системі подачі газу, швидкість подачі зварювального дроту, звукові сигнали (акустичний аналіз), операційні параметри (швидкість зварювання, зношування сопла пальника, кількість відпрацьованих годин), дані попередніх відмов (журнали відмов, результати попередніх ТО, дані про заміну компонентів).

Типова архітектура системи прогнозування містить: збір даних з датчиків і пристроїв інтернет-речей, попередня обробка (нормалізація даних, усунення шумів (фільтри Калмана, вейвлет-перетворення), створення тимчасових вікон для аналізу часових рядів, конструювання ознак (вилучення ознак: середні значення, піки, спектральні характеристики, автоматичне виділення ознак за допомогою автоенкодерів), навчання моделей ШІ, прогнозування та рекомендації щодо технічного обслуговування.

Моделі ШІ, що застосовуються для прогнозування відмов, розділено на групи: прогнозування ймовірності відмови (для роботи з табличними даними та виявлення важливості ознак, глибокі нейронні мережі для складних нелінійних залежностей); для аналізу часових рядів (наприклад, динаміки вібрації); прогнозування часу до відмови (регресія) (застосовують моделі виживання, градієнтний бустинг з регресійними функціями втрат) та згорткові мережі (для аналізу спектрограм вібрації), виявлення аномалій (автоенкодери для виділення прихованих патернів та прапорів аномалій, ізолюючий ліс, неконтрольований алгоритм, який навчається функції прийняття рішення для виявлення новизни). Наприклад, система виявляє нехарактерні стрибки напруги, які не призводять до миттєвої відмови, але вказують на ризик поломки через 2–3 цикли.

Наведемо приклади реалізації:

1. Прогноз зносу зварювального пальника. Дані: температура, струм, кількість циклів зварювання. Модель: Гібридна архітектура (LSTM+XGBoost). LSTM аналізує часові залежності, XGBoost інтерпретує статичні параметри (матеріал, товщина зварювання). Результат: Точність прогнозу зносу – 92 %, економія на заміні деталей – до 30 %.

2. Відмова системи подачі дроту. Дані: вібрація, тиск, швидкість подачі зварювального дроту.

Модель: Згорткова нейромережа для аналізу спектрограм вібрації. Результат: Виявлення засмічення за 10...15 хв до зупинки.

Для інтеграції з системами керування застосовують цифрові двійники обладнання для симуляції зношування в реальному часі. Пропонують алгоритми оптимізації (наприклад, метод, що застосовується у ШІ при агентному підході). Належать до експериментів виду навчання з підкріпленням для вибору оптимального часу з урахуванням виробничого графіка. З метою запобігання простою система рекомендує виконати технічне обслуговування під час найближчої зміни.

Отже, є такі переваги: зниження витрат на 25...40 % за рахунок запобігання аварійним ремонтам, устаткування працює на 15...20 % довше між плановими ТО, мінімізація ризиків, пов'язаних з раптовими поломками. Таким чином, впровадження ШІ для прогнозування відмов зварювального обладнання – це необхідність сучасних виробництв.

Створення систем моніторингу стану відповідальних зварних конструкцій і цифрових двійників. Класична стратегія підтримання працездатності відповідальних конструкцій різного призначення передбачає систематичний контроль технічного стану та подальший експертний аналіз можливості продовження експлуатації в умовах проектного навантаження. Це вимагає дотримання відповідних вимог до проектування, неруйнівного контролю та технологічних підходів підтримання працездатності. Зокрема у випадку тривалої експлуатації під впливом складних зовнішніх силових, температурних і корозійних факторів при проектуванні та оцінці залишкового ресурсу прийнято враховувати найгірший з можливих сценаріїв зовнішнього впливу, а саме: максимальні навантаження, максимальну деградацію матеріалів і накопичення пошкоджень, інтенсивний корозійно-ерозійний знос. Додатковим фактором, який необхідно враховувати, є людський фактор та безпека проведення діагностичних і ремонтних заходів. І якщо врахування кожного фактора окремо не становить принципових труднощів за умови достатньої консервативності на основі стандартних підходів і досвіду обслуговування існуючих об'єктів, то багатофакторний вплив досить складно прогнозувати. Для гарантування надійності таких об'єктів використовуються значні коефіцієнти запасу міцності, найбільш несприятливі (включаючи малоімовірні) сценарії експлуатаційного впливу та мінімально допустимі механічні й фізико-механічні характеристики матеріалів. Як показує практика, це призво-

дить до надмірної матеріаломісткості, завищеної вартості, зниження реальних параметрів надійності конструкцій, а також значної трудомісткості в обслуговуванні, зокрема на важкодоступних ділянках.

Сучасний розвиток фундаментальних основ аналізу надійності та працездатності відповідальних конструкцій і компонентів, розуміння природи деградації конструкційних матеріалів, інструментальних методів неруйнівного контролю та технічної діагностики при належній адаптації міждисциплінарних підходів для вирішення конкретних фундаментальних та орієнтованих на практичну реалізацію завдань відкриває перспективи переосмислення існуючої ідеології підтримки технологічного стану шляхом переходу від планового технічного обслуговування до предикативного [34–36]. Зокрема це може бути реалізовано за допомогою системи моніторингу стану, яка базується на комплексі датчиків різного типу: деформометри, акселерометри, датчики корозії, анемометри, термометри, датчики акустичної емісії тощо. Збір цієї інформації та прийняття рішень щодо фактичного технічного стану конструкцій, зокрема, в області зварних з'єднань, які є місцями можливого зародження дефектності та подальшого руйнування, пов'язаний з великими масивами даних, що змінюються з часом. Для обробки статистично невизначеної інформації, зібраної від різних датчиків, та реалізації системи прийняття рішень щодо планування заходів технічного обслуговування раціональним є використання систем ШІ [37, 38].

Передовою концепцією спільного використання систем моніторингу та ШІ є цифрові двійники (ЦД) [39, 40]. Під ЦД прийнято розуміти віртуальне представлення фізичної сутності (об'єкта, явища, процесу або системи), яке забезпечує моніторинг, аналіз і оптимізацію в реальному часі завдяки активному взаємозв'язку між цифровими й фізичними елементами та інтелектуальному прийняттю рішень. Ця концепція знайшла широке застосування при реалізації різних смарт-систем, які мають змогу самостійно реагувати на зовнішні впливи або змінювати свої властивості відповідно до умов експлуатації [41, 42]. Це відбувається завдяки вбудованим сенсорам, актуаторам, адаптивним матеріалам або елементам управління. Якщо розглядати інфраструктурні об'єкти, то створення смарт-конструкцій на основі адаптивних систем ШІ реалізується для створення смарт-мостів, в які інтегровані системи моніторингу та прийняття рішень. Існують наступні приклади реалізації цієї концепції:

- Міст Цінг Ма в Гонконзі, разом з мостами Тінг Као та Кап Шуї Мун, інтегрований у систему WASHMS

(Wind and Structural Health Monitoring System) – комплексну систему моніторингу вітрового навантаження та технічного стану конструкцій [43].

- Віадук Мійо (Франція), де пілони, дорожнє полотно та анкерні троси оснащені численними сенсорами для моніторингу технічного стану конструкції [44]. Ці сенсори призначені для виявлення найменших рухів віадука та вимірювання його стійкості до зношування з часом. У мережі вимірювальних пристроїв використовуються анемометри, акселерометри, інклінометри та температурні сенсори. Зокрема дванадцять оптоволоконних деформометрів встановлені в основі найвищого пілона. Електричні деформометри розподілені на верхівках інших пілонів та здійснюють до 100 вимірювань на секунду. У разі сильних вітрів ці пристрої безперервно моніторять реакції віадука на екстремальні умови. Акселерометри, стратегічно розташовані на дорожньому полотні, вимірюють осциляції, які можуть впливати на металеві конструкції. Крім того, два п'єзоелектричних сенсори збирають дані про рух транспорту: вагу автомобілів, середню швидкість, щільність потоку транспорту тощо. Дані передаються через мережу Ethernet до комп'ютерної системи, де відбувається їх обробка.

- Другий міст Джіндо в Південній Кореї став першим у світі мостом, на якому було впроваджено автономну та повномасштабну бездротову систему моніторингу [45]. Спочатку система була встановлена в рамках спільного проекту Університету Іллінойсу в Урбана-Шампейн, Корейського університету. На головній балці, пілонах і вантах мосту було встановлено 71 вузол бездротової сенсорної мережі із загальною кількістю 427 сенсорних каналів. Кожен вузол складається з модуля Imote2 (який містить вбудований процесор, радіомодуль і мікросхему управління живленням), плати з сенсорами та батареї.

Навчання зварників. ШІ може використовуватися для створення віртуальних симуляторів зварювання, які можна застосувати для навчання зварників. Симулятори матимуть здатність створювати реалістичні умови зварювання та мати зворотний зв'язок, що сприятиме зварникам покращити навички (рис. 11).

Автори [46] анонсували створення штучного інтелекту для навчання зварників, що дозволяє розробити віртуальну систему навчання зварюванню в реальному часі з функціями прогнозування та моделювання морфології, а також інтелектуальною оцінкою якості зварного шва. У результаті було створено систему ШІ для мережі зварювальних

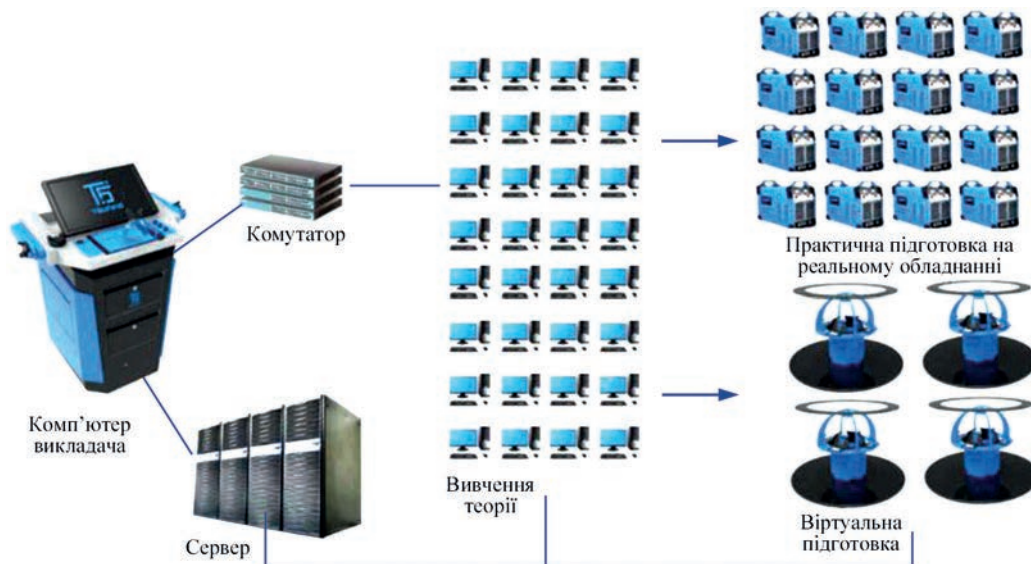


Рис. 11. Концепція комплексу для навчання зварюванню, що містить реальні та віртуальні тренування [46]

тренажерів V60, що має такі переваги: можливість моделювання реалістичного зовнішнього вигляду та якості зварного шва; можливість моделювання напружено-деформованого стану зварених деталей і температурних полів у режимі реального часу; наявність бази даних для моделювання більшої кількості зварювальних технологій і матеріалів; можливість моделювання процесів 3D друку; наявність системи віртуального тестування та аналізу якості зварних деталей; наявність системи сертифікації; розважального модуля; доступ до кафедри експертів; висока економічна доцільність.

Висновки

Застосування ШІ може забезпечити значні переваги у зварюванні та споріднених технологіях, а саме:

- Підвищення продуктивності та ефективності розробки нових зварних виробів і зварювальних технологій завдяки оптимізованим процесам (проекування та виробництва).
- Покращений контроль якості зварних виробів і зниження витрат на виправлення дефектів.
- Підвищення конкурентоспроможності та прибутковості зварювального виробництва за рахунок підвищення кваліфікації зварників, автоматизації процесів, економії витрат і покращення якості продукції.

Розробка та інтеграція ШІ у процеси зварювання та суміжні технології вимагають значних інвестицій, що обумовлено комплексним характером завдань на кожному етапі впровадження: дослідження та розробка алгоритмів; збір та обробка даних, інтеграція з наявними системами; інтеграція з устаткуванням, яке вже експлуатується; тестування та валідація; навчання персоналу; технічне обслуговування та відновлення (постійне

доопрацювання моделей через те, що ШІ потребує регулярного оновлення для адаптації до нових матеріалів або технологій зварювання, забезпечення захисту даних і систем від зламів).

Перспективи інтеграції ШІ у зварювання та споріднені технології багатообіцяючі, особливо в контексті розвитку автономних систем, 3D друку, адитивного виробництва та нових галузей. Ці напрями можуть трансформувати промисловість, підвищивши точність, швидкість і безпеку процесів: ШІ стане основою для створення повністю автономних зварювальних роботів, які будуть спроможні адаптуватися до змін у реальному часі; прискорить впровадження адитивних технологій в обробку металів, об'єднавши її з традиційним зварюванням; відкриє можливості для застосування зварювання в екстремальних умовах (зварювання у космосі, підводне зварювання) та зварювання надто маленьких деталей, що раніше було неможливим. Незважаючи на те, що інвестиції мають бути великими, вони окупляться за рахунок зниження браку, підвищення швидкості виробництва та мінімізації ручної праці.

Список літератури/References

1. Welding Automation and AI are Changing the Industry – Featuring: NovEye™ Autonomy. Posted: January 24, 2025. <https://www.novarctech.com/resources/blog/welding/welding-automation-and-ai-are-changing-the-industry-featuring-noveye-autonomy/>
2. O'Regan, G. (2021) *A brief history of computing*. Springer.
3. (2020) *A guided tour of artificial intelligence research. Vol. I: Knowledge representation, reasoning and learning*. Ed. by P. Marquis, O. Papini, H. Prade. Switzerland AG 202: Springer Nature.
4. (2024) *A short history of AI*. The Economist. <https://www.economist.com/schools-brief/2024/07/16/a-short-history-of-ai>
5. Рассел С., Норвіг П. (2016) *Искусственный интеллект. Современный подход*. Москва, Санкт-Петербург, Киев, Вильямс.

- Russell, S., Norvig, P. (2016) *Artificial intelligence: A modern approach*. Moscow, St. Petersburg, Kyiv, Williams [in Russian].
6. Crevier, D. (1993) *The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*.
 7. Глушков В.М. (1962) Синтез цифровых автоматов. Москва, Физматгиз.
 - Glushkov, V.M. (1962) *Synthesis of digital automata*. Moscow, Fizmatgiz [in Russian].
 8. Ивахненко А.Г., Лапа, В.Г. (1965) *Кибернетические предсказывающие устройства*. Киев, Наукова думка.
 - Ivakhnenko, A.G., Lapa, V.G. (1965) *Cybernetic predictive devices*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 9. Амосов М.М. (1965) *Моделирование мышления и психики*. Киев, Наукова думка.
 - Amosov, M.M. (1965) *Modeling of thinking and psyche*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 10. Глушков В.М. (1966). *Мышление и кибернетика*. Москва, Знание.
 - Glushkov, V.M. (1966). *Thinking and cybernetics*. Moscow, Znanie [in Russian].
 11. Ивахненко О.Г., Зайченко Ю.П. (1967) *Машины починають мислити*. Київ, Товариство «Знання».
 - Ivakhnenko, O.G., Zaichenko, Y.P. (1967) *Machines begin to think*. Kyiv, Tovarystvo «Znannya» [in Ukrainian].
 12. Амосов М.М. (1969) *Искусственный разум*. Киев, Наукова думка.
 - Amosov, M.M. (1969) *Artificial intelligence*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 13. Amosov, N.M. (1969) *Modeling of Thinking and the Mind*. New York, Springer.
 14. Уотермен Д. (1989) *Руководство по экспертным системам*. Москва, Мир.
 - Waterman, D. (1989) *A guide to expert systems*. Moscow, Mir [in Russian].
 15. Махненко В.И., Скосягин Ю.А., Лавринец И.Г., Сапрыкина Г.Ю. (1991) *Экспертные системы в сварке*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР.
 - Makhnenko, V.I., Skośnyagin, Yu.A., Lavrinets, I.G., Saprykina, G.Yu. (1991) *Expert systems in welding*. Kyiv, PWI [in Russian].
 16. Сапрыкина Г.Ю. (1995). Разработка экспертной системы «Проектирование технологии дуговой сварки сталей под флюсом»: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06. Киев.
 - Saprykina, G.Yu. (1995). Development of the expert system on Design of Technology for Submerged Arc Welding of Steels. In: Synopsis of Thesis for Dis. ... Cand. of Techn. Sci. Degree. Kyiv [in Russian].
 17. Leith, P. (2010) The rise and fall of the legal expert system. *European J. of Law and Technology*, 1(1), 94–106. DOI: <https://doi.org/10.1080/13600869.2016.1232465>
 18. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. (2016) *Deep Learning*. The MIT Press.
 19. Турп Э. (2023) *Потенциал и опасность искусственного интеллекта*. <https://meetings.imf.org/ru/IMF/Home/Publications/fandd/issues/2023/12/B2B-Artificial-Intelligence-promise-peril-Tourpe>
 - Turp, E. (2023) *The potential and danger of artificial intelligence*. <https://meetings.imf.org/ru/IMF/Home/Publications/fandd/issues/2023/12/B2B-Artificial-Intelligence-promise-peril-Tourpe> [in Russian].
 20. Baicun Wanga, Hub, S.J., Lei Suna, Freihe, T. (2020) Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. *J. of Manufacturing Systems*, 56, 374–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020>
 21. Berkay Eren, Mehmet Ali Guvenc, Selcuk Mistikoglu (2020) Artificial intelligence applications for friction stir welding: A review. *Metals and Materials Intern.*, 27(6), 193–219. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00854-y>
 22. Haykin, S. (2009) *Neural Networks and Learning Machines. Third Edition*. Prentice Hall, New York.
 23. Valizadeh, M., Wolff, S.J. (2022) Convolutional neural network applications in additive manufacturing: A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 4, 100072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100072>
 24. Xinbo Qi, Guofeng Chen, Yong Li, Xuan Cheng, Changpeng Li (2019) Applying neural-network-based machine learning to additive manufacturing: current applications, challenges, and future perspectives. *Engineering*, 5(4), 721–729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.04.012>
 25. *Build a Retrieval Augmented Generation (RAG) (Pts 1, 2)* <https://python.langchain.com/docs/tutorials/rag/>
 26. Keith Bourne (2024) *Unlocking Data with Generative AI and RAG*. – Packt Publishing.
 27. Okuyucu, H., Kurt, A., Arcaklioglu, E. (2007) Artificial neural network application on the friction stir welding of aluminum plates. *Materials and Design*, 28(1), 78–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.003>
 28. D’Orazio, A., Forcellese, A., Simoncini, M. (2018) Prediction of the vertical force during FSW of AZ31 magnesium alloy sheets using an artificial neural network-based model. *Neural Computing and Application*, 31, 7211–7226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3562-6>
 29. Nadeau, F., Thériault, B., Gagné, M.-O. (2020) Machine learning models applied to friction stir welding defect index using multiple joint configurations and alloys. *Materials: Design and Applications*, 234(5), 752–765. DOI: <https://doi.org/10.1177/1464420720917415>
 30. Gyasia, E.A., Handroosa, H., Kah, P. (2019) Survey on artificial intelligence (AI) applied in welding: A future scenario of the influence of AI on technological, economic, educational and social changes. *Procedia Manufacturing*, 38, 702–714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.095>
 31. Aldalur, E., Suarez, A., Curiel, D., Viega, F., Vilanueva, P. (2023) Intelligent and adaptive system for welding process automation in T-shaped joints. *Metals*, 13(9), 1532. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13091532>
 32. Eren, B., Demir, M.H., Mistikoglu, S. (2023) Welding robot design with machine learning based intelligent vision system. *Intelligent methods in engineering sciences*, 2(2) 048–051. DOI: <https://doi.org/10.58190/imiens.2023.12>
 33. Ucar, A., Karakose, M., Kirimca, N. (2024) *Artificial Intelligence for Predictive Maintenance Applications: Key Components, Trustworthiness, and Future Trends*. Applied Science.
 34. Murtaza, A.A., Saher, A., Zafar, M.H., Moosavi, S.K.R., Muhammad Faisal Aftab, M.F., Sanfilippo, F. (2024) Paradigm shift for predictive maintenance and condition monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A systematic review, challenges and case study. *Results in Engineering*, 24, 102935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102935>
 35. Huang, C., Bu, S., Lee, H.H., Chan, C.H., Kong, S.W., Yung, W.K.C. (2024) Prognostics and health management for predictive maintenance: A review. *J. of Manufacturing Systems*, 75, 78–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.05.021>
 36. Mallioris, P., Aivazidou, E., Bechtsis, D. (2024) Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic multi-sector mapping. *CIRP J. of Manufacturing Science and Technology*, 50, 80–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.02.003>
 37. Liu, H., Qi, J., Feng, H., Fan, M. (2025) Research on state monitoring and diagnosis models for multi-state systems based on Petri nets. *Results in Engineering*, 27, 106249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106249>
 38. Thirumalaiselvi, A., Sasmal, S. (2024) Machine learning-based acoustic emission technique for corrosion-induced damage monitoring in reinforced concrete structures. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 137, Part A, 109121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109121>
 39. Zhang, H., Yan, J., Yang, J., Meng, W., Chen, S. (2025) Two-stage point cloud registration using multi-scale edge convolution for digital twin-based bridge construction progress monitoring. *Automation in Construction*, 178, 106415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106415>
 40. Jiao, W.W., Zhao, D., Mei, X., Yang, S., Zhang, X., Li, L., Xiong, J. (2024) Digital twin for weld pool evolution by data-physics integrated driving. *J. of Manufacturing Processes*, 131, 947–957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.022>

41. Siyuan Chen, S., Turanoglu Bekar, E., Bokrantz, J., Skoogh, A. (2025) AI-enhanced digital twins in maintenance: Systematic review, industrial challenges, and bridging research-practice gaps. *J. of Manufacturing Systems*, **82**, 678–699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.07.006>
 42. Zhang, J., Li, C., Deng, C., Luo, T., Deng, R., Luo, D., Tao, G., Cao, H. (2025) Toward digital twins for intelligence manufacturing: Self-adaptive control in assisted equipment through multi-sensor fusion smart tool real-time machine condition monitoring. *J. of Manufacturing Systems*, **82**, 301–318. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06206-4>
 43. Ye, X.-W., Sun, Z., Lu, J. (2023) Prediction and early warning of wind-induced girder and tower vibration in cable-stayed bridges with machine learning-based approach. *Engineering Structures*, **275**, Part A, 115261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115261>
 44. Abebe Derseh, S., Alemu Mohammed, T. (2023) Bridge structures under progressive collapse: A comprehensive state-of-the-art review. *Results in Engineering*, **18**, 101090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101090>
 45. Sunjoong Kim, Sun-Ho Lee, Sejin Kim (2023) Pointwise multiclass vibration classification for cable-supported bridges using a signal-segmentation deep network. *Engineering Structures*, **279**, 115599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115599>
 46. Юйхуэй Яо, Пелешко С.И., Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Квасницкий В.В. (2017) Концепция создания усовершенствованной системы искусственного интеллекта и компьютеризированного тренажёра для виртуальной сварки. *Автоматическая сварка*, **5–6**, 26–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.04>
- Juihui Yao, Peleshenko, S.I., Korzhik, V.N., Khaskin, V.Yu., Kvasnitsky, V.V. (2017) Concept of creation of an improved artificial intelligence system and computerized trainer for virtual welding. *The Paton Welding J.*, **5–6**, 19–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.04>

THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES

L.M. Lobanov, O.V. Makhnenko, O.S. Milenin, M.G. Malhin, G.Yu. Saprykina, O.M. Savitskaya

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

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

The use of Artificial Intelligence (AI) systems based on Large Language Models offers significant opportunities for welding specialists to analyze vast amounts of information available online when preparing scientific articles and reports, as well as for solving standard tasks in mathematics, physics, chemistry, etc. But the implementation of specialized AI models in welding is highly advisable. These models can effectively address challenges such as optimizing welding parameters, analyzing weld quality using computer vision methods, automating welding for repetitive tasks, monitoring the condition of critical welded structures, creating digital twin systems, and in the field of welder training. The utilization of AI systems in welding and related technologies can provide substantial advantages in the development of new welded products and welding techniques through optimized processes. 46 Ref., 1 Tabl., 11 Fig.

Keywords: welding, artificial intelligence, neural networks, welding parameter optimization, weld quality control, robotic welding, monitoring systems, welder training

ORCID

Л.М. Лобанов – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, О.В. Махненко – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>,

О.С. Міленін – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, М.Г. Мальгін – <https://orcid.org/0009-0003-8159-8226>,

Г.Ю. Саприкіна – <https://orcid.org/0000-0003-1534-7253>, О.М. Савицька – <https://orcid.org/0000-0002-9363-6184>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

О.В. Махненко

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

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

Л.М. Лобанов, О.В. Махненко, О.С. Міленін, М.Г. Мальгін, Г.Ю. Саприкіна, О.М. Савицька (2026)

Використання штучного інтелекту в зварюванні та споріднених технологіях. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*,

01, 8–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.01.02>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 07.08.25

Отримано у переглянутому вигляді 28.10.25

Підписано до друку 10.04.26

Оприлюднено 23.04.2026

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТА НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

тел./факс: (38044) 205-23-90, E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

ПІДПИШІТЬСЯ СЬОГОДНІ

Передплата доступна
у друкованому
та цифровому форматах!



ПОШКОДЖЕННЯ НЕРЖАВКИХ ВАЛЬЦЬОВАНИХ ТРУБ УСТАНОВКИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПАРІВ БЕНЗИНУ НАФТОПЕРЕРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА

С.О. Осадчук, Л.І. Ниркова, Л.В. Гончаренко, В.П. Єлагін, С.Ю. Коваленко

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

Досліджено особливості пошкодження нержавких вальцьованих труб установки повітряного охолодження парів бензину на нафтопереробному підприємстві після експлуатації впродовж одного року, які виявлені на границі переходу від вальцьованої частини труби до нерозвальцьованої. Корозійне розтріскування відбулося внаслідок спільного впливу вуглеводневого середовища за підвищеної температури (більше за 80 °С) та напруженого стану виробу, обумовленого вальцюванням. Методом оптичної мікроскопії показано, що товщина стінки труби є нерівномірною. Поширення наскрізної тріщини та корозійні пошкодження внутрішньої поверхні у вигляді сітки тріщин, розташованих впоперек осі труби, розвивалися за механізмом міжзеренного руйнування. Методом сканувальної електронної мікроскопії встановлено наявність сірки та хлору в пітінгах, що свідчить про її потрапляння з вуглеводневого середовища. Виявлено також зменшення вмісту нікелю від 2,59 до 7,47 % порівняно з основним металом (10,5 %), що обумовило електрохімічну гетерогенність і відмінності мікротвердості (різниця потенціалів між розвальцьованою та нерозвальцьованою ділянками на внутрішній поверхні зразка становила 0,087 В, мікротвердість – 405 та 356 HV). Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: нержавка сталь, установка охолодження парів бензину, вальцьовані труби, внутрішня корозія, корозійне розтріскування

Вступ. Корозійна тривкість виробів із нержавкої сталі забезпечується тонким пасивним шаром на поверхні [1]. Проте нержавкі сталі схильні до локальних видів корозії – міжкристалічної, пітінгової і корозійного розтріскування [2]. Частка корозійного розтріскування, спричиненого одночасною дією корозивного середовища та зовнішніх або внутрішніх напруг розтягу з утворенням чечеренних або міжзеренних тріщин [3], становить від 20 до 40 % від усіх корозійних руйнувань у різних галузях промисловості [4]. Корозійні тріщини важко виявити, оскільки вони виникають під час експлуатації та, зазвичай, нерівномірно розподілені по поверхні [5].-

Хромонікелеві аустенітні сталі мають низьку тривкість проти корозійного розтріскування. Найчутливішою до корозійного розтріскування є мартенситна структура. У хімічній апаратурі корозійне розтріскування найчастіше спостерігається в конструкціях, які мають залишкові напруження після термічного або механічного оброблення під час монтажу обладнання, зварювання, в умовах експлуатації за підвищених температур і тиску [6]. Транскристалічне корозійне розтріскування аустенітних сталей спостерігається у водних середовищах, що містять галогеніди (найчастіше хлориди), луѓи, сірководень, роданіди та сполуки, які гідролізуються з утворенням зазначених речовин.

Аустенітні сталі можуть зазнавати міжкристалічного розтріскування, зокрема в політіонових кислотах, у водяній парі, що містить 1 мг/л хлоридів [2, 7, 8].

Більшість гіпотез, які пояснюють механізм корозійного розтріскування, засновані на тому, що відбуваються процеси локального механічного (під час розтягування металу) або електрохімічного руйнування цілісності захисного пасивного шару на поверхні сталі з подальшим активним гостролокалізованим розчиненням незахищеного металу [4]. Існує лінійна залежність між часом до руйнування $\log t_{кр}$ та прикладеним напруженням σ для зразків за напруження нижче ніж границя плинності, звідки втікає, що не існує граничного напруження, нижче якого руйнування не відбувається [2]. Пластична деформація аустенітних сталей при холодному або гарячому обробленні сильно впливає на сприйнятливості до хлоридного корозійного розтріскування. Залишкові напруження розтягу після холодної деформації здатні викликати корозійне розтріскування за відсутності додаткового робочого навантаження [4]. Проте напруження, що виникли внаслідок холодної деформації, можна усунути термічним обробленням [2].

Стан поверхні. Високотемпературні оксидні плівки, що виникають на сталях під час термооброблення, внаслідок дефектності та крихкості зазвичай скорочують час до корозійного розтріскування. Різні види механічного оброблення призводять до появи на поверхні залишкових напру-

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

жень розтягу до 400 МПа, погіршують тривкість проти корозійного розтріскування. Поверхневі тріщини виникають навіть без зовнішнього навантаження [4].

У тріщині розвивається щілинна корозія, внаслідок якої по границях зерен може початися міжкристалічна корозія, а поверхня навколо тріщини залишиться не пошкодженою. За наявності напруження тріщини починають розкриватися, що призводить до прискорення процесу корозії. Так, наприклад, вважається, що 10^{-2} мм/с є максимальною швидкістю для зростання тріщин, але зазвичай вона нижче, близько 10^{-8} мм/с, що дорівнює приблизно 1 мм за 3 роки і менше. Основними причинами утворення залишкових напружень вважається зварювання, формування з холодною деформацією, шліфування, а також термо- та механічне оброблення. Одним зі шляхів зниження схильності конструкцій до корозійного розтріскування є уникнення щілин і застійних зон. Треба брати до уваги, що аустенітні сталі навіть за мінімальної кількості хлоридів і низькій температурі мають обмежену стійкість до корозійного розтріскування [7, 9].

Низьковуглецеві аустенітні нержавкі сталі за впливу температури 675 °С можуть стати схильними до міжкристалічної корозії, що обумовлено осадженням карбідів хрому на границях зерен. Інші фази, наприклад ферит, знижують тривкість сталей проти точкової корозії. Мартенсит, що утворюється внаслідок деформації нестабільного аустеніту, підвищує схильність до водневого окрихнення [5].

Пітингова корозія [3] внаслідок складної взаємодії різних чинників має імовірнісний характер [1]. Пітинг утворюється, якщо пасивна плівка пошкоджена в результаті хімічного або механічного впливу. У процесі пітингоутворення виділяють три стадії: зародження пітингів, взаємодія між ними та злиття пітингів. Злиття пітингів призводить до загасання процесу їхнього розвитку та пасивації слабких пітингів [10]. Імовірність пітингової корозії нержавких сталей зменшується за вмісту молібдену. Чисті металеві поверхні менше схильні до виникнення пітингів. Імовірність корозії може підвищуватися в присутності продуктів корозії.

Щілинна корозія [3] відбувається в результаті механічного оброблення поверхні, нещільного з'єднання металевих деталей (наприклад, вальцювання) у місцях застою середовища, у яких розвиваються пітинги. Корозія в зазорі виникає навіть за невисокої концентрації хлоридів унаслідок руйнування пасивної плівки, що призводить до зниження з часом рН середовища.

Вплив середовища на корозію нержавкої сталі. Бензин є діелектриком і має високий електричний опір, який залежить від домішок, температури, тиску [11] й за відсутності води не є корозійно-активним. Вміст води значно активізує дію домішок і викликає інтенсивну електрохімічну корозію [6, 12]. Від впливу парів бензину, які містять агресивні компоненти, такі як сірчисті сполуки і кислотні залишки, метали можуть зазнавати хімічної та електрохімічної корозії. Допустимий вміст у бензині сірководню становить 0,0003 %, елементарної сірки – 0,0015 %. Розчинність води у бензині мала (за температури 43 °С – 0,095 см³/л). Її надлишок може виділятися на холодній стороні ємності. З іншого боку, розчинність кисню та сірководню у неводних рідинах більша, ніж у воді. Вуглеводні та інші неполярні рідини мають менше поверхневе натягіння, ніж вода, тому легко змочують поверхню. Під краплею води утворюється тонкий шар неводної рідини. Поступово поверхня металу окиснюється та стає гідрофільною, тонкий шар вуглеводів руйнується й вода безпосередньо починає контактувати з металом з наступним руйнуванням захисного шару на металі, що інтенсифікує корозійний процес [13].

Забруднення поверхонь із нержавкої сталі органічними речовинами посилює щілинну корозію. Хлориди залишаються в щілинах і викликають хлоридне корозійне розтріскування аустенітних нержавких сталей [5, 9].

Причини корозії на нафтопереробних заводах. Зазначено [14], що на нафтопереробних заводах Європейського Союзу та Організації економічного співробітництва та розвитку корозія викликана умовами процесу у 53 випадках, середовищем – 46 випадків, швидкістю руху середовища – 10 випадків, високою температурою – 11 випадків, високим тиском – 7 випадків, перевищенням проектних параметрів експлуатації впродовж технологічних циклів – 8 випадків. Деякі конструктивні особливості створюють слабкі місця в системі, які є особливо вразливими до потенційних пошкоджень, включаючи корозію. Зазначено, що 4 % аварій сталися в трубах теплообмінних та охолоджувальних установок. Основною причиною низькотемпературної корозії (за температури нижче за 260 °С у присутності води) на нафтопереробних заводах є наявність корозійно-агресивних домішок у сирій нафті під час її видобутку. У більшості випадків корозійно-агресивні речовини утворюються під час початкових операцій нафтопереробного процесу [5, 15]. Тому актуальним

є дослідження особливостей прискореної корозії для запобігання аварійним ситуаціям.

Так, зокрема, на установці для повітряного охолодження парів бензину нафтопереробного підприємства через один рік експлуатації виникли пошкодження нержавіючих труб у зоні вальцьованого з'єднання, виявлення особливостей якого було метою роботи.

Об'єктом дослідження були розвальцьовані труби з нержавіючої сталі 08X18H10T (C – 0,055; Si – 0,46; Mn – 1,57; Cr – 17,3; Ni – 10,5; Cu – 0,15; Ti – 0,37; Mo – 0,19; S – 0,011; P – 0,027 %) зовнішнім діаметром 25 мм з товщиною стінки 2 мм після експлуатації впродовж одного року. Труби постачалися у термообробленому за температури 1100 °C стані, пройшли гідровипробування. За результатами досліджень встановлено, що вони тривкі до міжкристалічної корозії й корозійного розтріскування впродовж 290 год, не тривкі до пітінгової корозії. Труби розміщені у трубній решітці зі сталі AISI 321 вертикально, вирізані на відстані 50 мм від трубної решітки. Температура середовища на вході в установку 150 °C, на виході з установки – 80 °C. Робочий тиск у трубах 0,2 МПа, що не перевищував розрахунковий робочий тиск.

Методи дослідження. Вміст феритної фази металу труб визначали магнітним методом за допомогою феритометра МФ-10И.

Вимірювання потенціалів по поверхні зразків труб проводили на основному металі та розвальцьованій частині зразків під краплею розчину 3 % NaCl. Потенціали вимірювали відносно насиченого хлоридсрібного електрода порівняння протягом 1 год за допомогою цифрового потенціостата MTech PGP-550F.

Дослідження мікротвердості проводили від внутрішньої до зовнішньої поверхні перерізу стінки труби на мікротвердомірі ПМТ-3, маса навантаження 50 г.

Дослідження мікроструктури металу труб виконували на нетравлених і травлених шліфах, виготовлених за стандартною методикою, на мікроскопі NEOPHOT 21 з цифровою камерою ALLIED VISION та програмним забезпеченням SEO ImageLab Met.

Дослідження внутрішньої поверхні зразків проводили методом сканувальної електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу на електронному мікроскопі JSM 840 (JEOL, Японія) з енергодисперсійним мікроаналізатором Link 860/500 (Link Analytical, Англія). Вивчення поверхні виконували в режимі вторинних (SEI) і зворотнорозсіяних електронів (BEI) за напруги

20 кВ, що прискорює, і струмі електронного пучка $10^{-7} \dots 10^{-10}$ А.

Виклад основного матеріалу. Для виявлення особливостей корозії порівнювали зразки труб: після експлуатації з ділянками без вальцьовання та розвальцьованої (рис. 1); після зберігання – нерозвальцьованої. Зовнішня поверхня зразка розвальцьованої частини труби після експлуатації світло-сірого кольору, блискуча, без корозійних пошкоджень. Нерозвальцьована частина труби вкрита відкладеннями, міцно зчепленими з трубою, чорного кольору, що утворилися внаслідок контакту з середовищем парів бензину та води, що під час експлуатації, імовірно, витікали назовні з середини труби у міжтрубний простір вальцьованого з'єднання. Поверхня корозійної плями, виявлена під відкладеннями, вкрита пітінгами. Уздовж лінії границі розділу розвальцьованої та нерозвальцьованої частин утворилася наскрізна тріщина з відгалуженнями, довжина якої становить приблизно чверть довжини окружності труби з максимальним розкриттям приблизно на 1 мм (рис. 1, фото I, a).

На внутрішній поверхні зразка труби наявні міцно зчеплені з поверхнею відкладення чорного кольору, що утворилися внаслідок контакту з середовищем під час експлуатації (рис. 1, фото I, б): на розвальцьованій частині відкладення вкривають приблизно 50 % площі поверхні; на нерозвальцьованій – всю поверхню. Після видалення відкладень поверхня місцями темно-сірого кольору з блиском (рис. 1, фото II, a) з неглибокими пітінгами та сіткою поверхневих тріщин, крім наскрізної. Пітінги розміщені нерівномірно, більшою мірою на тій поверхні частини зразка (рис. 1, фото II, б), на якій утворилася наскрізна тріщина.

Дослідження гетерогенності зразків труб методом феритометрії показало, що вміст феритної фази (дельта-ферит, ферит) у зразку труби становить 0...1,7 %, що не перевищує її вміст для аустенітної структури (10 %) [16]. Найбільший вміст феритної фази спостерігали на розвальцьованій поверхні зразка після експлуатації (1,7 %), водночас на зразку після зберігання – вміст феритної фази становив 0...0,25 % (рис. 2, a).

Характер кривих зміни потенціалу корозії рис. 3, a на внутрішній (крива 1) та зовнішній (крива 2) поверхні зразка труби після зберігання відрізняється мало, що вказує на електрохімічну однорідність обох поверхонь. Проте характер аналогічних кривих для експлуатованого зразка має відмінності внаслідок впливу середовища на внутрішню поверхню труб та наявності міцно зчепле-

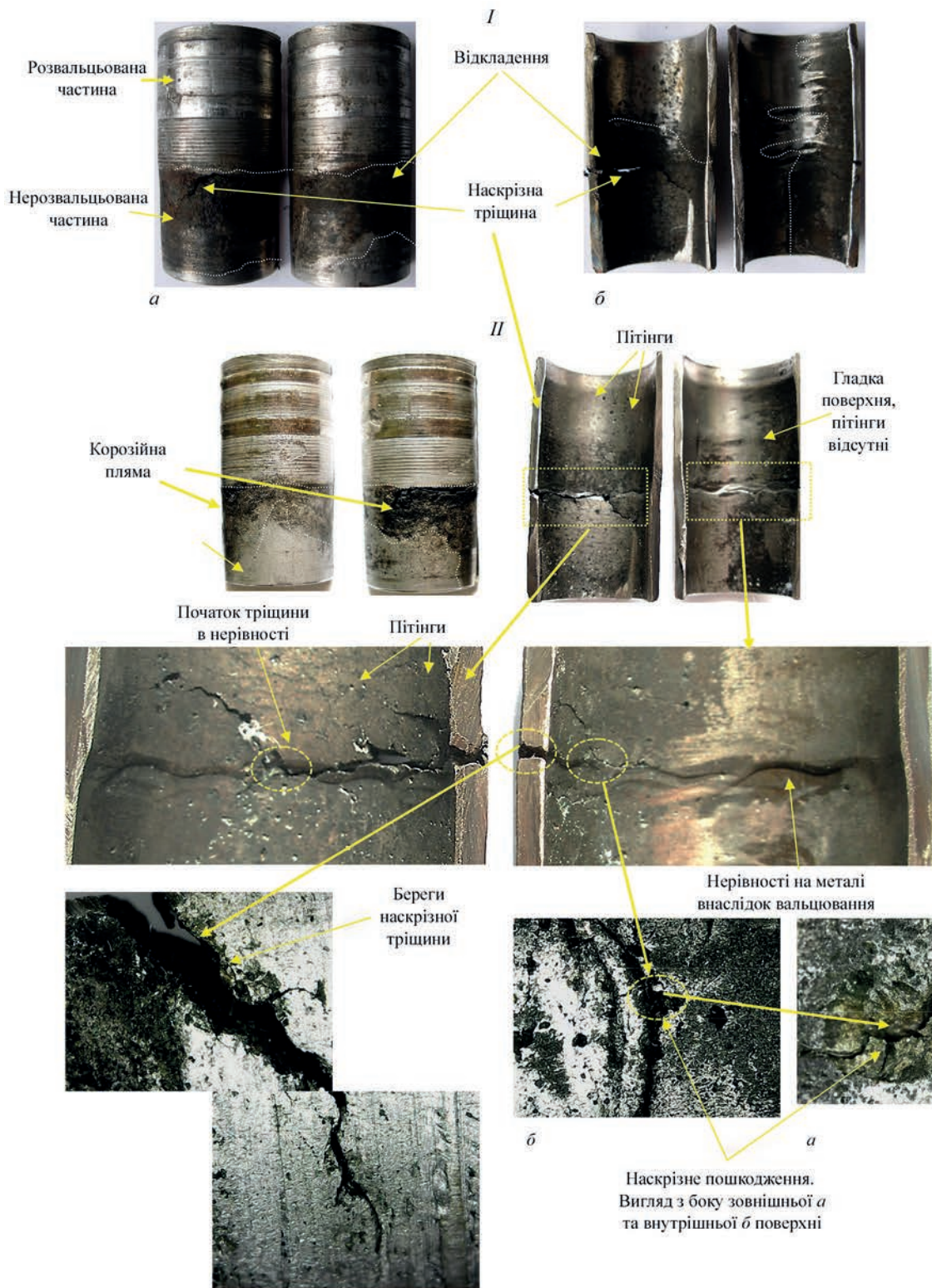


Рис. 1. Зовнішній вигляд зразка труби після експлуатації (I) та після видалення відкладень (II): а – зовнішня поверхня; б – внутрішня поверхня

ного з поверхнею металу шару продуктів органічного походження: потенціали корозії, виміряні на внутрішній поверхні зразків, мали більш позитивні значення порівняно з потенціалами корозії виміряними на зовнішній поверхні (рис. 3, б).

Значення потенціалів корозії на внутрішній поверхні зразка труби після експлуатації становили

–0,104...–0,191 В (рис. 2, а, 3, б), що викликало найбільшу різницю потенціалів між ділянками розвальцьованої та нерозвальцьованої внутрішньої поверхні (0,087 В). Якщо різниця потенціалів більше за 50 мВ [17] між окремими ділянками (у цій роботі між розвальцьованою та нерозвальцьованою), то у виробі існує електрохімічна неодно-

рідність, що може сприяти перебігу локальної корозії. Проте на зовнішній поверхні цього самого зразка потенціали змінювалися в межах $-0,163 \dots -0,171$ В. Водночас потенціали корозії, виміряні на внутрішній та зовнішній поверхні зразка після зберігання, відрізнялися мало та становили $0,069$ та $0,056$ В (рис. 2, б, 3, а).

Металографічні дослідження. Дослідження товщини та мікротвердості. Вимірювання товщини стінки труби в області наскрізної тріщини

виявило, що товщина стінки нерівномірна та змінювалася від $1,56$ до $1,89$ мм (рис. 4, табл. 1).

Найменша товщина ($1,56$ мм) характерна для ділянки 2: з тріщинами та корозійними ураженнями зовнішньої поверхні внаслідок потрапляння середовища з середини у простір між трубною решіткою та зовнішньою поверхнею труби завширшки приблизно $0,78$ мм на границі ділянок 1 та 2. Це, імовірно, створило умови для перебігу щільної корозії внаслідок застоювання середовища та нестачі кисню в зазорі. Зміна товщини по довжи-

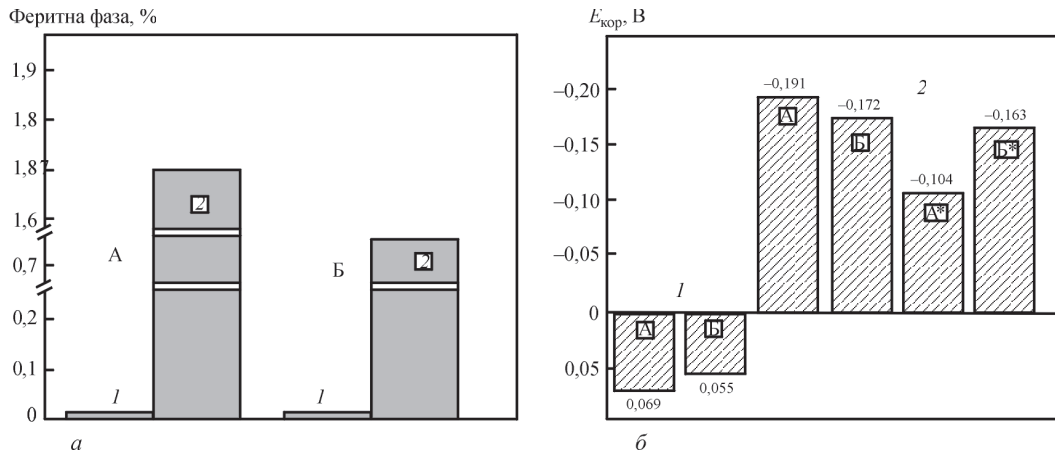


Рис. 2. Вміст феритної фази (а) та потенціали корозії (б) на ділянках внутрішньої (А) та зовнішньої (Б) поверхні зразків: 1 – після зберігання; 2 – після експлуатації. *Розвальцьована частина труби

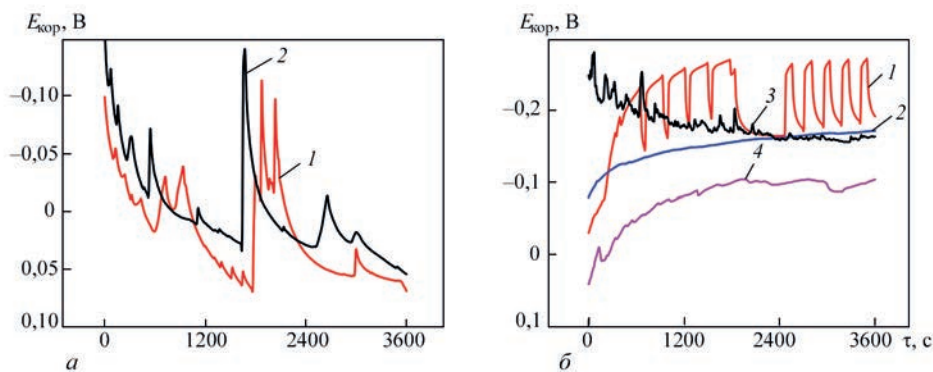


Рис. 3. Зміна потенціалу корозії впродовж 1 год на внутрішній (1, 4) та зовнішній (2, 3) поверхні зразків труб після зберігання (а) та експлуатації (б). Розвальцьована частина труби (3, 4)

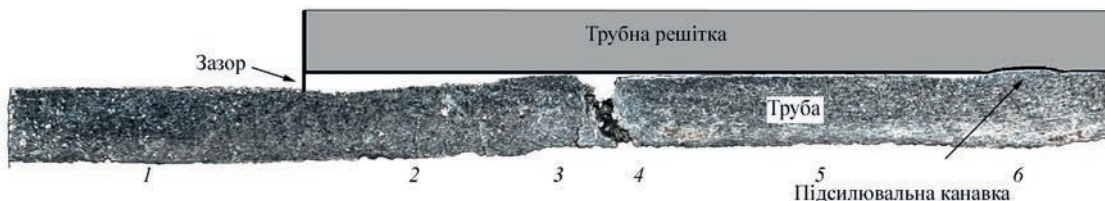


Рис. 4. Товщина металу стінки труби зі сталі 08X18H8T на ділянках: 1 – основного металу, на якій тріщини відсутні; 2 – з тріщинами та корозійними ураженнями зовнішньої (між трубною решіткою та зовнішньою поверхнею труби) та внутрішньої поверхні; 3 – закінчення вальцювання; 4 – наскрізної тріщини; 5 – щільного вальцювання; 6 – вальцювання в підсилювальну канавку

Таблиця 1. Товщина стінки труби на ділянці

Позначення ділянки*	1	2	3	4	5	6
Товщина стінки, мм	1,89	1,56	1,74	1,68	1,62	1,78

* Згідно з рис. 4.

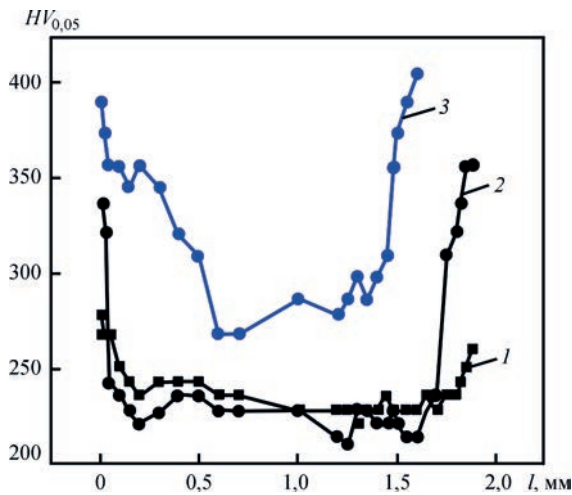


Рис. 5. Розподіл мікротвердості по товщині стінки зразків труб після зберігання (1) та після експлуатації на різних ділянках: 2 – нерозвальцьована; 3 – щільне вальцювання

ні стінки труби, імовірно, викликала додаткові напруження в металі на границі ділянок 3 (кінця вальцювання) та 5 (щільного вальцювання), що прискорило утворення тріщини (ділянка 4). Найбільші корозійні пошкодження з утворенням наскрізної корозійної тріщини відбулися на ділянці закінчення вальцювання (3). Мікротвердість

на зразку після зберігання та на нерозвальцьованій ділянці зразка після експлуатації становила 228...278 HV та 221...356 HV відповідно (рис. 5, криві 1 та 2). Натомість на ділянці щільного вальцювання експлуатованого зразка труби мікротвердість збільшилася (268...405 HV, крива 3) порівняно з мікротвердістю на нерозвальцьованій ділянці, що вказує на зміцнення металу в цій області. Найвищу мікротвердість визначено у приповерхневих шарах металу труби.

Дослідження методом оптичної мікроскопії.

Вигляд тріщини, яка утворилася в зоні переходу від розвальцьованої частини труби після експлуатації до нерозвальцьованої, у поперечному перерізі наведено на рис. 6. У середній частині тріщини видно широку порожнину, в якій застоювалося корозивне середовище, що сприяло локальній корозії стінок тріщини. Із зовнішньої та внутрішньої поверхні по обидва боки від наскрізної тріщини, біля її берегів, спостерігається сітка ниткоподібних мікротріщин з локальними дрібними порожнинами, що також свідчить про корозійне пошкодження металу в зоні її утворення. Проте тріщини з боку внутрішньої поверхні довші. В області на-

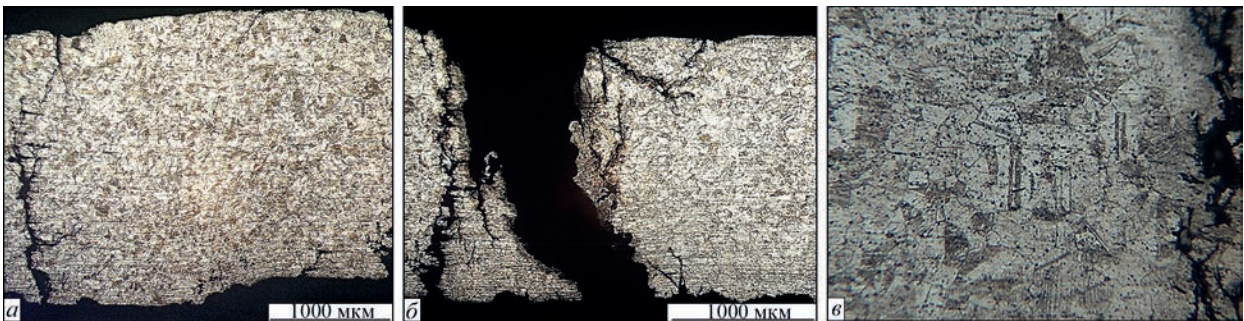


Рис. 6. Зразок труби після експлуатації: а – область на відстані від наскрізної тріщини; б – область наскрізної тріщини; в – мікроструктура металу в зоні тріщини

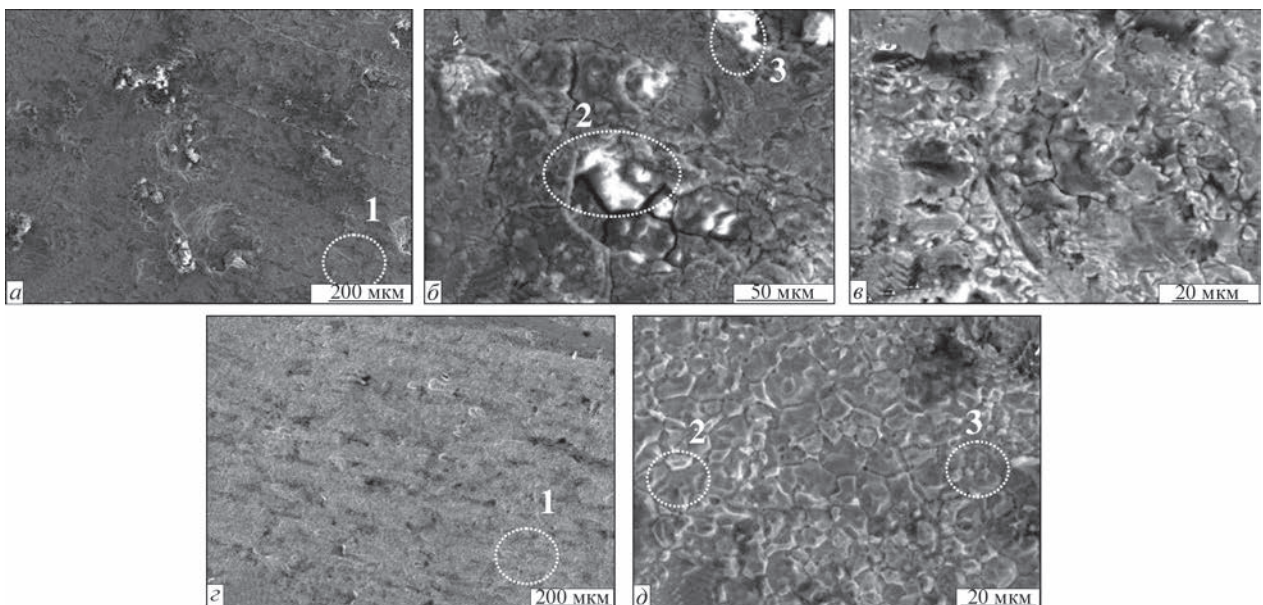


Рис. 7. Поверхні зразків труб після експлуатації (а, б, в) та після зберігання (г, д)

Таблиця 2. Хімічний склад у локальних точках, %

Точка вимірювання	Характеристика місця дослідження	Cr	Ni	Si	Ti	Fe	S	Cl
Зразок після експлуатації								
1	Загальний	20,07	7,48	1,84	1,24	62,89	3,95	1,00
2	У пітінгах (з продуктами органічного походження)	22,37	5,36	1,43	2,37	5,39	11,78	0,68
3		37,3	4,36	1,69	2,05	2,18	7,52	1,20
Зразок після зберігання								
1	По всій поверхні	21,87	8,60	1,35	1,43	66,74	–	–
2	Біла точка	20,86	8,88	2,42	1,50	66,34	–	–
3	Темна точка	22,85	7,10	0,51	1,40	68,14	–	–

скрізної тріщини щільність мікротріщин найбільша, а на відстані 15...20 мм від наскрізної тріщини – вони практично відсутні.

Метал зразків труб має аустенітну структуру (рис. 6). Відокремлення крупних локальних часточок металу на берегах наскрізної тріщини та мікротріщин, які розвивалися від внутрішньої та зовнішньої поверхні, відбувалося внаслідок руйнування металу по границях зерен. Під час розвитку тріщини відбувалося руйнування по границях аустенітних зерен та їх відокремлення від матриці. Біла наскрізної тріщини спостерігалася утворення мартенситу, що, імовірно, викликано пластичною деформацією під час вальцювання, навіть за кімнатної температури [7, 18] (рис. 6, в). Швидке поширення тріщин імовірно за перевищення температури 60 °С [7].

Дослідження методом сканувальної електронної мікроскопії. На поверхні зразка після експлуатації наявні локальні дефекти різного діаметру (до 20 мкм) з продуктами корозії у середині (рис. 7, а). На деяких ділянках конгломерати з кількох аустенітних зерен відокремлені один від одного, видно тріщини завдовжки 10...30 мкм (рис. 7, б, в). Поверхня зразка після зберігання не гладка, що обумовлено технологією виготовлення труб. Аустенітні зерна досить дрібні, а деякі зерна відокремлені від матриці (рис. 7, г, д).

Аналіз локального хімічного складу на поверхні зразка після експлуатації показав, що в пітінгах вміст хрому збільшився від 22,37 до 37,3 %, нікелю – зменшився від 4,36 до 5,36 % порівняно з вмістом цих елементів, визначеним по поверхні сумарно (20,07 та 7,48 % відповідно), вміст титану майже однаковий – 2,37 та 2,05 %. Вміст сірки та хлору достатньо високий: 7,52...11,78 % та 0,68...1,20 % відповідно (табл. 2).

Вміст елементів у локальних точках на поверхні зразка після зберігання (від 20,86 до 22,85 % хрому, від 7,10 до 8,88 % нікелю, від 1,40 до 1,15 % титану) мало відрізнявся від сумарного вмісту елементів, визначеного по поверхні (21,87 % хрому,

8,6 % нікелю, 1,43 % титану). Сірка та хлор не виявлені (табл. 2).

Таким чином, досліджені труби мають аустенітну структуру. Виявлено відокремлення аустенітних зерен одне від одного у зразку неексплуатованої труби, яке посилювалося на зразках експлуатованих труб, та вказувало на перебіг міжкристалічного руйнування поверхневого шару під час експлуатації за впливу продуктів нафтопереробки. Розвитку міжкристалічного руйнування за таких умов сприяла наявність сірки та хлору в локальних корозійних дефектах. У локальних пошкодженнях металу – пітінгах вміст нікелю становив 4,36...7,48 %, що значно менше, ніж на поверхні основного металу за результатами спектрального аналізу (10,5 %), а вміст хрому (20,07...37,3 %) – більше, ніж на поверхні основного металу (17,3 %), що, імовірно, сприяло збільшенню мікротвердості металу на поверхні. Вміст сірки (3,95...11,78 %) та хлору (0,68...1,20 %) на поверхні експлуатованих труб дозволяє припустити їх потрапляння з середовища та затримування в пітінгах. Це вказує на велику ймовірність перебігу локальної корозії: корозійного розтріскування (по границях аустенітних зерен і мартенситу) та пітінгової, що й спостерігали на зразках труб.

Висновки

Корозійне розтріскування розвальцьованих труб із нежавкої сталі 08X18H10T установки повітряного охолодження парів бензину та води за температур від 150 до 80 °С на нафтопереробному підприємстві відбулося в зоні переходу від розвальцьованої частини труби до нерозвальцьованої внаслідок дії чинників комплексного характеру. Розвитку корозійного розтріскування через пластичну деформацію під час вальцювання сприяло: утворення особливо чутливої до корозійного розтріскування структури мартенситу в області наскрізної тріщини; підвищена температура транспортованого вуглеводневого середовища (понад 80 °С); наявність сірки (3,95...11,78 %) та хлору (0,68...1,20 %) в пітінгах, що свідчить про її по-

трапляння з вуглеводневого середовища, та зменшення вмісту нікелю від 2,59 до 7,47 % порівняно з основним металом (10,5 %). Це викликало електрохімічну гетерогенність (різниця потенціалів між ділянками розвальцьованої та нерозвальцьованої внутрішньої поверхні зразка становила 0,087 В) та відмінності мікротвердості металу на нерозвальцьованій (356 HV) та розвальцьованій (405 HV) ділянках зразка труби після експлуатації. Поширення наскрізної тріщини та корозійні пошкодження з боку внутрішньої поверхні у вигляді сітки тріщин, розташованих впоперек осі труби, розвивалися за механізмом міжзеренного руйнування по границях зерен. Витікання середовища внаслідок корозійного розтріскування під впливом середовища та внутрішніх навантажень у простір між зовнішньою поверхнею труби та трубною решіткою викликало щільну корозію.

Список літератури

- BS EN 12502-4:2004 (2004) *Protection of metallic materials against corrosion. Guidance on the assessment of corrosion likelihood in water distribution and storage systems. Pt 4: Influencing factors for stainless steels*. London, British Standards Institution.
- Шрайер Л.Л. (ред.) (1981) *Коррозия: справочник*. Москва, Металлургия.
- ДСТУ 3830-98 (1998) *Коррозія металів і сплавів. Терміни та визначення основних понять*. Київ, Держстандарт України.
- Сокол И.Я., Ульянин Е.А., Фельдгандлер Э.Г. и др. (1989) *Структура и коррозия металлов и сплавов: атлас*. Москва, Металлургия.
- ASM International (1991) *ASM Handbook. Vol. 13: Corrosion*. Materials Park, OH: ASM International. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v13c.9781627081849>
- Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. (2010) *Коррозия и защита от коррозии*. Под ред. И.В. Семеновой. Москва, Физматлит.
- Vakili, M., Koutnik, P., Kohout, J., Gholami, Z. (2024) Analysis, assessment, and mitigation of stress corrosion cracking in austenitic stainless steels in the oil and gas sector: A review. *Surfaces*, 7(3), 589–642. DOI: <https://doi.org/10.3390/surfaces7030040>
- Almubarak, A., Belkharouch, M., Hussain, A. (2010) Stress corrosion cracking of sensitized austenitic stainless steels in Kuwait petroleum refineries. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 57(2), 58–64. DOI: <https://doi.org/10.1108/00035591011028014>
- Корозійне розтріскування під напругою*. <https://amariaua.com/korrozijnoe-rastreskivanie-pod-napryazheniem>
- Кайдриков Р.А., Виноградова С.С. (2010) Питтинговая коррозия металлов и многослойных систем (исследование, моделирование, прогнозирование, мониторинг). *Технология электрохимических производств*, 212–227.
- Енергетика: історія, сучасність і майбутнє*. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-1/part-2/section-8/8-2/8-2-1>
- Жук Н.П. (1976) *Курс теории коррозии и защиты металлов*. Москва, Металлургия.
- Герасименко А.А. (ред.) (1987) *Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений*. В 2 т. Т. 1. Москва, Машиностроение.
- Corrosion Related Accidents in Petroleum Refineries (2013) *Lessons learned from accidents in EU and OECD countries*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: <https://doi.org/10.2788/37909>
- Groysman, A. (2017) Corrosion problems and solutions in oil, gas, refining and petrochemical industry. *Koroze a ochrana materiálu*, 61(3), 100–117. DOI: <https://doi.org/10.1515/kom-2017-0013>
- Каховский Н.И. (1975) *Сварка высоколегированных сталей*. Киев, Техника.
- Розенфельд И.Л. (1969) *Коррозия и защита металлов*. Москва, Металлургия.
- Гуляев А.П. (1986) *Металловедение*. 6-е изд., перераб. и доп. Москва, Металлургия.

Reference

- BS EN 12502-4:2004 (2004) *Protection of metallic materials against corrosion. Guidance on the assessment of corrosion likelihood in water distribution and storage systems. Pt 4: Influencing factors for stainless steels*. London, British Standards Institution.
- Shraier, L.L. (red.) (1981) *Corrosion: A handbook*. Moskva, Metallurhiya [in Russian].
- DSTU 3830-98 (1998) *Corrosion of metals and alloys. Terms and definitions of basic concepts*. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
- Sokol, I.Ya., Ulyanin, E.A., Feldgandler, E.G. et al. (1989) *Structure and corrosion of metals and alloys: atlas*. Moskva, Metallurgiya [in Russian].
- ASM International (1991) *ASM Handbook. Vol. 13: Corrosion*. Materials Park, OH: ASM International. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v13c.9781627081849>
- Semenova, I.V., Florianovich, G.M. i Horoshilov, A.V. (2010) *Corrosion and corrosion protection*. Ed. by I.V. Semenova. Moskva, Fizmatlit [in Russian].
- Vakili, M., Koutnik, P., Kohout, J., Gholami, Z. (2024) Analysis, assessment, and mitigation of stress corrosion cracking in austenitic stainless steels in the oil and gas sector: A review. *Surfaces*, 7(3), 589–642. DOI: <https://doi.org/10.3390/surfaces7030040>
- Almubarak, A., Belkharouch, M., Hussain, A. (2010) Stress corrosion cracking of sensitized austenitic stainless steels in Kuwait petroleum refineries. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 57(2), 58–64. DOI: <https://doi.org/10.1108/00035591011028014>
- Stress corrosion cracking* [in Ukrainian]. <https://amariaua.com/korrozijnoe-rastreskivanie-pod-napryazheniem>
- Kajdrikov, R.A., Vinogradova, S.S. (2010) Pitting corrosion of metals and multilayer systems (research, modeling, forecasting, monitoring). *Tehnologiya elektrohimiicheskikh proizvodstv*, 212–227 [in Russian]. <https://cyberleninka.ru/article/n/pittingovaya-korroziya-metallov-i-mnogosloynnyh-sistem-issledovanie-modelirovanie-prognozirovanie-monitoring>
- Energy: history, present and future* [in Ukrainian]. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-1/part-2/section-8/8-2/8-2-1>
- Zhuk, N.P. (1976) *Course in the theory of corrosion and protection of metals*. Moskva, Metallurgiya [in Russian].
- Gerasimenko, A.A. (red.) (1987) *Protection against corrosion, aging, and biodeterioration of machines, equipment, and structures*. In 2 vol. Vol. 1. Moskva, Mashinostroenie [in Russian].
- Corrosion Related Accidents in Petroleum Refineries (2013) *Lessons learned from accidents in EU and OECD countries*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: <https://doi.org/10.2788/37909>
- Groysman, A. (2017) Corrosion problems and solutions in oil, gas, refining and petrochemical industry. *Koroze a ochrana materiálu*, 61(3), 100–117. DOI: <https://doi.org/10.1515/kom-2017-0013>
- Kahovskij, N.I. (1975) *Welding of high-alloy steels*. Kiev, Tehnika [in Russian].
- Rozenfeld, I.L. (1969) *Corrosion and protection of metals*. Moskva, Metallurgiya [in Russian].
- Gulyaev, A.P. (1986) *Metal science*. 6th ed., revised and enlarged. Moskva, Metallurgiya [in Russian].

DAMAGE OF STAINLESS ROLLED PIPES OF GASOLINE VAPOR COOLING UNITS IN OIL REFINERIES

S.O. Osadchuk, L.I. Nyrkova, L.V. Goncharenko, V.P. Yelahin, S.Yu. Kovalenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevykh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

The peculiarities of damage of stainless rolled pipes of gasoline vapor air cooling units at an oil refinery after 1 year of operation, which were detected on the boundary of transition from the rolled part of the pipe to the unrolled part, were investigated. Corrosion cracking occurred as a result of the combined effect of a hydrocarbon environment at elevated temperature (more than 80 °C) and the stressed state of the product caused by rolling. Optical microscopy showed that the pipe wall thickness was uneven. The propagation of a through crack and corrosion damage to the inner surface in the form of a network of cracks located transversely to the pipe axis developed by the mechanism of intergranular fracture. Scanning electron microscopy revealed the presence of sulfur and chlorine in pitting, which indicates its release from the hydrocarbon environment. A decrease in nickel content from 2.59 to 7.47 % compared to the base metal (10.5 %) was also found, which caused electrochemical heterogeneity and a difference in microhardness (the potential difference between the rolled and unrolled areas on the inner surface of the specimen was 0.087 V, microhardness was 405 HV and 356 HV, respectively). 18 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: stainless steel, gasoline vapor cooling plant, rolled pipes, internal corrosion, stress corrosion cracking

ORCID

С.О. Осадчук – <https://orcid.org/0009-0009-4968-4777>, Л.І. Ниркова – <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>,

Л.В. Гончаренко – <https://orcid.org/0009-0004-9820-5852>, В.П. Єлагін – <https://orcid.org/0000-0002-4335-5130>,

С.Ю. Коваленко – <https://orcid.org/0000-0001-5012-3437>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

С.О. Осадчук

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

E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.О. Осадчук, Л.І. Ниркова, Л.В. Гончаренко, В.П. Єлагін, С.Ю. Коваленко (2026) Пошкодження нержавіжких вальцьованих труб установки охолодження парів бензину нафтопереробного підприємства. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 01, 23–31. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.01.03>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 21.01.2026

Отримано у переглянутому вигляді 10.03.2026

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 23.04.2026



ПРИНЦИПИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ ВІДПОВІДАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ І ОБ'ЄКТІВ (Огляд)

В.Ю. Глуховський, О.С. Міленін

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

В огляді наведено комплексний аналіз фундаментальних принципів і сучасних технологій теплового контролю та термографічної діагностики відповідальних об'єктів і конструкцій. Особливу увагу приділено фізичному зв'язку між тепловими відгуками, термомеханічними процесами та механікою пошкоджень на різних масштабних рівнях. Систематично розглянуто пасивні, активні та гібридні термографічні підходи, а також проаналізовано їхні методологічні можливості, технічні обмеження та застосовність до матеріалів різних класів. Особливу увагу приділено сучасним досягненням у сфері цифрової обробки сигналів, числового моделювання та методів машинного навчання з акцентом на фізично інтерпретовані та гібридні підходи. Інтеграція термографії в системи моніторингу стану конструкцій і цифрових двійників визначається як ключовий напрям переходу до кількісної оцінки структурної цілісності та залишкового ресурсу. Визначено актуальні проблеми, пов'язані з оберненими задачами теплопровідності, впливом факторів навоколишнього середовища та кількісною оцінкою невизначеності, а також окреслено перспективні напрями подальших досліджень, спрямовані на перехід від якісної діагностики до прогнозного, фізично обгрунтованого моніторингу відповідальних конструкцій. Бібліогр. 61, табл. 3, рис. 14.

Ключові слова: інфрачервона термографія, тепловий неруйнівний контроль, моніторинг технічного стану, граничний стан, надійність, тепла аномалія

Вступ. Забезпечення структурної цілісності та надійності відповідальних конструкцій та об'єктів енергетики, транспорту, авіаційно-космічної техніки, оборонної інфраструктури та промислового устаткування є одним із ключових викликів сучасної інженерії. Характерна інтенсифікація експлуатаційних режимів, ускладнення конструкційних матеріалів, а також підвищені вимоги до безпечної довготривалої роботи критичної інфраструктури обумовлюють необхідність впровадження високоефективних методів неруйнівного контролю та моніторингу технічного стану. У цьому контексті термічні методи діагностики відіграють важливу роль, оскільки забезпечують можливість отримання просторово-часової інформації про теплові поля, дефектність і локальні зміни фізико-механічних властивостей, у тому числі, дистанційно.

За останні десятиліття тепла діагностика перейшла від застосування в окремих локальних технологічних операціях до статусу одного з базових інструментів системного моніторингу стану матеріалів, конструкцій і виробів різного призначення. Це стало можливим завдяки стрімкому розвитку інфрачервоної оптики, тепловізійних матриць, лазерних і мікрохвильових джерел теплового збудження, а також появи цифрових методів обробки теплових сигналів, включно з методами розв'язан-

ня обернених теплопровідних задач, байєсівської ідентифікації параметрів, машинного навчання та цифрових двійників. Практика показує, що інтеграція термоелектричних, терморадіаційних, активних імпульсних і фазових методів у комплексні системи діагностики суттєво підвищує чутливість до виявлення деградації матеріалу на ранніх стадіях, мікропошкодження, зміни теплопровідності, залишкових напружень і структурних градієнтів. Попри значний прогрес, сучасні тенденції розвитку відповідальних інженерних систем потребують узагальнення накопичених знань і формування цілісного уявлення про принципи теплового контролю, фізичні основи взаємодії теплового збудження з матеріалом, методи інтерпретації отриманої інформації в рамках міждисциплінарної задачі технічної діагностики. Також нагальною є систематизація новітніх підходів до виявлення та прогнозування несучої здатності відповідальних конструкцій і компонентів у режимі реального часу.

Метою цього огляду є узагальнення фундаментальних принципів термічного контролю та сучасних технологій теплової діагностики відповідальних конструкцій, аналіз їхнього розвитку, досягнутого рівня точності й обмежень, а також визначення перспективних напрямів подальших досліджень. Огляд спрямований на формування цілісної наукової бази, необхідної для подальшого розвитку високоточних протоколів діагностики, інтегрованих систем структурного стану та техно-

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

логії прогнозування залишкового ресурсу, що є важливим для гарантування безпеки та надійності сучасних інженерних об'єктів.

Термодеформаційні процеси в контексті надійності відповідальних об'єктів. У відповідальних конструкціях та інженерних системах термічний стан матеріалу є невід'ємною складовою його напружено-деформованого стану та безпосередньо впливає на механізми деформування та руйнування [1]. Інфрачервоне випромінювання, яке реєструється в процесі термографічного контролю, відображає не лише розподіл температури, а й інтегральний енергетичний стан матеріалу, що формується внаслідок взаємодії теплових і механічних процесів, а також структурних перетворень. У цьому сенсі термографічні дані можуть розглядатися як непрямий, але фізично обґрунтований індикатор розвитку механічних напружень, деградації, пошкоджуваності та наближення матеріалу до граничного стану.

З точки зору механіки деформування локальні теплові аномалії часто пов'язані з дисипативними процесами, які супроводжують пластичну деформацію та докритичне рівномірно розподілене пошкодження, таке як пористість в'язкого руйнування чи багатоосередкове розтріскування [2]. При деформуванні матеріалу механічна енергія частково дисипує у теплову внаслідок дії незворотних мікроструктурних механізмів, таких як: рух і взаємодія дислокацій, фазові перетворення,

в'язкопружне демпфування, тертя та накопичення пошкоджень (табл. 1) [3–8]. Інтенсивність цих процесів визначає співвідношення між енергією, що переходить у тепло, та енергією, яка зберігається в матеріалі у вигляді внутрішньої (накопиченої) енергії. Зокрема для більшості металів за умов розвиненої пластичної течії майже вся робота пластичного деформування перетворюється на теплову енергію, тоді як за низьких швидкостей деформування або на початкових стадіях навантаження істотна її частка акумулюється у вигляді мікроструктурних дефектів. У матеріалах із неоднорідною мікроструктурою такі процеси мають локалізований характер і проявляються у вигляді специфічних термічних зон (теплових аномалій), що корелюють з концентраторами напружень [9]. У процесі накопичення пошкоджень змінюється не лише напружено-деформований стан, а й теплофізичні та випромінювальні властивості матеріалу: зародження та розвиток несучільності матеріалу призводять до локальної зміни ефективних теплофізичних властивостей [10], що впливає на швидкість теплової релаксації та просторовий розподіл температур. В інфрачервоному діапазоні ці зміни проявляються у вигляді зростання теплового контрасту або фазових зсувів теплової відповіді, які можуть бути пов'язані з параметрами пошкоджуваності, що використовуються в континуальній механіці руйнування.

Таблиця 1. Механізми теплової дисипації механічної енергії в матеріалах різних класів

Матеріал	Превалюючий механізм дисипації енергії	Особливості дисипації енергії	Посилання
ГЦК метали	Рух дислокацій, двійникування	Майже вся енергія пластичного деформування переходить у теплову	[3]
Монокристалічна мідь	Зародження та рух дислокацій	За певних швидкостей деформування значна частина енергії акумулюється у вигляді енергії дислокацій	[4]
Перлітні сталі	Термопружність + пластичність + руйнування	Переважає частина (>93 %) переходить у теплову навіть за пошкодження матеріалу	[5]
Гумові композити	В'язкопружний гістерезис	Тепловиділення залежить від реологічних характеристик	[6]
Удар частинок (без тертя)	Об'ємна пластичність	Підвищення температури підповерхневих областей; нагрівання відбувається об'ємно	[7]
Металеве скло	Нерівномірна пластичність	Локалізоване нагрівання; частка пластичної роботи, що додається до нагрівання, залежить від швидкості деформування	[8]

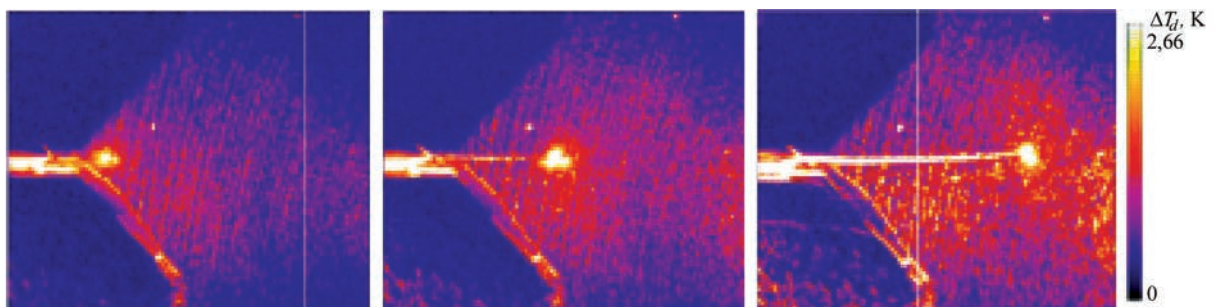


Рис. 1. Термічна аномалія біля вершини макроскопічної втомної тріщини на різних етапах її розвитку [11]

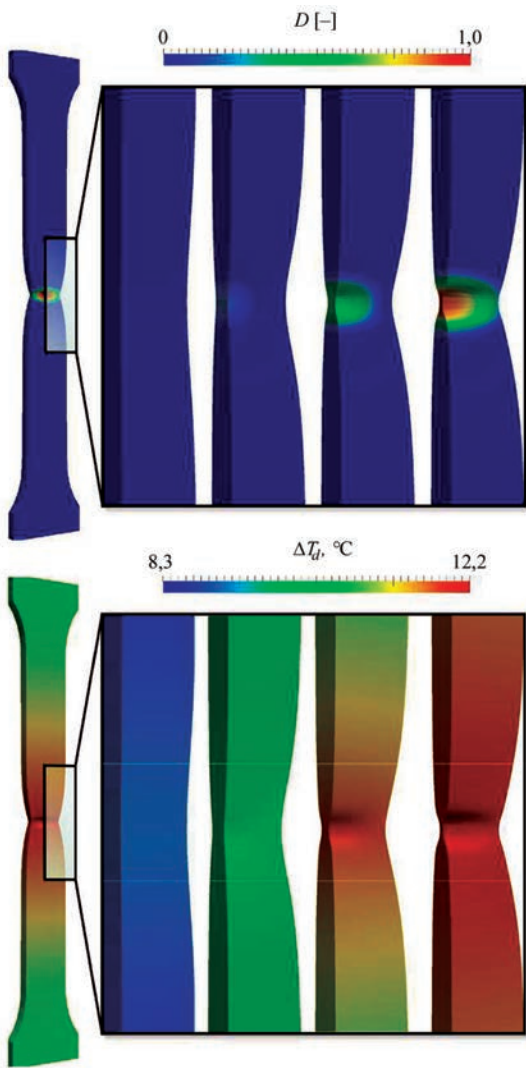


Рис. 2. Приклад результатів чисельного дослідження розвитку температурного стану та пошкодженості стандартного зразка при випробуванні на одновісний розтяг [12]

У рамках аналізу граничного стану інтерес становить кореляція між термографічними характеристиками та класичними критеріями руйнування. Відомо, що докритичні стани матеріалу супроводжуються зростанням інтенсивності дисипації енергії, локалізацією пластичної деформації, у тому числі, в області концентраторів напружень, та прискореним накопиченням пошкодженості. Такі процеси мають свій тепловий прояв як у макроскопічному (рис. 1) [11], так і в мезо-чи мікроскопічному масштабах деформування та руйнування (рис. 2) [12], що робить тепловий контроль чутливим при наближенні конструкції до границі несучої здатності. Таким чином, термографічні параметри можуть бути інтерпретовані як непрямі предиктори втрати стійкості або зародження макроскопічного пошкодження в матеріалах різних класів [13]. Для зварних конструкцій цей зв'язок є особливо важливим, оскільки зона термічного впливу та метал шва вирізняються підвищеною неоднорідністю напружень, хімічного та фазового складу. Тепловий контроль у таких зонах дозволяє не лише ідентифікувати типові поверхневі чи підповерхневі дефекти, як це показано на рис. 3 [14], але й виявляти локальні відхилення теплової відповіді в зонах із підвищеною схильністю до пошкодження, зокрема, в умовах циклічного навантаження [15].

З точки зору надійності конструкцій інфрачервоне випромінювання може розглядатися як індикатор зменшення запасу міцності та залишкового ресурсу. Теплові сигнали, пов'язані з дисипацією механічної енергії через пластичне деформування,

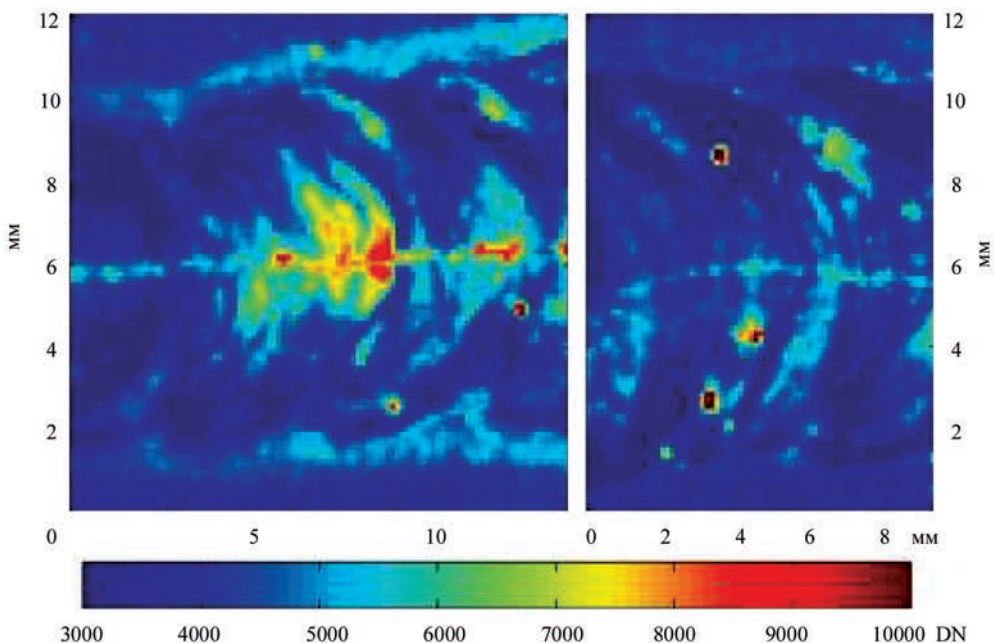


Рис. 3. Результати термографічних випробувань тріщин у сталевій пластині, отриманій MIG-зварюванням [14]

термопружними ефектами та змінами теплофізичних властивостей, відображають еволюцію внутрішнього стану матеріалу під дією експлуатаційних навантажень [16]. Інтеграція цих сигналів у моделі накопичення пошкоджень дозволяє перейти від якісної оцінки стану конструкції до кількісного прогнозування її довговічності. Таким чином, поєднання фізики інфрачервоного випромінювання з положеннями механіки деформування та руйнування створює методологічну основу для використання теплового контролю як інструменту оцінювання граничного стану відповідальних конструкцій. Наприклад, авторами [17] показано, що у бетоні моніторинг інфрачервоного випромінювання дозволяє виявляти локалізовані зони руйнування, що є індикаторами нестабільності при екстремальних навантаженнях. Аналогічним чином, комбіноване застосування засобів термографії та 3D-профілювання поверхні покриттів елементів мостових конструкцій є ефективними для моніторингу появи підповерхневих порожнин і розшарування на ранній стадії зародження [18]. Також термографія широко використовується при обстеженні будівель для виявлення теплових втрат чи пошкоджень ізоляції, які впливають на конструктивні характеристики й термін служби [19]. Таким чином, з позицій інженерної практики особливого значення набуває використання результатів термографічного контролю для прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Технології термографічного контролю. Перехід від регламентного до стан-орієнтованого та прогнозного обслуговування можливий лише за умови наявності надійних методів інтерпретації діагностичних даних і кількісної оцінки відповідних ризиків [20]. Ефективність і точність інстру-

ментального виявлення теплових аномалій залежить від двох аспектів, а саме, від конкретної методології термічної діагностики та технічної реалізації процесу діагностики. Так, методологія теплового неруйнівного контролю ґрунтується на керованому або спонтанному формуванні теплових полів у матеріалі та подальшій реєстрації їхньої просторово-часової кінетики за допомогою інфрачервоного випромінювання. Принципова відмінність між різними підходами полягає не стільки у способі реєстрації теплового сигналу, скільки у фізичному механізмі його збудження та інтерпретації. Саме ці аспекти визначають чутливість до виявлення дефектів різного типу та різного розташування, достовірність діагностичних висновків і сферу практичного застосування. Так, пасивна термографія базується на аналізі природних теплових полів, що виникають у конструкціях внаслідок експлуатаційних навантажень, внутрішніх джерел тепла або теплового обміну з навколишнім середовищем [21, 22]. Такий підхід є концептуально близьким до моніторингу технічного стану в реальному часі, оскільки не потребує зовнішнього втручання у роботу об'єкта. Фізично пасивна термографія відображає дисипативні процеси, пов'язані з пластичною деформацією, термопружними ефектами, втратами джоулевого тепла або локальними змінами теплообміну чи руйнуванням, як продемонстровано на прикладі виявлення дефектності матеріалу в процесі адитивного виробництва (рис. 4) [22]. Водночас інтерпретація отриманих даних ускладнюється як багатофакторністю теплових впливів, так і можливим неоднозначним відокремленням ефектів, зумовлених дефектністю чи деградацією матеріалу, від, наприклад, флуктуацій експлуатаційного режиму.

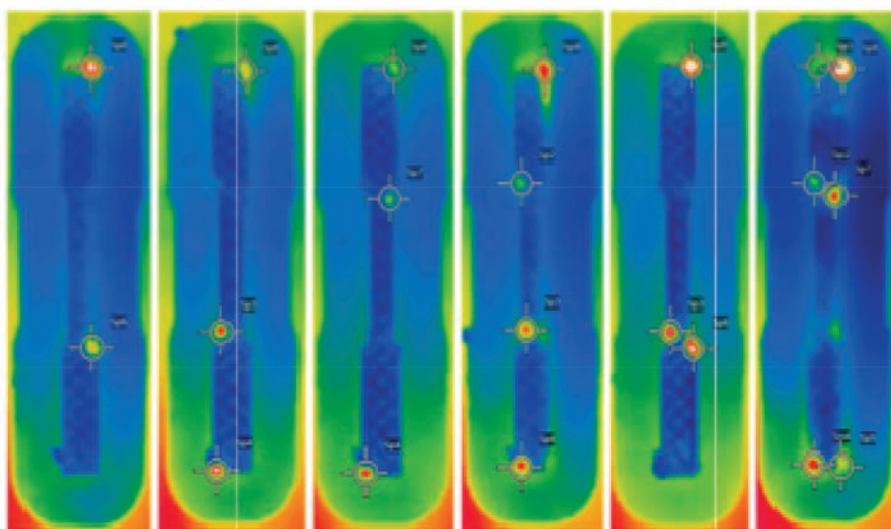


Рис. 4. Приклад температурних полів, які демонструють дефектність матеріалу конструкції у процесі її адитивного виробництва [22]

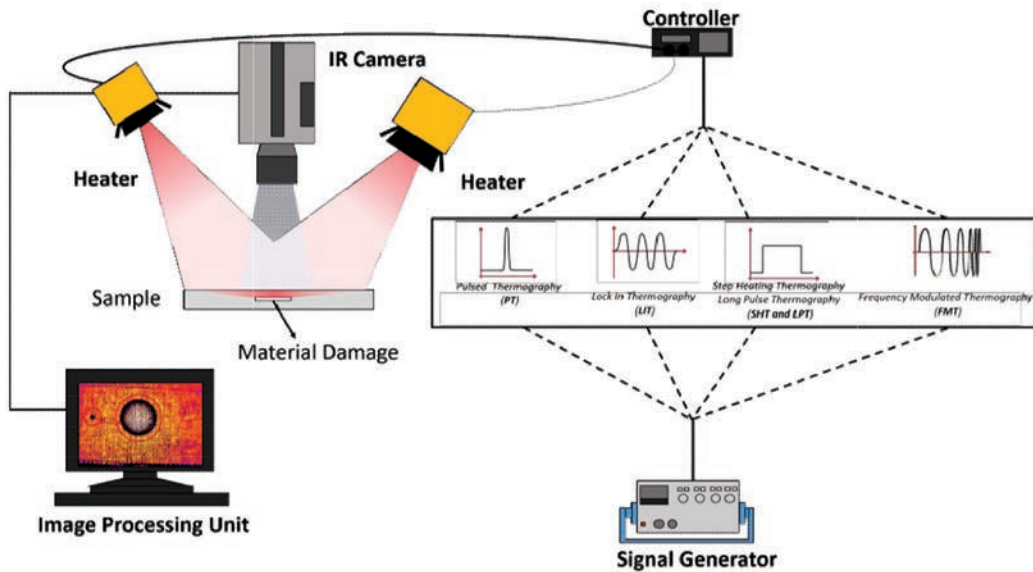


Рис. 5. Типова схема оптично стимульованої термографії з модульованим тепловим збудженням [28]

Активна термографія ґрунтується на цілеспрямованому тепловому збудженні матеріалу з подальшим аналізом його теплової відповіді [23–25]. У цьому випадку термічний контроль набуває характеру керованого фізичного експерименту, в якому параметри збудження задаються відповідно до очікуваних властивостей матеріалу та геометрії дефектів. Просторово-часовий розвиток температурного поля відображає теплофізичну неоднорідність об’єкта та дозволяє здійснювати якісну та кількісну інтерпретацію прихованих дефектів чи деградації експлуатаційних властивостей матеріалу, як продемонстровано на прикладі об’єктів відновлювальної енергетики та електротехнічної промисловості авторами [26]. Особливу роль тут відіграють методи, що використовують періодичне або модульоване теплове збудження, оскільки фазові характеристики теплової відповіді є менш чутливими до варіацій поверхневих властивостей та забезпечують вищу відтворюваність результатів [27]. Принципову схему термографічного контролю такого типу наведено на рис. 5 [28], приклад реалізації активного термографічного контролю з використанням ламп-спалахів – на рис. 6 [1].

Комбінована термографія передбачає інтеграцію пасивних і активних режимів у межах єдиного діагностичного циклу [29, 30]. Такий підхід дозволяє поєднати переваги безперервного моніторингу з керованою чутливістю активного збудження, що є особливо актуальним для відповідальних конструкцій зі змінними чи циклічними режимами навантаження, як показано авторами [31] на прикладі моніторингу стану лопатей вітрових турбін. З фізичної точки зору комбіновані методи відкривають можливість розділення теплових сигналів різної природи



Рис. 6. Приклад системи активного термографічного контролю з використанням двох ламп-спалахів [1]

та підвищують достовірність інтерпретації термографічних даних у складних експлуатаційних умовах. Узагальнене порівняння різних термографічних методологій наведено в табл. 2.

Другим аспектом ефективності інструментального виявлення теплових аномалій є його технічна реалізація, яка безпосередньо пов’язана з рівнем розвитку відповідної апаратури. Сучасні тепловізійні системи базуються на матричних детекторах з високою температурною чутливістю та широким динамічним діапазоном, що дозволяє реєструвати як слабкі теплові аномалії, так і швидкоплинні процеси теплової релаксації, що є характерними для технологічних процесів (рис. 7) [1]. Вимірювання просторового розподілу температури на поверхні об’єктів контролю виконують відповідні

Таблиця 2. Порівняння різних методологій термографічного контролю

Тип	Принцип	Переваги	Недоліки	Характерні приклади застосування	Посилання
Пасивна	Фіксує природні перепади температур; без наведеного нагрівання/охолодження	Проста, дешева, добре підходить для природно нагрітих об'єктів	Сильно залежить від умов навколишнього середовища	Контроль теплоізоляції, медичні огляди, контроль систем охолодження, розширення/руйнування бетону, адитивне виробництво	[21, 22]
Активна	Застосовує зовнішнє збудження (лампи-спалахи, галогенні лампи, лазери, ультразвук, вихрові струми, мікрохвилі) та контролює перехідні характеристики теплового стану	Краще охоплення глибини, локалізація, кількісна оцінка	Потребує відповідного збудження, міркувань безпеки та складнішої обробки	Виявлення дефектів у композитах, аерокосмічній галузі, залізобетоні, електроніці, об'єктах мистецької спадщини	[23–28]
Комбінована	Поєднання природних градієнтів температури з контрольованим нагріванням або охолодженням	Використання примусового охолодження/нагрівання або збудження разом із вдосконаленою обробкою сигналів (Фур'є, фазове, глибоке навчання) для кращого виявлення дефектів та автоматизації	Вимагає складнішого обладнання та узгодження даних різних типів	Покращена контрастність для виявлення витоків повітря, контроль цілісності композитів; моніторинг конструкції під дією циклічного навантаження, покращення роздільної здатності термічного контролю інших типів	[29–31]



Рис. 7. Приклад системи контролю технологічного процесу гібридного лазерно-дугового зварювання за допомогою термографічної камери [1]

ми тепловізійними системами (тепловізорами), які прийнято ділити на скануючі та матричні.

У скануючих тепловізійних системах перетворення розподілення температури на поверхні об'єкта $T(x,y)$ (1) у розподілення видимої яскравості на екрані монітора $B(x,y)$ (5) із забезпеченням пропорційності другого розподілення до першого здійснюється шляхом послідовного аналізу різних точок об'єкта миттєвим полем ΔS (4) оптичної системи тепловізора (3) за допомогою скануючого пристрою (2) (рис. 8, [33]). Приймач випромінювання реалізує розподілення не $T(x,y)$, а $B(x,y)$, яке складним чином пов'язане з температурою [34]. В інфрачервоному приймачі тепловізора розподілення $B(x,y)$ перетворюється в сигнал $S(t)$, який після підсилення та оброблення потрапляє на блок візуалізації (монітор), розгортка якого синхронізована зі скануванням при аналізі. Видиме зображення (тер-

мограма) отримується у вигляді поля яскравості $B(x,y)$, яке характеризує температурне поле об'єкта $T(x,y)$. Для забезпечення пропорційності між B та T у каналі обробки сигналу використовуються такі операції, як: лінеаризація, компенсація, порівняння з еталоном тощо. Тут важливим параметром тепловізійної системи є її температурна чутливість, або температурне розрізнення ΔT , яке визначають як температурний сигнал $\Delta T_{ш}$, що еквівалентний рівню власних шумів інфрачервоного приймача [35]. Для розгортки в мобільних скануючих тепловізорах застосовують внутрішнє механічне сканування за допомогою багатогранних заломлюючих призм або дзеркального багатогранного барабану для рядкової розгортки та плоского дзеркала для покадрової розгортки (рис. 9) [36].

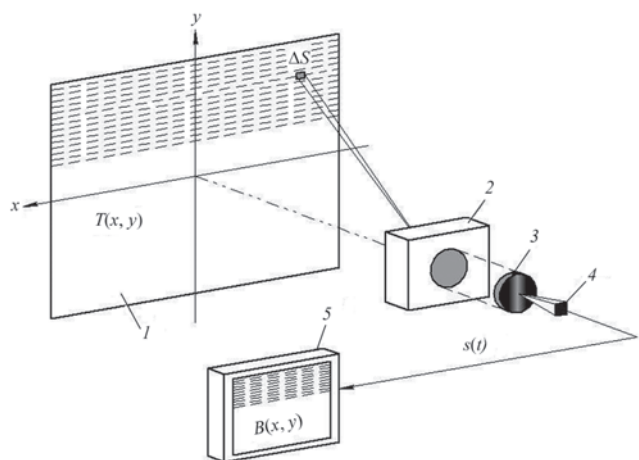


Рис. 8. Типова структурна схема тепловізора

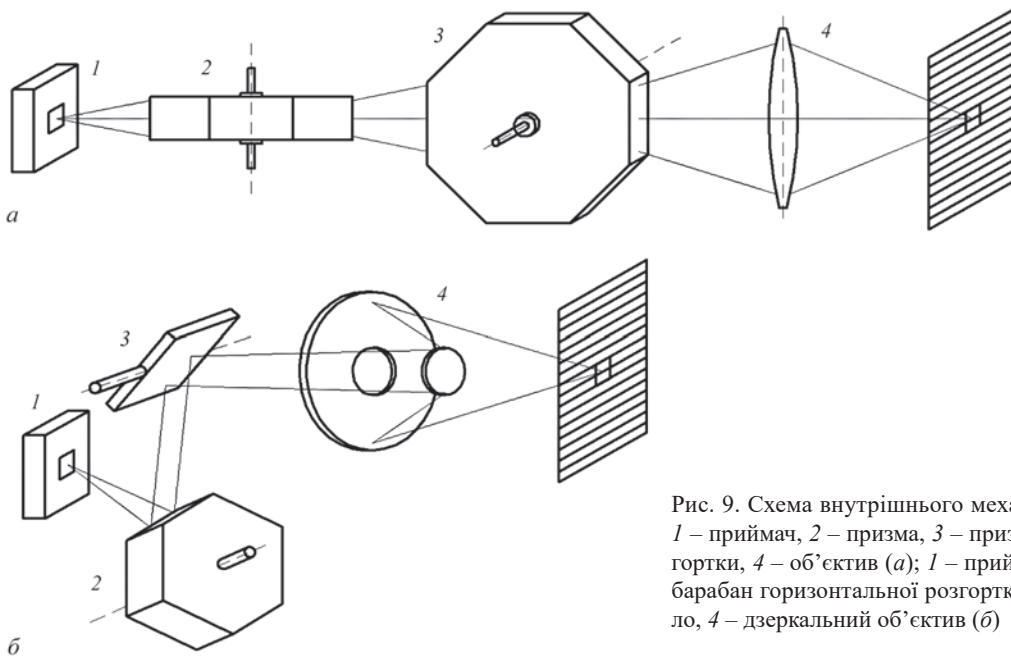


Рис. 9. Схема внутрішнього механічного сканування: 1 – приймач, 2 – призма, 3 – призма вертикальної розгортки, 4 – об’єктив (а); 1 – приймач, 2 – дзеркальний барабан горизонтальної розгортки, 3 – плоске дзеркало, 4 – дзеркальний об’єктив (б)

На практиці тепловізори також оснащуються системою запису та твердого копіювання термограм, системою транспортування, блоком автономного живлення [37]. У скануючих тепловізорах застосовуються охолоджувальні фотонні приймачі випромінювання.

Іншим видом тепловізійних систем є тепловізори на повноформатних матрицях (рис. 10). Такі системи основані на застосуванні багатоелементних приймачів випромінювання (матрицях), кількість елементів яких дозволяє сформувати повноформатний телевізійний кадр з високою просторовою роздільною здатністю. У тепловізійних системах даного типу відсутні механічні вузли сканування та їхні електродвигуни, що підвищує надійність, зменшує електроспоживання та габаритно-вагові параметри. Крім цього, це дозволяє підвищити чутливість сис-

теми: якщо в скануючих тепловізійних системах еквівалентна шуму різниця температур $\Delta T_{\text{ш}}$ складає 50...100 мК, то в матричних ~10 мК при температурі охолодження ~77 °К.

Розрізняють піроелектричні та мікроболометричні матриці. Піроелектричні матриці складаються з сенсорів, які базуються на піроелектричному ефекті – явищі, при якому зміна температури в піроелектричній кераміці призводить до спонтанної зміни поляризації та генерації заряду відповідно до зміни температури. Коли інфрачервоні промені потрапляють на датчик, температура поверхні піроелектричного елемента (кераміки) підвищується, і внаслідок піроелектричного ефекту генерується поверхневий заряд (рис. 11, а) [38].

У мікроболометричних матрицях чутливий елемент підтримується двома ніжками, що мають

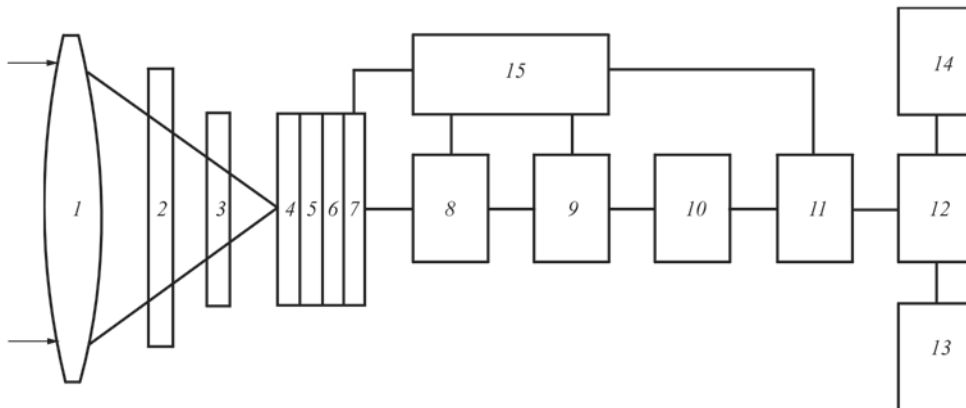


Рис. 10. Блок-схема типової тепловізійної камери з детектором ІЧ випромінювання матричного типу: 1 – об’єктив, 2 – поперечний затвор, 3 – фільтр, 4 – детекторна матриця, 5 – попередні підсилювачі, 6 – інтегратори, 7 – мультиплексор, 8 – аналоговий коректор, 9 – АЦП, 10 – цифровий коректор неоднорідності, 11 – коректор непрацюючих комірок, 12 – блок формування зображення, 13 – дисплей, 14 – цифровий вихід, 15 – тактовий генератор

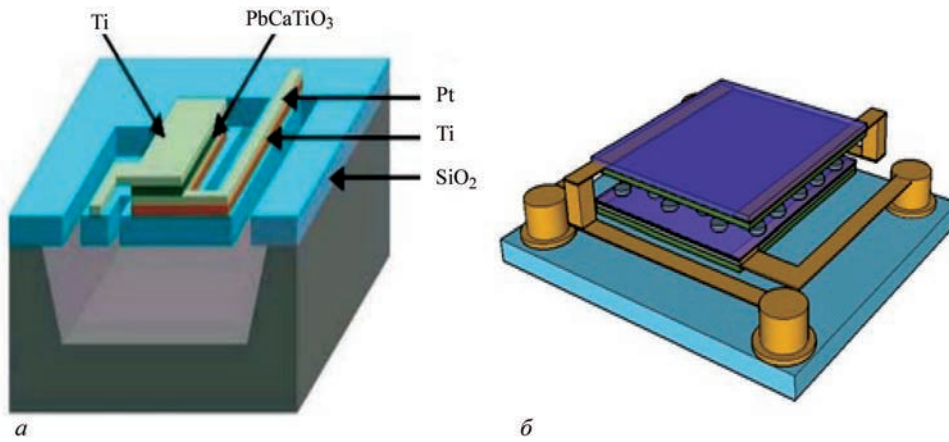


Рис. 11. Типові схеми сенсорів у тепловізійних матрицях: *а* – піроелектричний, *б* – мікроболометричний [38, 39]

вигляд тонкоплівкових стрічок (рис. 11, б) [39]. Розташування чутливого елемента на ніжках дозволяє сформувати під ним планарні електронні ключі, що спрощує комутацію матриці та підвищує коефіцієнт заповнення її приймальної площі. Висока теплоізоляція окремої болометричної комірки матриці від бази практично зменшує тепловий зв'язок між сусідніми комірками, що знижує їхній взаємний вплив і підвищує техніко-експлуатаційні характеристики мікроболометричних матриць у порівнянні з піроелектричними [40].

До інших характеристик тепловізорів прийнято відносити: діапазон температур вимірювання; автоматичну компенсацію зовнішніх факторів; робоче середовище (діапазон температур середовища, на який розрахований тепловізор); спектральний діапазон; спосіб охолодження інфрачервоного приймача; можливість запису; можливості обміну даними; сервісне обслуговування тощо. Для складних конструкцій з великою площею або обмеженим доступом актуальними є мобільні та дистанційні рішення. Таким чином, апаратна складова термічного контролю тісно пов'язана з методологічними обмеженнями та не може розглядатися ізольовано від фізичної інтерпретації сигналів.

Незважаючи на переваги термографічного неруйнівного контролю як швидкого, безконтактного та повнопольового методу, його застосування суттєво обмежується низкою фундаментальних і практичних чинників. Фізично термографія забезпечує переважно інформацію про стан поверхні об'єкта, а виявлення підповерхневих дефектів здійснюється опосередковано, що унеможливує надійну ідентифікацію глибоко розташованих або низько контрастних ушкоджень [28, 41, 42]. У свою чергу, глибина зондування та чутливість методу істотно залежать від теплофізичних властивостей матеріалу, зокрема теплопровідності, температуропровідності, товщини та анізотропії,

причому у високо теплопровідних металах і багатшарових структурах дифузія тепла призводить до «розмивання» термічного контрасту та зниження точності оцінювання дефектів [28]. Це підкреслює актуальність розробки сучасних високочутливих технологічних засобів термографічного контролю.

Ще одна принципова проблема використання термографії пов'язана з тим, що кількісне визначення геометричних параметрів дефектів пов'язане з розв'язанням обернених задач теплопровідності, які є математично некоректними та чутливими до шумів і модельних похибок, що обмежує відтворюваність результатів у практичних умовах [41]. Додаткові труднощі зумовлені високою чутливістю термографічних вимірювань до умов навколишнього середовища, а також до варіацій коефіцієнта випромінювання, стану поверхні та наявності покриттів, що може спричинити хибні індикації дефектів [41]. Крім того, застосування методу часто потребує високовартісного обладнання та складної післяобробки даних із використанням спеціалізованих алгоритмів, що підвищує вимоги до кваліфікації оператора та зумовлює суб'єктивність інтерпретації [41, 42]. У зв'язку з цим термографію часто розглядають як доповнюючий метод контролю у поєднанні з ультразвуковими, радіографічними або вихрострумовими підходами, а не як їх повноцінну альтернативу [42]. Перспективи розвитку термічного контролю пов'язані з переходом від емпіричних процедур і критеріїв до фізично обґрунтованих моделей, що поєднують квантово-радіаційні аспекти інфрачервоного випромінювання з механікою деформування і руйнування матеріалів [43].

Особливості обробки та аналізу термографічних даних. Цифрова обробка термографічних сигналів є важливою ланкою, що поєднує фізичні процеси теплоперенесення в матеріалі з практич-

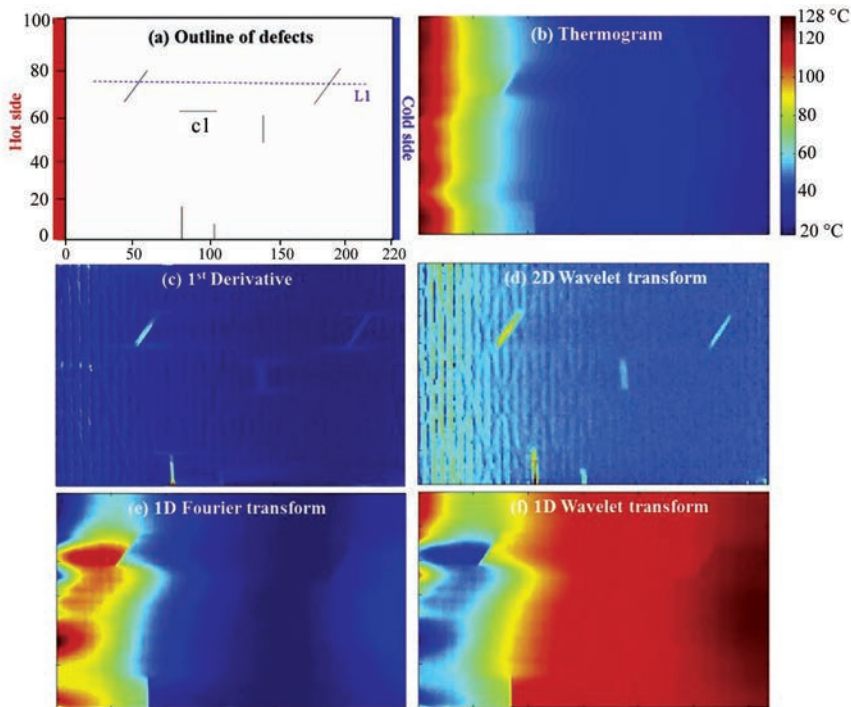


Рис. 12. Приклад обробки даних термографії дефектного зразка з вуглеволоконного матеріалу: контур положення дефектів (а), необроблена термограма (b), нормована перша похідна (c), двовимірне вейвлет-перетворення (d), одновимірне перетворення Фур'є (e), одновимірне вейвлет-перетворення (f) [45]

ною діагностикою його технічного стану. На відміну від первинної реєстрації інфрачервоного випромінювання, яка відображає інтегральну теплову реакцію об'єкта, цифрова обробка спрямована на використання відповідних фільтрів і виділення інформативних ознак, пов'язаних із мікро- та макронеоднорідністю конструкційних матеріалів, еволюцією напружено-деформованого стану та наближенням до граничного стану. Методи обробки термографічної інформації зазвичай класифікують на якісні та кількісні. Перші спрямовані на покращення візуальної інтерпретованості зображень шляхом підвищення контрастності, фільтрації шумів і просторового виділення аномалій, тоді як другі орієнтовані на розв'язання обернених задач теплопровідності, визначення геометричних параметрів дефектів і вилучення ефективних теплофізичних характеристик матеріалу під час інспекції інфраструктурних об'єктів [44].

Серед найпоширеніших алгоритмічних підходів домінують методи зниження розмірності та частотно-часового аналізу, зокрема: термографія головних і незалежних компонент, перетворення Фур'є та синхронні методи обробки, вейвлет-перетворення і просторові похідні, як це показано на характерному прикладі аналізу пошкодженої конструкції з композитного матеріалу (рис. 12) [45] та обробки термограми житлового будинку (рис. 13) [46]. Низка досліджень показала, що двовимірні похідні та двовимірні вейвлет-методи

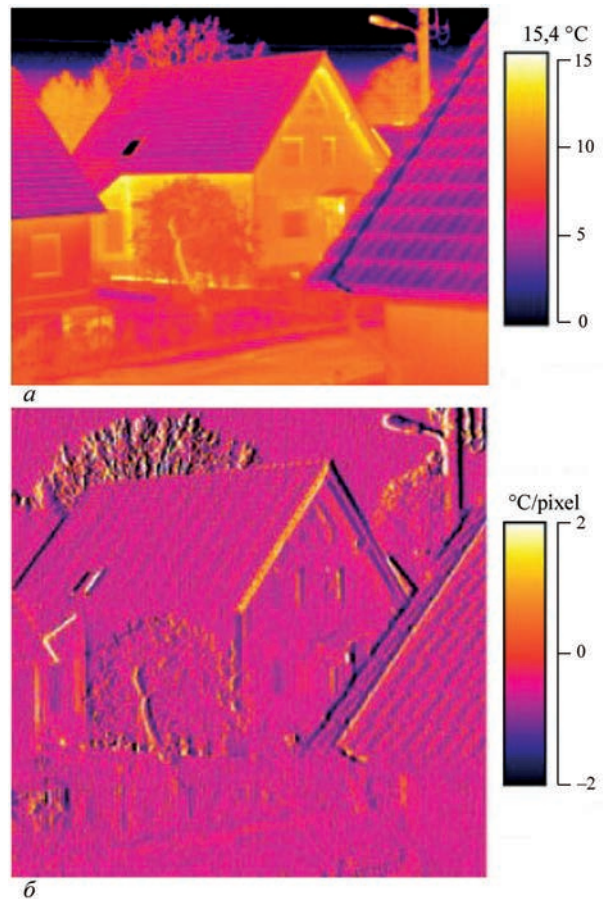


Рис. 13. Порівняння оригінального інфрачервоного зображення житлового будинку (а) та його похідної зображення у просторовій області вздовж горизонтальної координати [46]

є особливо ефективними для виявлення тріщин, тоді як одновимірні часові перетворення Фур'є та вейвлет-аналіз демонструють кращі результати під час ідентифікації зон розшарування та відшарування матеріалу [47].

Окрему групу методів обробки термографічних даних становлять фізично орієнтовані алгоритми, що поєднують реконструкцію термографічного сигналу, аналіз теплового контрасту, стиснення даних на основі законів теплопередачі та відстеження змін напрямку теплового потоку. Такі підходи дозволяють досягати значного ступеня редукції даних (до приблизно 99 %) за одночасного підвищення чіткості локалізації та оконтурювання дефектних зон [45].

Розвиток термографічного неруйнівного контролю на сучасному етапі дедалі більше пов'язується з використанням чисельного моделювання механіки деформування та руйнування, а також комп'ютерної симуляції як інструментів цифрової обробки термографічних сигналів і фізично обґрунтованої інтерпретації даних. Теплові аномалії, виявлені за допомогою алгоритмів обробки, можуть бути інтерпретовані як індикатори локальної дисипації енергії, розвитку пластичних зон (рис. 14) [2] або зародження тріщин [11]. Таким чином, цифрова обробка перестає бути суто математичною процедурою та набуває статусу інструменту фізично змістовної ідентифікації параметрів напружено-деформованого стану та пошкодженості матеріалу. У складних конструкційних системах тепловий сигнал, зафіксований тепловізійною апаратурою, є результатом взаємодії багатьох процесів, і пряме трактування термограм часто обмежується якісними висновками. Тут комп'ютерна симуляція відіграє важливу роль у формуванні так званих віртуальних експериментів, у межах яких аналізується чутливість термографічного методу до дефектів різного типу, розміру та глибини розташування під поверхнею конструкції. Такі симуляції дозволяють оптимізувати режими активного теплового збудження, па-

раметри реєстрації та алгоритми цифрової обробки ще на етапі проектування системи контролю. З методологічної точки зору це означає перехід від емпіричного налаштування до раціонального, фізично обґрунтованого вибору параметрів контролю, що є принципово важливим для відповідальних конструкцій [47]. Це дозволяє встановити причинно-наслідкові зв'язки між внутрішнім станом матеріалу та спостережуваною термічною відповіддю. Розв'язання нестационарних задач теплопровідності з урахуванням геометрії конструкції, граничних умов теплообміну та теплофізичної неоднорідності створює основу для кількісної інтерпретації термографічних даних. Тут особливо важливим є поєднання теплових моделей із механікою деформування та руйнування, оскільки локальні зони пластичної деформації, зародження та розвиток тріщин супроводжуються характерними тепловими ефектами, що можуть бути використані як індикатори пошкодженості [48].

Сучасні тенденції розвитку методів цифрової обробки сигналів пов'язані з поєднанням класичних алгоритмів із елементами машинного навчання та статистичного моделювання, методами штучного інтелекту (ШІ) [49]. Водночас для відповідальних конструкцій принципово важливо зберігати інтерпретованість результатів і їхній зв'язок із фізичними параметрами матеріалу. У цьому сенсі найперспективнішими є гібридні підходи, в яких цифрова обробка ґрунтується на фізичних моделях теплоперенесення та доповнюється адаптивними методами аналізу даних [50]. Саме така методологія створює передумови для використання термографії не лише як засобу виявлення дефектів, а й як елемента прогнозування надійності та оцінювання граничного стану конструкцій. Так, згорткові нейронні мережі є поширеним інструментом автоматизованого виявлення та сегментації дефектів у термографічних даних, зокрема для композитів, металів, бетонних конструкцій, об'єктів культурної спадщини тощо [51]. Для задач семантичної сегментації широко

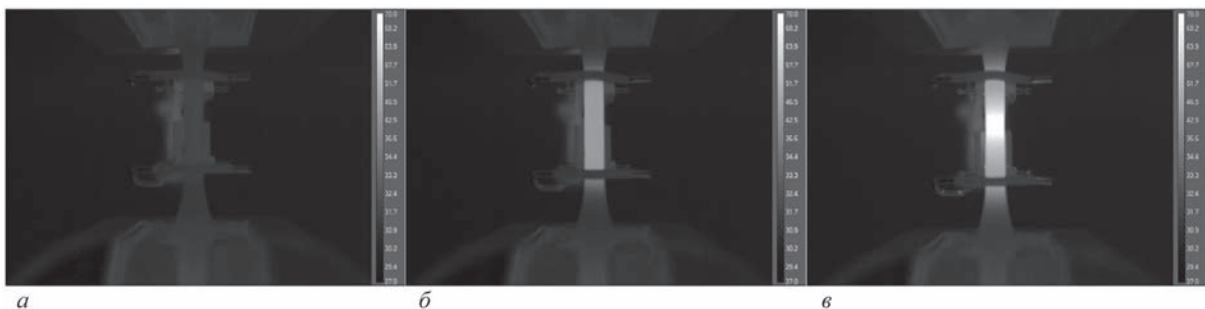


Рис. 14. Теплова відповідь стандартного зразка при випробуванні на одновісний розтяг на різних етапах деформування: пружного (а), пластичного (б), докритичного руйнування (в) [2]

застосовують архітектури типу U-Net та її модифікації, тоді як локалізація окремих дефектів реалізується за допомогою Mask-RCNN, YOLO та Faster-RCNN [52, 53]. Сучасні YOLO-орієнтовані підходи забезпечують точність понад 90 % за умов реального часу під час виявлення тріщин і розшарувань у бетоні та металах [53], а використання спеціалізованої попередньої обробки термограм істотно підвищує чутливість до глибинних і низькоконтрастних дефектів у пам'ятках мистецтва [54].

Методи попередньої обробки та підсилення виявлених ознак і теплових аномалій, зокрема: контрастні перетворення, термографічна реконструкція сигналу та головнокомпонентна термографія, залишаються важливими для підвищення інформативності даних [55, 56]. Поєднання класичних підходів із методами машинного навчання, а також застосування генеративних моделей для шумопригнічення та доповнення даних забезпечує подальше зростання точності виявлення та кількісної інтерпретації дефектів [54, 55].

Термографічні часові послідовності дедалі частіше використовують для кількісної характеристики дефектів і задач прогнозування, зокрема для оцінювання глибини пошкоджень і прогнозу моменту руйнування, що підтверджує перспективність інтеграції ШІ з методами неруйнівного контролю та моніторингу технічного стану [56, 57]. Узагальнення використання методів ШІ для термографічних досліджень наведено в табл. 3.

Таким чином, інтеграція чисельного моделювання, комп'ютерної симуляції та методів ШІ створює основу для переходу від діагностики стану до прогнозування надійності та працездатності конструкцій. Термографічні дані, інтерпретовані в межах моделей експлуатаційної деградації матеріалу, можуть бути безпосередньо пов'язані з еволюцією параметрів міцності, тріщиностійкості та довговічності. У цьому сенсі тепловий контроль стає джерелом вхідної інформації для моделей пошкодженості та оцінювання граничного стану, що є важливим елементом сучасних концепцій управління ресурсом.

Термографія як елемент систем моніторингу технічного стану. Інтеграція інфрачервоної термографії в системи моніторингу технічного стану та цифрові двійники інженерних конструкцій формує підґрунтя для прогнозування працездатності та оцінювання залишкового ресурсу на основі теплових індикаторів деградаційних процесів. У цьому контексті термографічний неруйнівний контроль поступово еволюціонує від допоміжного діагностичного інструмента до повноцінного елемента комплексної інженерної діагностики, орієнтованої на забезпечення довготривалої надійності та безпечної експлуатації відповідальних об'єктів.

Однією з ключових функцій термографії у межах моніторингу стану конструкцій є раннє виявлення несправностей і підтримка концепції технічного обслуговування протягом усього життєвого циклу. Аномальні температурні поля дають змогу ідентифікувати приховані дефекти в машинах, електротехнічних системах і конструкційних матеріалах ще до появи видимих пошкоджень або функціональних відмов, що забезпечує перехід до обслуговування за технічним станом і зменшує простої та експлуатаційні ризики. До об'єктів критичної інфраструктури, для яких такі підходи є найбільш затребуваними, належать: мости, будівлі, бетонні та залізобетонні конструкції, вітрові турбіни, залізнична інфраструктура, фотоелектричні електростанції та морські конструкційні компоненти [44].

Окремий напрям становить поєднання термографії з методами моніторингу конструкцій, заснованими на аналізі вібраційних характеристик. У таких системах інфрачервона термографія може виконувати функцію безконтактного сенсора для вібраційного моніторингу в складних або умовах обмеженої видимості, забезпечуючи відновлення параметрів конструкцій з похибкою на рівні кількох відсотків порівняно з традиційними акселерометричними вимірюваннями [58]. При цьому формування щільних просторових температурних полів у вигляді повних зображень створює додаткові можливості для локалізації пошкоджень на основі аналізу кривизни форм коливань [58].

Таблиця 3. Приклади застосування ШІ для задач термографічного контролю

Матеріали, технології	Роль ШІ при термографічному контролі	Посилання
Композитні матеріали	Виявлення ударного руйнування, пор, розшарування, глибини розташування дефектів	[55, 57]
Метали	Виявлення тріщин	[53]
Бетонні конструкції	Ідентифікація підповерхневого розшарування, створення цифрової інфраструктури будинків та споруд	[52]
Культурний спадок и предмети мистецтва	Дефекти кераміки, живопису, маркетрі	[51, 54]
Адитивне виробництво	Аналіз міцності та прогнозування руйнування	[56]

Термографія дедалі частіше розглядається як джерело даних для цифрових двійників, забезпечуючи відтворення теплових станів, раннє виявлення несправностей та багатомасштабний моніторинг технічного стану інженерних систем – від медичних пристроїв до мостів і міської інфраструктури [59]. Інтеграція інфрачервоних вимірювань у робочі процеси цифрових двійників істотно підвищує точність калібрування теплових моделей і достовірність прогнозування експлуатаційної поведінки, для низки застосувань перевищуючи 95 %. Порівняння вимірних і розрахункових теплових полів дозволяє своєчасно ідентифікувати аномальні та потенційно небезпечні стани в адитивному виробництві, електронних компонентах і термомеханічних системах [60]. Методологічно переважають гібридні підходи, що поєднують фізично обґрунтоване моделювання з керованими даними методами оптимізації та машинного навчання, забезпечуючи узгодження між розрахунковими й експериментальними даними та формування високоточних цифрових двійників [60]. Числові теплові моделі також використовують для генерації синтетичних термографічних даних з метою навчання алгоритмів виявлення дефектів в умовах обмеженої експериментальної бази [61].

Подальший розвиток термоорієнтованих цифрових двійників пов'язаний із потребою стандартизації робочих процесів, впровадження інтерпретованих алгоритмів обробки потоків теплових зображень у реальному часі та глибшої інтеграції з платформами Інтернету речей і міськими та енергетичними цифровими двійниками для реалізації багатомасштабного аналізу.

Висновки

1. Інфрачервона термографія є фізично обґрунтованим інструментом неруйнівної діагностики, який відображає не лише поверхневі температурні поля, а й енергетичний, термомеханічний та напружено-деформований стан матеріалів. Теплові сигнали корелюють із локалізацією пластичних зон, дисипацією механічної енергії та накопиченням пошкоджень, що робить термографію чутливим засобом для раннього виявлення докритичних станів конструкцій різних класів матеріалів.

2. Використання алгоритмів, що ґрунтуються на просторово-часовому аналізі, вейвлет-перетворення, головних і незалежних компонентах, а також реконструкції термографічного сигналу дозволяє підвищити чутливість до підповерхневих, низькоконтрастних дефектів і локальних аномалій. Цифрова обробка сигналів у поєднанні з комп'ютерним моделюванням теплоперенесення та меха-

ніки руйнування дає змогу кількісно оцінювати геометрію дефектів, локальні зміни теплофізичних властивостей і ступінь деградації матеріалу.

3. Поєднання термографії з чисельним моделюванням, фізично інтерпретованими моделями деформування та руйнування матеріалів, а також методами машинного навчання і гібридними підходами забезпечує перехід від якісної візуальної діагностики до кількісного прогнозування граничного стану, залишкового ресурсу та тріщиностійкості конструкцій. Використання архітектур нейронних мереж, таких як U-Net, Mask-RCNN, YOLO та їхніх модифікацій, дозволяє автоматизувати виявлення, локалізацію та сегментацію дефектів у реальному часі з високою точністю. Інтеграція алгоритмів попередньої обробки, контрастних перетворень і генеративних моделей для шумопригнічення суттєво підвищує чутливість до глибинних пошкоджень і низькоконтрастних аномалій.

4. Термографія дедалі частіше використовується як джерело даних для моніторингу конструкцій та цифрових двійників. Інтеграція теплових сигналів у цифрові моделі забезпечує високоточне калібрування, раннє виявлення несправностей та оцінку еволюції деградаційних процесів у матеріалах і компонентах. Це дозволяє реалізувати моніторинг життєвого циклу конструкцій, підвищуючи безпеку, надійність та економічну ефективність технічного обслуговування.

5. Незважаючи на переваги термографії як швидкого, безконтактного та повнопольового методу, її застосування обмежується фізичними та технологічними факторами. Подальший розвиток полягає у впровадженні фізично інтерпретованих, стандартизованих і масштабованих методологій, інтеграції з гібридними алгоритмами ШІ, реалістичним моделюванням і багатомасштабним аналізом для прогнозного моніторингу граничних станів відповідальних конструкцій і систем.

Список літератури/References

1. (2012) *Infrared Thermography*. Ed. by Raghu V. Prakash. Croatia: In tech. open.
2. Lap-Arparat, P., Tuchinda, K. (2024) Insights into deformation-induced heating: Temperature-strain prediction in SCM440 steel under deformation scenarios. *Heliyon*, 10(20), e39626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39626>
3. Xiong, Q.-L., Li, Z., Shimada, T., Kitamura, T. (2022) Atomistic investigation on the conversion of plastic work to heat in high-rate shear deformation. *Intern. J. of Plasticity*, 149, 103158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2021.103158>
4. Xiong, Q.-L., Li, Z., Shimada, T., Kitamura, T. (2021) Energy storage and dissipation of elastic-plastic deformation under shock compression: Simulation and analysis. *Mechanics of Materials*, 158, 103876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103876>

5. Wang, J., Ma, Z., Ding, G., Yang, R., Cai, S., Dai, L., Jiang, M., Lu, C. (2025) Energy dissipation in pearlitic steel under impact loading. *Acta Materialia*, **284**, 120599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120599>
6. Nie, S., Huang, W., Ren, P., Wang, X. (2025) Heat build-up of rubber in different deformation modes and its correlation to viscoelasticity. *Macro Molecular. Rapid Communications*, **46(23)**, e2400847. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.202400847>
7. Kisuka, F., Hare, C., Wu, C.-Y. (2024) Heat generation induced by plastic deformation during particle normal impact. *Intern. J. of Impact Engineering*, **184**, 104831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104831>
8. Sepulveda-Macias, M., Molnár, G., Tanguy, A. (2024) Thermo-mechanical dissipative behaviour of CuZr metallic glasses. *J. of Non-Crystalline Solids*, **636**, 123028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2024.123028>
9. Mahutov, N.A., Morozov, E.M., Gadenin, M.M., Reznikov, D.O., Yudina, O.N. (2023) Coupled thermo-mechanical analysis of stress-strain response and limit states of structural materials taking into account the cyclic properties of steel and stress concentration. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, **35**, 1535–1545. <https://doi.org/10.1007/s00161-022-01160-1>
10. Gabssi, N., Hamdi, E., Karrech, A. (2019) Coupled thermo-mechanical behavior of weakening geo-materials. *Geotechnical and Geological Engineering*, **37**, 2675–2692. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-018-00786-w>
11. Palumbo, D., De Finis, R., Ancona, F., Galietti, U. (2017) Damage monitoring in fracture mechanics by evaluation of the heat dissipated in the cyclic plastic zone ahead of the crack tip with thermal measurements. *Engineering Fracture Mechanics*, **181**, 65–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.06.017>
12. Felder, S., Kopic-Osmanovic, N., Holthusen, H., Brepols, T., Reese, S. (2022) Thermo-mechanically coupled gradient-extended damage-plasticity modeling of metallic materials at finite strains. *Intern. J. of Plasticity*, **148**, 103142. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2021.103142>
13. Dascalu, C., Gbetchi, K. (2019) Dynamic evolution of damage by microcracking with heat dissipation. *Intern. J. of Solids and Structures*, **174–175**, 128–144. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.05.026>
14. Broberg, P. (2013) Surface crack detection in welds using thermography. *NDT&E Intern.*, **57**, 69–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.03.008>
15. Fan, J., Zhao, Y. (2022) Quantitative thermography for fatigue damage assessment and life prediction of welded components. *Mechanics of Materials*, **164**, 104120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.104120>
16. Shrestha, P., Avci, O., Rifai, S., Abia, F., Seek, M., Barth, K. et al. (2025) A review of infrared thermography applications for civil infrastructure. *Structural Durability Health Monitoring*, **19(2)**, 193–231. DOI: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2024.049530>
17. Yin, S., Li, Z., Wang, E., Li, X., Tian, H., Niu, Y. (2024) Infrared temperature evolution law and thermal effect mechanism of concrete impact failure. *J. of Building Engineering*, **91**, 109592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109592>
18. Yamashita, M., Kawanishi, K., Hashizume, K., Chun, P.-J. (2025) Infrared thermography and 3D pavement surface unevenness measurement algorithm for damage assessment of concrete bridge decks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **40(19)**, 2769–2986. DOI: <https://doi.org/10.1111/micc.13406>
19. Ficapal, A., Mutis, I. (2019) Framework for the detection, diagnosis, and evaluation of thermal bridges using infrared thermography and unmanned aerial vehicles. *Buildings*, **9(8)**, 179. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings9080179>
20. Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V., Mrozek, D. (2023) From corrective to predictive maintenance – A review of maintenance approaches for the power industry. *Sensors*, **23**, 5970. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23135970>
21. Budzier, H., Gerlach, G. (2019) Passive thermography, thermal imaging. In: *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation*. Eds by N. Ida, N. Meyendorf. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-26553-7_12
22. Abouel Nour, Y., Gupta, N. (2023) Assisted defect detection by in-process monitoring of additive manufacturing using optical imaging and infrared thermography. *Additive Manufacturing*, **67**, 103483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103483>
23. Fox, M., Coley, D., Goodhew, S., de Wilde, P. (2014) Thermography methodologies for detecting energy related building defects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40**, 296–310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>
24. Budzier, H., Gerlach, G. (2018) Active thermography. In: *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation*. Eds by N. Ida, N. Meyendorf. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30050-4_13-1
25. Khathyri, F., Abouelanouar, B., Elkihel, A., Berrehili, A.M. (2021). Monitoring of industrial equipment using thermography technique in passive and active form. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy Systems. ICEERE 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Eds by D. Hajji, A. Mellit, G. Marco Tina, A. Rabhi, J. Launay, S. Naimi, Vol. 681. Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-6259-4_12
26. Zhao, X., Zhao, Y., Hu, S., Wang, H., Zhang, Y., Ming, W. (2023) Progress in active infrared imaging for defect detection in the renewable and electronic industries. *Sensors*, **23(21)**, 8780. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23218780>
27. Qu, Z., Jiang, P., Zhang, W. (2020) Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques. *Sensors*, **20(14)**, 3851. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20143851>
28. Ciampa, F., Mahmoodi, P., Pinto, F., Meo, M. (2018) Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components. *Sensors*, **18(2)**, 609. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18020609>
29. Hwang, S., An, Y.-K., Kim, J.-M., Sohn, H. (2019) Monitoring and instantaneous evaluation of fatigue crack using integrated passive and active laser thermography. *Optics and Lasers in Engineering*, **119**, 9–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.02.001>
30. Sfarra, S., Marcucci, E., Ambrosini, D., Paoletti, D. (2016) Infrared exploration of the architectural heritage: From passive infrared thermography to hybrid infrared thermography (HIRT) approach. *Materiales de Construcción*, **66(323)**, e094. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2016.07415>
31. Sanati, H., Wood, D., Sun, Q. (2018) Condition monitoring of wind turbine blades using active and passive thermography. *Applied Sciences*, **8(10)**, 2004. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8102004>
32. Janeliukstis, R., Baranovskis, D., Katunin, A., Zorin, I., Burgholzer, P., Lopes, H., Dragan, K., Rucevskis, S., Gaile, L., Xiao Chen (2025) Nondestructive evaluation of barely visible impact damage in composite structures – A review. *Composite Structures*, **373**, 119661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.119661>
33. Ciupa, R., Rogalski, A. (1997) Performance limitations of photon and thermal infrared detectors. *Opto-Electronic Review*, **5(4)**, 257–266.
34. Rogalski, A., Martyniuk, P., Kopytko, M., Hu, W. (2021) Trends in performance limits of the hot infrared photodetectors. *Applied Sciences*, **11(2)**, 501. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11020501>
35. Glukhovskiy, V.Yu., Bondarenko, O.G. (2019) Features of diagnostics of technical condition of industrial flue pipes by passive thermal imaging method. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **3**, 36–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2019.03.06>
36. Xavier, P.V. Maldague (2001) *Theory and Practice of Infrared Technology of Nondestructive Testing*. John Wiley and Sons Inc.
37. Deshayes, Y., Béchou, L. (2016) State-of-the-art of infrared technology. Reliability. In: *Robustness and Failure Mechanisms of LED Devices*, pp. 1–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-152-9.50001-8>
38. Chang, C.C., Chu, K.P., Lai, Y.C. (2005) The characterization and fabrication of pyroelectric infrared sensor. *Electrical Engineering*, **8(3)**, 2508. DOI: <https://doi.org/10.6180/jase.2005.8.3.04>

39. Abdullah, A., Koppula, A., Alkorjia, O. et al. (2023) Uncooled two-microbolometer stack for long wavelength infrared detection. *Scientific Reports*, **13**, 3470. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30328-1>
40. Nazdrowicz, J., Szermer, M., Maj, C., Zabierowski, W., Napieralski, A. (2016) Comparative study on various microbolometer structures. *Intern. J. of Microelectronics and Computer Science*, **7**(1), 16–25.
41. Zhu, J., Mao, Z., Wu, D. et al. (2022) Progress and trends in non-destructive testing for thermal barrier coatings based on infrared thermography: A review. *J. Nondestruct. Eval.*, **41**, 49. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-022-00880-3>
42. Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., Bulnes, F.G. (2014) Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, **14**(7), 12305–12348. DOI: <https://doi.org/10.3390/s140712305>
43. Branković, D.Lj., Milovanović, Z.N., Janičić Milovanović, V. (2024) Influence of condition diagnostics models on the reliability of industrial production systems: A critical review. In: *Developments in Reliability Engineering. Advances in Reliability Science*, 327–383. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13242-1.00001-1>
44. Garrido, I., Lagüela, S., Otero, R., Arias, P. (2020) Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review. Post-processing procedures. *Applied Energy*, **266**, 114857. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114857>
45. Chrysafi, A.P., Athanasopoulos, N., Siakavellas, N.J. (2017) Damage detection on composite materials with active thermography and digital image processing. *Intern. J. of Thermal Sciences*, **116**, 242–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.02.017>
46. Vollmer, M., Möllmann, K.-P. (2018) *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
47. Galietti, U., Palumbo, D. (2019) Thermal methods for damage evaluation of metallic materials. *Metals*, **9**, 1204. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9111204>
48. Zalameda, J., Winfree, W. (2018) Detection and characterization of damage in quasi-static loaded composite structures using passive thermography. *Sensors*, **18**(10), 3562. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18103562>
49. Abdulridha, A.A., Alzubaidi, L., Alver, N. (2026) Integration of artificial intelligence techniques with infrared thermography for defect detection in concrete structures: A systematic review. *Measurement*, **267**, 120491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.120491>
50. Corsaro, L., Curà, F., Sesana, R. (2025) Non-destructive methodology for the evaluation of residual stresses by using active infrared thermography measurements. *NDT&E Intern.*, **155**, 103435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compotech.2024.110759>
51. Chen, T.-Y., Huang, Y.-Y., Chu, Y.-C., Chen S.-L., Chen, X.-Y., Wu, P.-C. (2024) Artificial intelligence system combining with infrared thermography and visible image for abnormal temperature detection and floor material identification. *IEEE Sensors J.*, **24**(24), 42181–42194. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3439362>
52. Pozzer, S., Ramos, G., Nooralishahi, P., Rezazadeh Azar, E., El Refai, A., López, F., Ibarra-Castanedo, C., Maldague, X. (2025) Integration of thermographic inspection data with BIM for enhanced concrete infrastructure assessment. *Automation in Construction*, **171**, 105965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.105965>
53. Helvig, K., Trouvé-Peloux, P., Gaverina, L., Abeloos, B., Roche, J.M. (2025) Automated crack detection on metallic materials with flying-spot thermography using deep learning and progressive training. *Quantitative InfraRed Thermography J.*, **22**(1), 21–40. DOI: <https://doi.org/10.1080/17686733.2023.2266176>
54. Liu, Y., Wang, F., Jiang, Z., Sfarra S., Liu, K., Yao, Y. (2023) Generative deep learning-based thermographic inspection of artwork. *Sensors*, **23**(14), 6362. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23146362>
55. Moskovchenko, A., Svantner, M. (2023) Thermographic data processing and feature extraction approaches for machine learning-based defect detection. *Engineering Proceedings*, **51**(1), 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2023051005>
56. Boiko, D.A., Korabelnikova, V.A., Gordeev, E.G. et al. (2022) Integration of thermal imaging and neural networks for mechanical strength analysis and fracture prediction in 3D-printed plastic parts. *Scientific Reports*, **12**, 8944. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12503-y>
57. Daghigh, V., Bakhtiari Ramezani, S., Daghigh, H., Lacy Jr., T.E. (2024) Explainable artificial intelligence prediction of defect characterization in composite materials. *Composites Science and Technology*, **256**, 110759. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compotech.2024.110759>
58. He, J.-H., Liu, D.-P., Chung, C.-H., Huang, H.-H. (2020) Infrared thermography measurement for vibration-based structural health monitoring in low-visibility harsh environments. *Sensors*, **20**(24), 7067. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247067>
59. Araque, J.G., Angel, L., Viola, J., Chen, Y. (2024) Digital twin-enabled modelling of a multivariable temperature uniformity control system. *Electronics*, **13**(8), 1419. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13081419>
60. Gaikwad, A., Yavari, R., Montazeri, M., Cole, K., Bian, L., Rao, P. (2020) Toward the digital twin of additive manufacturing: Integrating thermal simulations, sensing, and analytics to detect process faults. *IIEE Transactions*, **52**(11), 1204–1217. DOI: <https://doi.org/10.1080/24725854.2019.1701753>
61. Liu, H., Tinsley, L., Lam, W., Addepalli, S., Liu, X., Starr, A., Zhao, Y. (2020) A novel inspection technique for electronic components using thermography (NITECT). *Sensors*, **20**(17), 5013. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20175013>

PRINCIPLES AND TECHNOLOGIES OF THERMAL CONTROL AND DIAGNOSTICS OF CRITICAL STRUCTURES AND FACILITIES (Review)

V.Iu. Glukhovskiy, O.S. Milenin

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

E-mail: glukhovskyy@gmail.com

The paper presents a complex analysis of fundamental principles and modern technologies of thermal control and thermographic diagnostics of critical facilities and structures. Special attention was paid to physical relationships between thermal responses, thermomechanical processes and damage mechanics at different scale levels. The passive, active and hybrid thermographic approaches were systematically considered, and their methodological capabilities, technical limitations and applicability for different material classes were analyzed. Special attention was given to current achievements in the sphere of digital processing of signals, numerical modeling and machine learning methods with a focus on physically interpreted and hybrid approaches. Integration of thermography into the systems of monitoring the state of the structures and digital twins is defined as a key direction of transition to quantitative evaluation of structural integrity and residual service life. Urgent problems were determined, which are related to inverse heat conduction problems, influence of environmental factors and quantitative assessment of uncertainty, and promising directions of further studies were outlined, aimed at transition from qualitative diagnostics to prognostic physically substantiated monitoring of critical structures. Ref. 61, Tabl. 3, Fig. 14.

Keywords: infrared thermography, thermal nondestructive testing, technical condition monitoring, limit state, reliability, thermal anomaly

ORCID

Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Глуховський В.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-1969-495X>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

В.Ю. Глуховський

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

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

В.Ю. Глуховський, О.С. Міленін (2026) Принципи та технології теплового контролю та діагностики відповідальних конструкцій і об'єктів (Огляд). *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 01, 32–46.

DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.01.04>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 04.02.2026

Отримано у переглянутому вигляді 09.03.2026

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 23.04.2026

XXIV МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2026

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ



МЕТАЛООБРОБКА



УКРЗВАРЮВАННЯ



УКРВТОРЕХ



ГІДРАВЛІКА
ПНЕВМАТИКА



ПІДШИПНИКИ



УКРЛИТВО



АВТОМАТИЗАЦІЯ
І РОБОТОТЕХНІКА



БЕЗПЕКА
ВИРОБНИЦТВА



ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ
ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ



ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНЕ
СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ



ІНДУСТРІАЛЬНІ
ПАРКИ



Генеральний
інформаційний партнер:

**ОБЛАДНАННЯ
ІНСТРУМЕНТИ**

**26–28
травня**

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ СИГНАЛІВ ПРИ КОНТРОЛІ ТРУБ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ ДИФРАКЦІЙНО-ЧАСОВИМ МЕТОДОМ

С.М. Глабець¹, В.С. Єременко¹, Ю.В. Куц^{1,2}

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: s.glabets@gmail.com

²Інститут загальної енергетики НАН України. 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 172. E-mail: y.kuts@ukr.net

У статті наведено результати аналізу підповерхневого та донного сигналів при контролі дифракційно-часовим методом (ДЧМ) товстостінних труб, виготовлених із поліетилену високої щільності. Експериментальні сигнали отримувались за допомогою ультразвукового дефектоскопа OmniScan SX. Дослідження обвідної і фази сигналів виконано в середовищі MatLab. Показано, що обвідна та частота прийнятих сигналів, зокрема підповерхневого та донного, суттєво відрізняються від номінальних значень відповідних характеристик сигналів збудження п'єзоперетворювачів, що необхідно враховувати під час проведення та інтерпретації результатів контролю, а також при пошуку та обґрунтуванні нових діагностичних ознак. Бібліогр. 19, рис. 8.

Ключові слова: ультразвуковий неруйнівний контроль, дифракційно-часовий метод, зварне з'єднання поліетиленових труб

Вступ. Одним із передових методів ультразвукового контролю (УЗК) є дифракційно-часовий метод (ДЧМ, відомий в англійській літературі як ToFD – Time of Flight Diffraction) [1]. Цей метод розроблений у 1970-х роках у Великобританії під керівництвом доктора Моріса Сілка (Dr. Maurice Silk,) і спершу випробовувався як експериментальна технологія визначення розміру вертикальних тріщин у сталевих виробках [1]. Згодом, завдяки високій чутливості та продуктивності, цей метод був апробований як інструмент пошуку та оцінювання розмірів дефектів у зварних з'єднаннях товстостінних сталевих виробів [2].

В основі ДЧМ лежить явище дифракції різних типів ультразвукових хвиль на краях дефектів об'єкта контролю (ОК). Для збудження та реєстрації ультразвукових коливань використовують пару ультразвукових похилих п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) поздовжніх хвиль з широкою діаграмою направленості, розташованих на поверхні ОК на фіксованій відстані по різні сторони зварного з'єднання [3]. Класичний приклад розташування ПЕП для контролю стикового зварного з'єднання з використанням ДЧМ надано на рис. 1, де перший з двох ПЕП (випромінювач) спрямовує ультразвукову хвилю в ОК, другий ПЕП (приймач) реєструє всі ультразвукові хвилі в контрольованій ділянці. Для ДЧМ використовують ПЕП з малим діаметром п'єзопластини для забезпечення широкої діаграми направленості, високодемпфовані –

для генерації коротких імпульсів (орієнтовно 1,5 періоду сигналу-носія) [4].

У загальному випадку на приймальному ПЕП отримують послідовно чотири рознесені в часі сигнали, схематичне зображення яких представлено на рис. 2.

Вказаним позначенням на рис. 2 відповідають наступні сигнали [5]: 1 – сигнал від підповерхневої поздовжньої хвилі; 2 – сигнал дифракційної хвилі від верхньої кромки тріщини; за типом ця хвиля є поздовжньою, циркулярною, затримана відносно сигналу 1 на інтервал часу t_1 ; 3 – сигнал дифракційної хвилі від нижньої кромки тріщини, за типом ця хвиля також є поздовжньою, цирку-

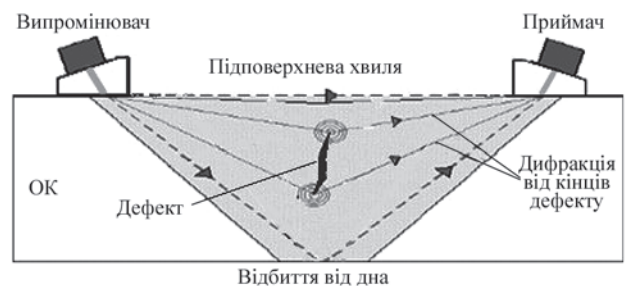


Рис. 1. Схема контролю зварного з'єднання за використанням ДЧМ

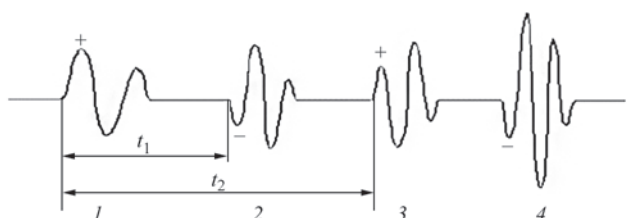


Рис. 2. Схематичний часовий ряд (А-скан розгортка) сигналів ДЧМ

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

лярною, затриманою відносно сигналу один на інтервал часу t_2 ; 4 – сигнал, що відповідає віддзеркаленій від донної поверхні ОК хвилі.

Характерною особливістю часового ряду сигналів ДЧМ є інвертування їхньої фази (на рис. 2 ця зміна позначена символами «+» та «-»), що дає змогу використати тест на інверсію фази для ідентифікації дифрагованих сигналів. Наявність дифракційних сигналів 2 і 3 (рис. 2) свідчить про наявність несуттєвості матеріалу на ділянці. Головними інформаційними характеристиками методу є часові інтервали t_1 та t_2 . Оскільки ДЧМ передбачає оцінювання розмірів тріщини за цими часовими інтервалами, амплітуда відбитих сигналів та просторова орієнтація дефекту не мають настільки критичного впливу на результат контролю, як у традиційному луно-імпульсному методі [6].

Переваги ДЧМ широко представлені в літературі, найсуттєвішими з яких є наступні:

- здатність виявляти дефекти різної орієнтації, а не переважно перпендикулярні до променя, як у луно-імпульсному методі [7];
- ефективне виявлення дефектів зі складною геометрією та грубою поверхнею [8];
- інверсія фази дифрагованого сигналу від верхньої та нижньої кромки тріщини, що полегшує їх розпізнавання та вимірювання розмірів [9];
- висока чутливість до дефектів з низькою відбивною здатністю, як у сталевих, так і у поліетиленових зварних з'єднаннях [10].

Разом з тим ДЧМ притаманні певні обмеження та недоліки [3, 11], зокрема:

- наявність зон зі зниженою чутливістю біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь;
- мала амплітуда дифрагованих сигналів;
- можливість виникнення хибних дифрагованих сигналів на неоднорідностях матеріалу ОК;
- складність контролю ОК за значної кривизни його поверхні.

Отримані в [10] експериментальні дані засвідчили можливість використання ДЧМ для контролю стикових з'єднань труб із поліетилену високої щільності (ПВЩ, англ. HDPE). На сьогодні це питання лишається актуальним і потребує поглибленого дослідження його різних аспектів.

Метою роботи є дослідження частотних характеристик сигналів ДЧМ, зокрема підповерхневого та донного сигналів, отриманих при контролі цим методом товстостінних труб, виготовлених із поліетилену високої щільності.

Характеристика поліетиленових труб високого тиску. Особливості структури та певні фізичні характеристики ПВЩ ускладнюють його

контроль ультразвуковим методом. Поліетилен – це термопластичний матеріал, що легко формується та з'єднується плавленням. Винайдений у 1933 р., полімер формувався лише під високим тиском. У 1950-х роках була винайдена технологія низького тиску, яка значно знизила вартість і зробила виготовлення поліетилену безпечнішим. Щільність матеріалу визначається кількістю бічних відгалужень (коротких полімерних ланцюгів) від основного довгого полімерного ланцюга. Саме за цією ознакою й розрізняються поліетилен низького тиску, але високої щільності (ПВЩ), з малою кількістю розгалужень і поліетилен низької щільності (ПНЩ) з великою кількістю розгалужень. Поліетилен має як кристалічні, так і аморфні області та зветься напівкристалічним матеріалом.

Труби ПВЩ виготовляють із наступних марок поліетилену: PE40, PE80, PE100, що розрізняються за механічними властивостями [12]. У цілому до переваг ПВЩ належать наступні [13]:

- низька ціна;
- висока стійкість до корозії;
- легкість маніпулювання, транспортування та обробки;
- мала вага та гнучкість;
- швидкіший і простіший процес зварювання;
- значний термін експлуатації.

Методи з'єднання поліетиленових труб. Під час монтажу трубопроводів найпоширенішими способом з'єднання труб із ПВЩ є електротермічне стикове зварювання [14]. Зазначений метод передбачає стадії: нагрів попередньо підготовлених торцевих поверхонь труб за допомогою нагрівального інструмента, з'єднання розігрітих кінців між собою під дією тиску, витримка. У результаті відбувається дифузійне перемішування полімерного матеріалу, а після його охолодження формується міцне та герметичне зварне з'єднання. Витіснений назовні розігрітий матеріал формує валики (на зовнішній та внутрішній поверхнях труби), фактично не лишаючи зони термічного впливу у з'єднанні. За вимогами надалі валики можуть механічно видалятися з поверхні після повного охолодження.

Дефекти зварних з'єднань труб із ПВЩ. Згідно з наведеними в [14] результатами досліджень дефекти зварних швів містять: сторонні забруднення при монтажних роботах; часткове або повністю відсутнє з'єднання через неякісну підготовку торців до зварювання (як правило, орієнтоване перпендикулярно до радіально-осьової площини, тобто з нахилом 0°); холодне злипання (несплавлення), за якого утворений контакт є недостатнім

для передавання напруги зсуву; пори, викликані невідповідними циклами нагрівання та стискання; тріщини під час охолодження та невідповідну геометрію валиків зварних швів.

Особливості УЗК труб, виготовлених із ПВЩ. Разом з експлуатаційними перевагами труби з ПВЩ мають певні проблеми для УЗК щодо виявлення поширених дефектів. Згідно з дослідженням [15] поздовжня швидкість звуку в поліетилені залежить від багатьох факторів: хімічний склад, спосіб виготовлення та ін. Найвпливовішим фактором є температура – при її зміні від 0 до 50 °С швидкість поздовжніх хвиль зменшується від 2500 до 2150 м/с, що може ускладнити ультразвуковий контроль у польових умовах і потребує додаткових досліджень при налаштуванні дефектоскопа. Як зазначено у [15], для труб ПВЩ марки PE100 швидкість поздовжніх хвиль складає 2,340 м/с при температурі 20 °С, що близько до стандартних призм Rexolite. Ця обставина ускладнює введення ультразвукових коливань у матеріал під кутом.

Інша поширена проблема – високе згасання, що залежить від частоти ПЕП і відносно незначно варіюється у радіальному та осьовому напрямках. Для поздовжньої хвилі згасання складає 0,3...0,5 дБ/мм на частоті 2,25 МГц, поперечні хвилі майже відсутні [15].

Для УЗК металів зазвичай використовуються частоти з діапазону 1...10 МГц, оптимальною для ПВЩ щодо згасання є частота 2 МГц [15]. При використанні луна-імпульсного методу для збору даних доцільно обмежувати діапазон контролю зоною з прямим променем.

У [10] опубліковано результати дослідження акустичних властивостей ПВЩ у трьох ортогональних напрямках: через стінку, радіальному/окружному та осьовому напрямку труби. Для ПЕП частотою 2,25 МГц та діаметром п'єзопластини 9,5 мм виміряна акустична швидкість у ПВЩ складала 2240...2340 м/с, а затухання – 0,55...0,83 дБ/мм. Крім того, в [10] встановлено, що при частоті збудження ПЕП 2,25 МГц і поширенні хвилі в ОК на відстань 2'' (5,08 см, у прямому та зворотному напрямках) повертався сигнал частотою ~ 1,3...1,8 МГц, при частоті ПЕП 5 МГц повертався сигнал частотою ~2,2 МГц, а при 10 МГц отримували відповідно сигнал частотою ~3,5 МГц, що свідчить про втрату основної частоти збудження ПЕП.

У [16] зазначено, що при поширенні в ОК відбувається зміна як обвідної, так і частоти сигналів ДЧМ.

При попередніх дослідженнях авторами цієї публікації було зареєстровано частотну модуляцію

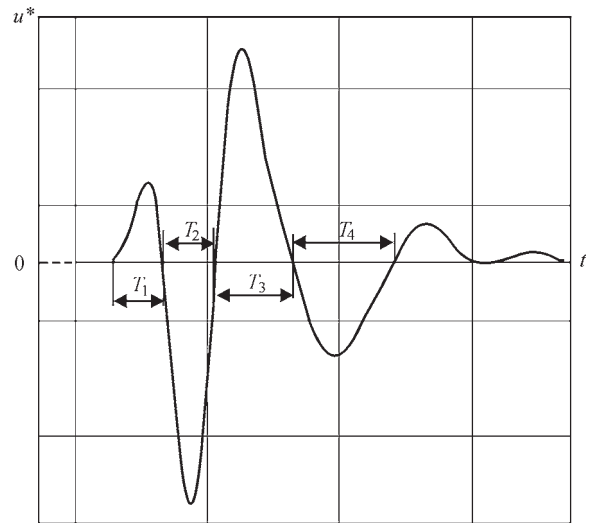


Рис. 3. Графік донного сигналу, характерний для реалізації ДЧМ при контролі труб із ПВЩ

донного сигналу, що вказано на рис. 3, де півперіоди мають різну тривалість, а саме, спостерігається збільшення їхнього часу: $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$.

Ефекти зміни частоти сигналу-носія в ДЧМ та частотні модуляції сигналів, отриманих при ультразвуковому контролі труб із ПВЩ, лишаються малодослідженими й не дають змоги коректно оцінити інформаційний потенціал сигналів ДЧМ.

Лабораторна установка для дослідження сигналів ДЧМ. Для отримання сигналів ДЧМ використовувався дефектоскоп OmniScan SX, який має функцію експорту А-сканів розміром до 8192 точок через USB-порт для подальшого оброблення та аналізу характеристик сигналів. Дефектоскоп має зручний сенсорний інтерфейс та екран з роздільною здатністю 800×600 пікселів для візуалізації результатів контролю та поточної інформації. В експерименті використовувались ПЕП C540-SM Centrascan Composite Miniature Angle Beam Transducer з п'єзопластинами діаметром 9,5 мм і робочою частотою 2,25 МГц та призма ST2-60L-WHC-HDPE з кутом введення ультразвукових коливань в ОК 60°. Поздовжні ультразвукові хвилі вводились в ОК через водяний канал у призмі завдовжки орієнтовно 12 мм. Аналогово-цифрове перетворення сигналів ДЧМ виконувалось із частотою дискретизації 100 МГц. Відстань між двома ПЕП дорівнювала 85 мм. Сканування поверхні ОК здійснювалось за допомогою ручного сканера HST-Lite Scanner. Фото лабораторної установки наведено на рис. 4.

Методика аналізу сигналів. Спектр ДЧМ-сигналів концентрується в невеликій ділянці в околі центральної частоти f , тому для аналізу таких сигналів допустиме їхнє представлення у вигляді моделі вузькосмугового сигналу. У загальному виді

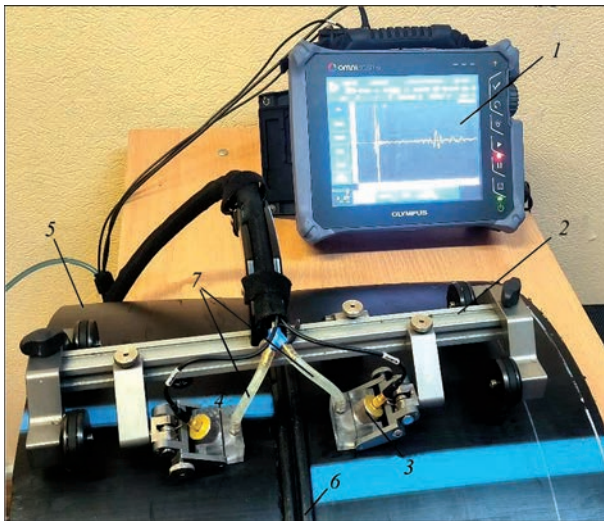


Рис. 4. Лабораторна установка для дослідження сигналів ДЧМ: 1 – дефектоскоп; 2 – скануючий пристрій; 3, 4 – ПЕП; 5 – фрагмент ОК; 6 – зварний шов; 7 – трубопровід подачі імпульсної рідини

гляді така модель у цифровій формі може бути представлена рівнянням [17]:

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

де J – обсяг вибірки, $J = \lceil T_a / T_d \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ – позначення операції виділення цілої частини числа, T_d , T_a – період дискретизації та час аналізу сигналу відповідно, j – номер відліку у вибірці.

Оскільки рівень шумової складової сигналу значно менший за амплітуду донного сигналу, в моделі (1) вона відсутня.

Визначення характеристик сигналу відбувається за допомогою дискретного перетворення Гільберта (ДПГ) [12], що реалізується оператором \mathbf{H}_d . Останній дає змогу отримати гільберт-образ вибірки $\tilde{u}[j] = \mathbf{H}_d(u[j])$.

Значення оцінок обвідної та фази сигналу для всіх точок вибірки обчислюються за формулами:

$$\hat{U}[j] = \sqrt{u^2[j] + \tilde{u}^2[j]}, \quad (2)$$

$$\hat{\Phi}[j] = \arctg \frac{\tilde{u}[j]}{u[j]} + \mathbf{L}(u[j], \tilde{u}[j]) \quad (3)$$

де \mathbf{L} – оператор розгортання фазової характеристики сигналу за межі інтервалу $[-0,5\pi; 0,5\pi)$, тобто за межі інтервалу однозначного визначення функції \arctg [18]. ДПГ дає змогу отримати вибірки обвідної та фази сигналів ММП під час сканування поверхні ОК з частотою дискретизації, що значно перевищує центральну частоту ($F_d \gg f$) та уможливує визначення динаміки зміни характеристик сигналу навіть у межах періоду сигналу-носія.

Оцінювання миттєвої частоти сигналу відбувається безпосередньо з дискретної фази сигналу згідно з виразом:

$$\hat{f}[j] = \frac{\hat{\Phi}[j] - \hat{\Phi}[(j-1)]}{2\pi T_d}, \quad 1 \leq j \leq J-1 \quad (4)$$

Зауважимо, що термін «миттєва частота» є внутрішньо суперечливим, оскільки зазвичай під частотою розуміють величину, обернену до періоду коливань. Проте похідна в часі від фази сигналу за розмірністю збігається з частотою, а у випадку гармонічного сигналу кількісно співпадає з його частотою. Тому далі ця величина використовується в аналізі швидкоплинних (локалізованих у часі) процесів і сигналів.

Методика аналізу структури ДЧМ-сигналів передбачає:

1. Отримання вибірки аналізованого сигналу $u_{\text{вх}}[j]$, $j = \overline{1, J}$.
2. Фільтрація (за необхідності) вибірки $u_{\text{вх}}[j]$, $j = \overline{1, J}$ та отримання її фільтрованої версії $u[j] = \mathbf{F}(u_{\text{вх}}[j])$, $j = \overline{1, J}$, де \mathbf{F} – оператор фільтрації.
3. Обчислення гільберт-образу вибірки $\tilde{u}[j] = \mathbf{H}_d(u[j])$, $j = \overline{1, J}$.
4. Обчислення оцінки обвідної сигналу $\hat{U}[j]$, $j = \overline{1, J}$ згідно з (2).
5. Обчислення оцінки фази сигналу $\hat{\Phi}[j]$ згідно з (3).
6. Визначення оцінки значень миттєвої частоти сигналу $\hat{f}[j]$ згідно з (4).

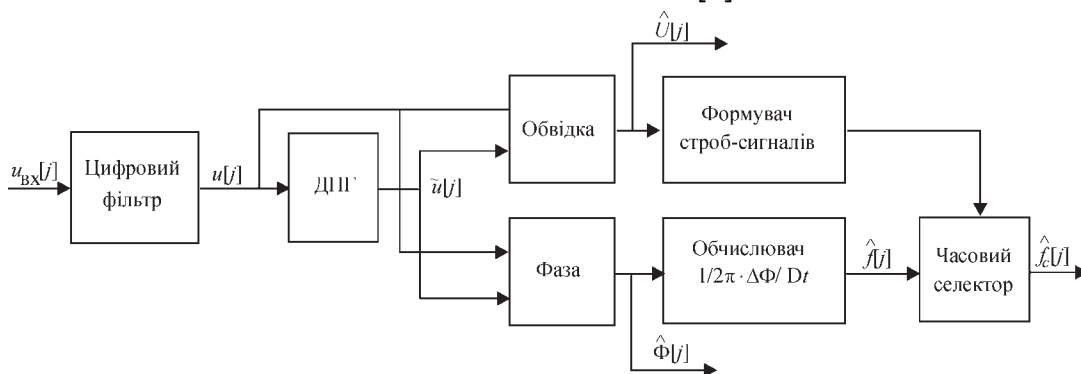


Рис. 5. Структурно-логічна схема отримання функції $\hat{f}[j]$

7. Виділення (за обвідною) для аналізу необхідних ділянок функції $\hat{f}[j]$, які відповідають підповерхневій, двом дифракційним і віддзеркаленій хвилям.

Структурно-логічну схему опрацювання ДЧМ-сигналу згідно з вказаною вище методикою наведено на рис. 5.

У цій схемі обвідна використовується для управління часовим селектором і виокремлення інформативних ділянок сигналу.

Опрацювання ДЧМ-сигналу та аналіз отриманого результату. У проведеному досліді ПЕП встановлювались на бездефектній ділянці труби для дослідження підповерхневих і донних сигналів. Реалізація обчислень експериментальних даних згідно з рівняннями (2)–(4) та візуалізація отриманих результатів виконана в середовищі MATLAB [19].

На рис.6, а зображено реалізацію сигналу (у відносних одиницях і без додаткової частотної фільтрації), отриману за допомогою ультразвукового дефектоскопа OmniScan SX та розраховану обвідну сигналу (крива 3). Сигнал містить два

радіоімпульси – реакцію на підповерхневу хвилю (крива 1) та донний сигнал (крива 2). З цього рисунку видно, що радіоімпульс 2 суттєво відрізняється від радіоімпульсу 1 підповерхневої хвилі як за частотою сигналу-носія, так і за формою обвідної. На рис. 6, б наведено функцію $\Phi[j]$ (з метою підвищення інформативності ділянки цієї функції на інтервалах між радіоімпульсами прирівняні 0).

Графік зміни миттєвої частоти в часі зображено на рис. 6, в. Отримана оцінка частоти містить значну шумову складову, яка не відповідає реальній частоті сигналу, і викликана особливістю алгоритму (4), чутливого до найменших коливань оцінки фази (фазових шумів) сигналу (3). Пояснення цього ефекту дає рис. 7. Унаслідок незначних високочастотних шумів у вхідному сигналі (червона крива (1) на рис. 7) виникають незначні локальні спотворення у відліках сигналу, що призводить до появи фазових шумів аналізованого сигналу і, як наслідок, до значних флуктуацій функції $\hat{f}[j]$. Цифрова фільтрація послідовності дає змогу зменшити цей ефект. Синя крива (2) на рис. 7 отримана

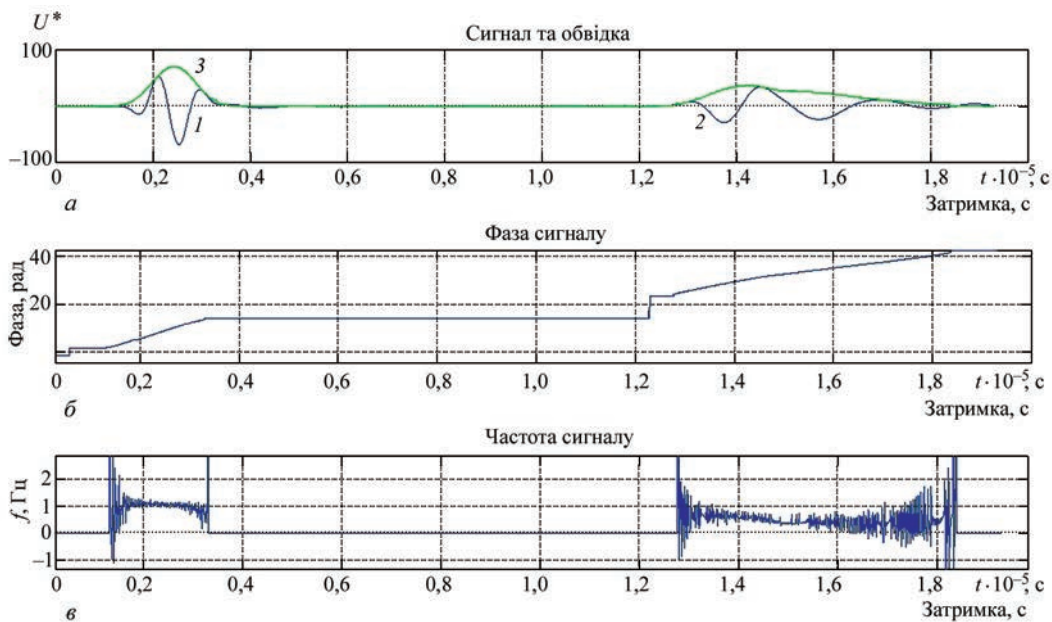


Рис. 6. Графіки реалізації сигналу ДЧМ і його обвідної (а), фрагментів обчислення його фази (б) та миттєвої частоти (в)

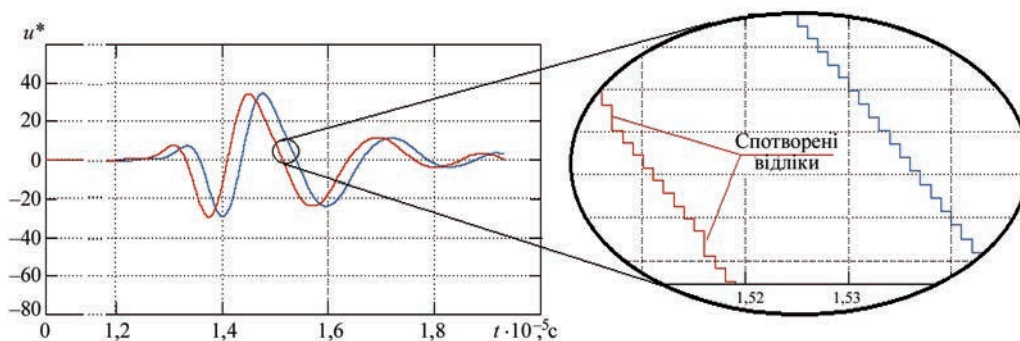


Рис. 7. Аналіз причини виникнення шумів функції $\hat{f}[j]$

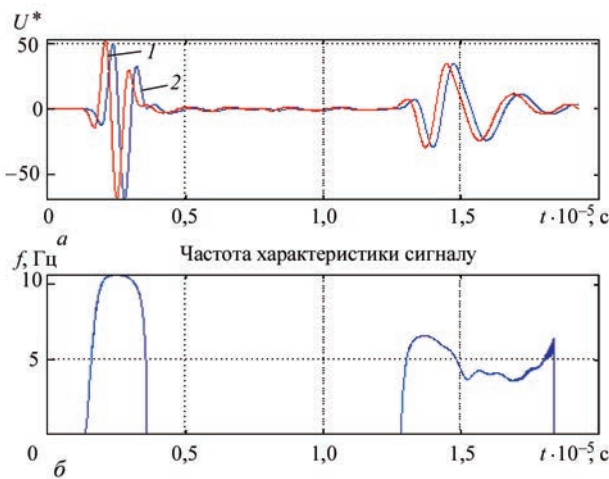


Рис. 8. Графіки досліджуваних радіоімпульсів (а) та їхні частотні характеристики (б): 1 – до фільтрації (червона), 2 – після фільтрації (синя)

на після проходження $u_{\text{вх}} [j]$ через фільтр через фільтр Баттерворда низької частоти 4-го порядку і частотою зрізу 2 МГц. Фільтри Баттерворда мають плоску амплітудо-частотну характеристику в полісі пропускання, і це дає змогу мінімізувати спотворення сигналу. Саме з метою зменшення фазових шумів у наведену на рис. 5 структуру введено цифровий фільтр.

На рис. 8, а наведено радіоімпульси, що відповідають підповерхневій та донній хвилям до та після фільтрації (як видно, застосований фільтр практично не змінив форму сигналів). Частотна характеристика цих сигналів наведена на рис. 8, б.

З аналізу отриманих результаті можна зробити наступні висновки:

- частота підповерхневого сигналу лежить в околі 1,05 МГц, модуляція частоти відсутня;
- донний сигнал суттєво трансформується за частотою та формою обвідної відносно підповерхневого сигналу та сигналу збудження;
- частота донного сигналу лежить в інтервалі 0,4...0,6 МГц;
- спостерігається модуляція миттєвої частоти донного сигналу впродовж часу його існування.

Зниження частот донного та підповерхневого радіоімпульсів частково може бути пов'язана з широкою діаграмою направленості ПЕП, широкою смугою частот зонduючого сигналу та зміною діаграми направленості ПЕП для різних частотних компонент зонduючого сигналу.

Висновки

Результати експериментальних досліджень сигналів ДЧМ, отриманих під час контролю товстостінних труб з поліетилену високої щільності, показали наступне:

- частота підповерхневої хвилі в $\sim 2,1$ рази менша за робочу частоту ПЕП, модуляції частоти не спостерігається;
- частота донного сигналу в середньому в $\sim 4,5$ разів менша за робочу частоту ПЕП;
- спостерігається, по-перше, трансформація форми та збільшення тривалості обвідної донного імпульсу, по-друге, модуляція його миттєвої частоти в межах радіоімпульсу, що може пояснюватися широкою діаграмою направленості ПЕП.

Показано, що процедура визначення частотної характеристики сигналу за їхньою дискретною фазовою характеристикою є дуже чутливою до фазових шумів, зменшення яких можна забезпечити за рахунок частотної фільтрації аналізованих сигналів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз фазової та амплітудної характеристик дифрагованих сигналів з метою пошуку нових інформаційних (діагностичних) ознак дефектів у трубах із поліетилену високої щільності.

Список літератури/References

1. Silk, M.G., Lidington, B.H. (1975) The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth. *Non-Destructive Testing*, 8(3), 146–151. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-1021\(75\)90024-9](https://doi.org/10.1016/0029-1021(75)90024-9)
2. Taghipour, M.H. (2015) Study and evaluation of advanced TOFD method for inspection of polyethylene pipes butt welding. *J. of Physical Science and Application*, 5(5), 349–355. DOI: <https://doi.org/10.17265/2159-5348/2015.05.005>
3. Charlesworth, J.P., Temple, J.A.G. (2001) *Engineering applications of ultrasonic time-of-flight diffraction*. 2nd Ed. Baldock: Research Studies Press.
4. Ginzel, E. (2025) CIVA confirmation of frequency dependence of TOFD lateral wave. University of Waterloo. *e-Journal of Nondestructive Testing*. DOI: <https://doi.org/10.58286/31565>
5. Boháček, M., Mičian, M., Koňár, R., Hlavatý, I. (2017) Ultrasonic testing of butt weld joint by TOFD technique. *Manufacturing Technology*, 17(6), 842–847. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/6/842>
6. Temple, J.A.G. (1984) The amplitude of ultrasonic time-of-flight diffraction signals compared with those from a reference reflector. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 16, 145–159. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(84\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0308-0161(84)90063-2)
7. Mayworm, R.C., Alvarenga, A.V., Costa-Félix, R.P.B. (2015) A metrological based realization of time-of-flight diffraction technique. *Physics Procedia*, 70, 590–593. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.029>
8. Nath, S.K., Balasubramaniam, K., Krishnamurthy, C.V., Narayana, B.H. (2010) Reliability assessment of manual ultrasonic time-of-flight diffraction inspection for complex geometry components. *NDT & E International*, 43(2), 152–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.10.007>
9. Ogilvy, J.A., Temple, J.A.G. (1983) Diffraction of elastic waves by cracks: Application to time-of-flight inspection. *Ultrasonics*, 21(6), 259–269. DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(83\)90058-6](https://doi.org/10.1016/0041-624X(83)90058-6)
10. Crawford, S.L., Cumblidge, S.E., Doctor, S.R., Hall, T.E., Anderson, M.T. (2008) *Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion*. Technical Letter Report JCN N6398, Task 2D. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory.
11. Kenzie, B., Speck, J. (2005) Developments in integrity management with TOFD inspection. *Inspectioning J.* <https://doi.org/10.1016/j.insp.2005.08.001>

- inspectioneering.com/journal/2005-07-01/273/developments-in-integrity-mana
12. ДСТУ EN 12201-1:2018. Системи трубопроводів для водопостачання, дренажу та каналізації під тиском. Поліетилен (ПЕ). Частина 1. Загальні положення. Київ, ДП «УкрНДНЦ».
DSTU EN 12201-1:2018. *Piping systems for water supply, drainage and sewerage under pressure. Polyethylene (PE). Part 1. General provisions.* Kyiv, State Enterprise «UkrNDNC» [in Ukrainian].
 13. Correia, C. (2017) TOFD examination of HDPE butt weld fusion joints. *e-Journal of Nondestructive Testing*, 22(6), 1–11. https://www.academia.edu/74628863/TOFD_Examination_of_HDPE_Butt_Weld_Fusion_Joints
 14. Pettigrew, I.G. (2014) Advanced ultrasonic inspection of HDPE welds. In: *Proceedings of the Offshore Technology Conference Asia*. Kuala Lumpur, Malaysia, OTC-25065-MS. DOI: <https://doi.org/10.4043/25065-MS>
 15. Qi, G., Li, Y., Ding, N. (2019) Measurement of acoustic basic parameters of polyethylene pipe. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 677(2), 022050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022050>
 16. Ginzel, E. (2025) CIVA confirmation of frequency dependence of TOFD lateral wave. *e-Journal of Nondestructive Testing*. DOI: <https://doi.org/10.58286/31565>
 17. Babak, V., Babak, S., Eremenko, V., Kuts, Y., Myslovych, M., Scherbak, L., Zaporozhets, A. (2021) *Models and measures in measurements and monitoring*. Cham: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>
 18. Babak, V., Babak, S., Eremenko, V., Kuts, Y., Myslovych, M., Scherbak, L. (2023) Application of discrete Hilbert transform to estimate the characteristics of cyclic signals. In: *Zaporozhets, A. (ed.) Systems, decision and control in energy IV*. Cham: Springer, pp. 93–115. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_5
 19. Лазарев Ю.Ф. (2013) *Довідник з MATLAB: електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування*. Київ, НТУУ «КПІ».
Lazarev, Y.F. (2013) *MATLAB Handbook: an electronic textbook for course and diploma design*. Kyiv, NTUU «KPI» [in Ukrainian].

ANALYSIS OF SIGNAL STRUCTURE IN HIGH-DENSITY POLYETHYLENE PIPE INSPECTION USING THE TIME-OF-FLIGHT DIFFRACTION TECHNIQUE

S.M. Glabets¹, V.S. Eremenko¹, Yu.V. Kuts^{1,2}

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

E-mail: glabets@gmail.com

²Institute of General Power Engineering of the NAS of Ukraine. 172 Antonovycha Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: y.kuts@ukr.net

The article presents the results of experimental studies of the subsurface and bottom signals obtained during the inspection of thick-walled high-density polyethylene (HDPE) pipes using the time-of-flight diffraction (ToFD) method. The experimental signals were obtained using an OmniScan SX ultrasonic flaw detector. Analysis of the signal envelope and phase was performed in the MatLab environment. It is shown that the envelope and frequency of the received signals, in particular the subsurface and bottom ones, differ significantly from the nominal values of the respective characteristics of excitation signals of the piezoelectric transducers, which must be taken into account during inspection and interpretation of the testing results, as well as in the search for and justification of new diagnostic features. 19 Ref., 8 Fig.

Keywords: ultrasonic nondestructive testing, time-of-flight diffraction, welded joint of polyethylene pipes

ORCID

Глабець С.М. – <https://orcid.org/0009-0004-2740-9209>, Єременко В.С. – <https://orcid.org/0000-0002-4330-7518>,

Куц Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

С.М. Глабець

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

E-mail: s.glabets@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.М. Глабець, В.С. Єременко, Ю.В. Куц (2026) Дослідження структури сигналів при контролі труб з поліетилену високої щільності дифракційно-часовим методом. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 01, 47–53.

DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.01.05>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 09.02.2026

Отримано у переглянутому вигляді 27.03.2026

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 23.04.2026





Вітаємо нових індивідуальних членів Українського товариства НКТД

- **Камшу Олександра Андрійовича**
заступника директора Черкаської філії Державного підприємства «Полтавастандартметрологія»
- **Поломаренка Івана Івановича**
завідувача механічним відділенням Черкаського політехнічного фахового коледжу

Підтвердили членство в УТ НКТД на новий термін

- **Базіло Костянтин Вікторович**
д.т.н., професор кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Бондаренко Максим Олексійович**
д.т.н., професор, завідувач кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Гальченко Володимир Якович**
д.т.н., професор кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Зозуля Едуард Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри матеріалознавства Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»
- **Мешков Сергій Миколайович**
к.т.н., доцент кафедри фізики Харківського національного університету радіоелектроніки
- **Муравйов Олександр Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Мягкий Олександр Валерійович**
к.т.н., доцент кафедри фізики Харківського національного університету радіоелектроніки
- **Нижник Олександр Ігорович**
к.т.н., доцент кафедри акустичних та медіаційних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Орел Роман Петрович**
к.т.н., доцент кафедри фізики Харківського національного університету радіоелектроніки
- **Пуларія Андрій Луарсабович**
к.т.н., доцент кафедри «Управління та експлуатація рухомого складу» Український державний університет науки і технологій
- **Старовойт Ярослав Іванович**
к.т.н., доцент кафедри акустичних та медіаційних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Тичков Володимир Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Тичков Дмитро Володимирович**
PhD, науковий співробітник Державного НДІ випробування і сертифікації озброєння та військової техніки, м. Черкаси
- **Тичкова Наталія Борисівна**
викладачка вищої категорії Черкаського політехнічного фахового коледжу
- **Топтун Анна Володимирівна**
PhD, викладачка кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Трембовецька Руслана Володимирівна**
д.т.н., професорка кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Туз Вячеслав Валерійович**
к.т.н., доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Філімонов Сергій Олександрович**
к.т.н., доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Ящеріцин Євген Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри «Безпека праці та навколишнього середовища» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Рік 2008

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

13-а Міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2008» у Славську

Традиційно в лютому спеціалісти з неруйнівного контролю збираються в засніжених Карпатах у відомому гірськолижному центрі Славське Львівської області. Цього року чергова міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2008 – Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» проходила з 19 по 22 лютого.

Організаторами цієї щорічної конференції виступили Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД), Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України (ФМІ, Львів); Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ); НВФ «Ультракон-Сервіс» (Київ); НВФ «Спеціальні Наукові Розробки» (Харків) і Центр «Леотест-Медіум» (Львів) (організаційне бюро конференції).

Відкрили конференцію голова Оргкомітету, член Правління і голова Західного відділення УТ НКТД, директор Центру «Леотест-Медіум», к.т.н. В.М. Учанін і заступник голови УТ НКТД, голова Карпатського відділення УТ НКТД, проректор з наукової роботи ІФНТУНГ, д.т.н., проф. О.М. Карпаш.

Як і щороку, найбільшу кількість доповідей (19) винесли на суд колег науковці ФМІ

ім. Г.В. Карпенка. Великий інтерес та цікаву дискусію викликали доповіді науковців із провідних установ та підприємств України: АТ УкрНДІТМ (Дніпропетровськ), ТОВ «ДДАП-РАКС» (Дніпродзержинськ), Української інженерно-педагогічної академії, НТ СКБ «Полісвіт», ДНВП «Об'єднання Комунар» (Харків), ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (Київ). Кілька доповідей представили науковці різних університетів України, що свідчить про виконання досліджень у нашій галузі та в навчальних закладах: Івано-Франківського НТУ нафти і газу, НТУУ «Київський політехнічний інститут» та ін. Про свої дослідження в розробці дефектоскопів та автоматизованих установок розповіли представники ряду підприємств, що давно пропонують свою продукцію на ринку України: УкрНДІНК (Київ), НВФ «Спеціальні Наукові Розробки» (Харків), ТОВ «Сереп» (Маріуполь).

У холі конференц-залу проходила виставка засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики, в якій брали участь: НВФ «Ультракон-Сервіс» (Київ); НВФ «Промприлад» (Київ); НВФ «Інтрон-СЕТ» (Донецьк); НПФ «Спеціальні Наукові Розробки» (Харків); Фірма «Арматор» (Дніпропетровськ); Центр «Леотест-Медіум» (Львів).





Конференція пройшла в діловій та доброзичливій атмосфері. Її учасники мали досить часу для плідних дискусій та відпочинку. Проживали учасники конференції в пансіона-

ті «Бойківщина», що розташувався на околиці Славського в оточенні багаторічних сосен, ялин та смерек, поблизу гірськолижних трас.

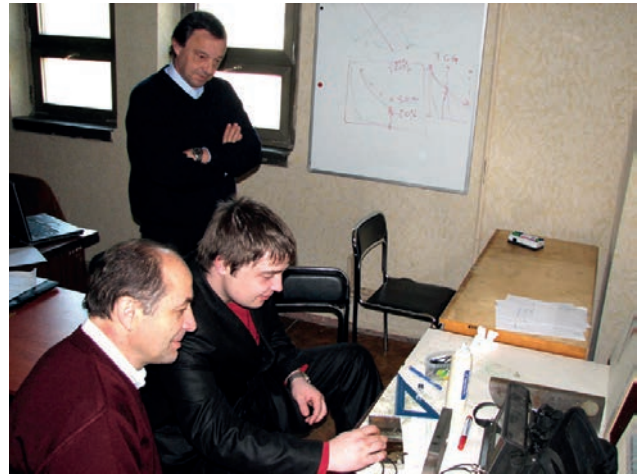
Про підготовку спеціалістів для сертифікації за міжнародною системою PCN

У період із січня по квітень 2008 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відбулася підготовка групи спеціалістів з НК з метою їх подальшої сертифікації за

міжнародною системою PCN.

Програма з підготовки українських фахівців стартувала у вересні 2007 р., коли під час візиту до ІЕЗ ім. Є.О. Патона делегації Порту-





гальського інституту зварювання та якості ISQ було досягнуто угоди про спільні роботи в галузі неруйнівного контролю. Одним із пунктів цієї угоди передбачалося проведення конкурсного відбору та підготовки групи українських фахівців з ультразвукового та радіографічного методів контролю для виконання робіт з НК, що проводитимуться в рамках спільних проєктів ІЕЗ та ISQ за кордоном, де обов'язковою вимогою є сертифікація спеціаліста з НК у міжнародно-визнаних системах сертифікації.

Однією з таких систем є британська система сертифікації персоналу з НК – PCN (Personnel Certification in Non-Destructive Testing), створена та керована Британським інститутом з НК (BINDT). Ця система акредитована на відповідність вимогам європейських стандартів EN 45013, EN 473, а також міжнародного стандарту ISO 9712 і, разом із системою сертифікації Американського товариства неруйнівного контролю (ASNT certification), є найбільш поширеною та визнаною у світі.

16-а Міжнародна конференція «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики»

Щороку на початку осені фахівці з неруйнівного контролю України та зарубіжних країн збираються в Криму на традиційній Міжнародній конференції та виставці «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики». Традиційно цю конференцію організують Український інформаційний центр «Наука. Техніка. Технологія» (Київ) та НВП «Машинобудування» (Дніпропетровськ) за сприяння Українського товариства НКТД та Дніпропетровського національного університету. Цього року до організаторів додався також і Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Київ). Підтримку конференції надали МЧТПП «ОНІКО» (генеральний спонсор), ТОВ «Карл Цейс», ТОВ «Інтрон-СЕТ» (спонсори), а також журнали «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», «Зварювальник», «НК-інформ».

У роботі конференції взяли участь понад 200 фахівців, 92 з яких представляли промислові підприємства, 45 – вузи, НДІ та КБ, 48 – науково-

виробничі фірми, 15 – експертні та діагностичні центри, а також громадські організації.

Конференцію відкрив голова Українського товариства НКТД, професор В.О. Троїцький, який від імені Оргкомітету привітав учасників конференції та представив доповідь про роботи ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в галузі розробки технології та технічних засобів для далекодіючого контролю технічного стану протяжних трубопроводів спрямованими хвилями на основі п'єзоперетворювачів.

З науковою доповіддю «Діагностика конструкцій методами лазерної інтерферометрії» на пленарному засіданні виступив заступник директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України академік НАНУ Л.М. Лобанов. Він розповів про розроблену в ІЕЗ технологію неруйнівного контролю елементів конструкцій методом електронної широкографії, яка надає широкі можливості для виявлення різних типів дефектів у тонкостінних листах, трубах та інших конструкціях із металевих і неметалевих матеріалів.





Про роботу Українського товариства НКТД у 2008 р. та про плани на 2009 р. розповів заступник голови О.В. Мозговий.

Від імені Болгарського товариства НК учасників конференції привітав його президент професор М. Міховські. Велику зацікавленість українських фахівців викликали питання впровадження у Болгарії системи європейської (EN) та міжнародної (ISO) стандартизації в області НК; навчання персоналу за програмами ICNDT відповідно до вимог стандартів EN 473, ISO 9712, EN 4179; акредитації лабораторій з НК згідно з вимогами європейських стандартів.

Про завдання в галузі метрології засобів і методик неруйнівного контролю розповів М.М. Сунцов – керівник відділу ДП «Дніпро-стандартметрологія».

Доповідь про проблеми підготовки фахівців з НК в Україні в контексті Болонського процесу зробив завідувач кафедри «Прилади та системи неруйнівного контролю» НТУУ «Київський політехнічний інститут» А.Г. Протасов.

Ю.К. Бондаренко, завідувач відділом атестації, сертифікації та технічної експертизи у зварювальному виробництві ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, представив доповідь про проблеми забезпечення конкурентоспроможності технічних послуг з НК при монтажі та діагностиці зварних конструкцій.

Завершили пленарне засідання виступу

Про поїздку делегації УО НКТД на 17-у Всесвітню конференцію з НК у Китаї

17-а Всесвітня конференція з неруйнівного контролю проходила у Шанхаї з 25 по 28 жовтня у будівлі Виставкового центру. До

представників фірм-учасників виставки засобів для НК та ТД: МЧТПП «ОНІКО» (Київ), ТОВ «Інтрон-СЕТ» (Донецьк), «Mega Technologies» (Німеччина), ТОВ «Ультракон-Сервіс» (Київ), НВФ «Діагностичні прилади» (Київ).

Далі доповіді були заслухані на секціях:

- діагностика стану промислових об'єктів;
- сучасні методи та засоби НК у промисловості.

У рамках конференції відбулися науково-технічний семінар «Застосування сучасної технології далекодуючого ультразвукового контролю для моніторингу стану об'єктів з обмеженим доступом» та практичний семінар з обміну досвідом із сертифікації фахівців з НК відповідно до вимог національних та міжнародних стандартів.

Усього на конференції було представлено 14 пленарних, 64 секційних та 36 стендових доповідей про останні результати досліджень і розробок із широкого спектру проблем НК: діагностування та прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, визначення фізико-механічних характеристик матеріалів, підготовки та сертифікації фахівців НК, розробки нових і вдосконалення існуючих нормативних документів з НК і ТД та інших актуальних питань.

Традиційно у рамках конференції відбулися засідання Правління Українського товариства НКТД та Національного атестаційного комітету України з НК.

складу Української делегації входили 29 фахівців, які представляли ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (Київ), ВАТ «Одеський при-



портовий завод», Харківський національний автомобільний університет, компанію «Rosen-Engore», Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, ТОВ НКП «Луганськавтомастика», ДП «УкрНДІпроект» (Київ), НВП «Дніпрочерметавтомастика» (Дніпропетровськ), «Київоблгаз» (Біла Церква), ПНВП «Пульсар» (Донецьк), ДП «КОЛОРАН» ІФХ НАН України (Київ).

Основні теми, що обговорювалися на конференції: акустична емісія, вихрострумова дефектоскопія, інфрачервона термографія, магнітна дефектоскопія (у т.ч. метод магнітної пам'яті, МПД, магнітні рідини й т.ін.), ультразвуковий метод, оптичний контроль, радіографія, метод проникаючих речовин, загальні питання неруйнівного контролю. Під час конференції було оприлюднено понад 500 доповідей, у т.ч. з ультразвукового контролю – 190, радіографії – 54, магнітного контролю – 48, вихрострумового контролю – 40, теплового контролю – 15, контролю проникаючими речовинами – 5, оптичного та візуального контролю – 4 доповіді.

Крім засідань секцій, українські фахівці взяли участь у ряді семінарів та зустрічей з представниками делегацій інших країн.

Одночасно з конференцією в Експоцентрі Шанхаю відбулася виставка приладів та засобів неруйнівного контролю. На стенді УТ НКТД, розташованому поруч зі стендами товариств з НК Великої Британії та Бразилії, численні відвідувачі виставки змогли ознайомитись з останніми досягненнями нашої країни в області дефектоскопії.

Аналізуючи побачене й почуте на конференції, можна зробити висновок про те, що на цьому етапі в науці про неруйнівний контроль

йде накопичення знань та вдосконалення засобів контролю у напрямку підвищення надійності та автономності приладів, зниження їхньої ваги та габаритів і, головне, – створення нових програмних продуктів для розширення функціональних можливостей дефектоскопів.

Як приклад можна навести новинки, представлені однією з провідних компаній-розробників в області неруйнівного контролю – GE Sensing Inspection Technologies. Розроблена її фахівцями система Software Rhythm platform забезпечує багатоканальний прийом, відпрацювання та зберігання даних, одержуваних основними методами неруйнівного контролю, і може одночасно обробляти результати кількох випробувань. Усі переваги цієї системи реалізують за допомогою нових моделей дефектоскопів:

- портативного рентгенівського детектора Prime 16×16;
- ультразвукового дефектоскопа серії Bendtracer, призначеного для експрес-контролю деталей авіалайнерів, у т.ч. із композитних матеріалів;
- портативного вихрострумового дефектоскопа GE Pulsec, що використовує технологію PEC (Pulsed Eddy Current) для визначення підповерхневий корозії;
- бороскопа XL GO Video Probe з дисплеєм із високою роздільною здатністю.

Добре організована робота оргкомітету дозволила членам делегації не лише познайомитися зі станом техніки дефектоскопії в КНР, а й скласти яскраве враження про країну.

Після закінчення конференції наш шлях додому лежав через Ханьчжоу – давню столицю Китаю, яку знаменитий мандрівник Марко Поло називав «Раєм на землі», Сучжоу



– «шовкову столицю» Китаю та Пекін – його сучасну столицю.

Члени делегації також відвідали Гугун

(«Заборонене місто») – найбільший імператорський палац, храм Неба та, звичайно, пройшли китайською стіною.

5-а Міжнародна науково-технічна конференція та виставка «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання»

З 2 по 5 грудня 2008 р. в Івано-Франківську відбулася чергова науково-технічна конференція з неруйнівного контролю та діагностики, що традиційно організується Івано-Франківським національним технічним університетом нафти і газу за підтримки Міністерства освіти і науки України, НАК «Нафтогаз України» та Карпатського регіонального відділення УТ НКТД.

У роботі конференції взяли участь близько 120 спеціалістів і 12 організацій, які представили технічні засоби НК і ТД на виставку. Було зроблено 94 доповіді, що пов'язані із розробленням, використанням сучасних засобів для проведення неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання.

Під час роботи конференції був проведений круглий стіл, на якому обговорювалися

актуальні питання з розроблення сучасних засобів НК і ТД, технологій проведення НК і ТД машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання, сертифікації спеціалістів, а також навчання студентів за спеціальністю «Прилади і системи неруйнівного контролю» і спеціалізації «Технічна діагностика металоконструкцій» у різних вищих навчальних закладах України (ІФНТУНГ, Луганський НУ ім. В. Даля, НТУУ «КПІ», НТУ «ХП»).

Крім цього, були проведені два виїзних заняття на підприємствах Івано-Франківської області – Богородчанській компресорній станції та НВФ «Промтехдіагностика», де представлені на виставці засоби НК і ТД були продемонстровані в роботі на конкретних технологічних об'єктах (технологічні трубопроводи, газоперекачувальні агрегати, ресивери тощо).



У доповнення до переліку національних стандартів з неруйнівного контролю, що стосуються основних принципів методів контролю, загальних вимог до проведення контролю, термінології і засобів контролю, що був опублікований в попередньому номері журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», подаємо перелік стандартів з контролю певних видів продукції різними методами. Технічний комітет стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» нагадує спеціалістам з НК, що на сьогодні в Україні діють більше 200 національних стандартів з неруйнівного контролю. Майже всі з них гармонізовані з відповідними європейськими та міжнародними. Деякі стан-

дарту було прийнято методом перекладу, тоді як більша частина – методом підтвердження, тобто без перекладу українською.

Як можна побачити з наведених переліків стандартів, переважна більшість із них прийнята в Україні методом підтвердження (тобто без перекладу українською). Якщо організація (підприємство) зацікавлене в офіційному перекладі та прийнятті певного європейського або міжнародного стандарту (нової редакції стандарту) з НК, потрібно направити в ТК-78 на e-mail: usndt@ukr.net гарантійний лист-заявку довільної форми, в якому вказати шифр і назву відповідного європейського (міжнародного стандарту), а також джерело фінансування.

Позначення	Назва	Позначення НД, який замінено (скасовано)	Мова
Литво			
ДСТУ EN 12680-1:2015 (EN 12680-1:2003, IDT)	Литво. Ультразвуковий контроль. Частина 1. Відливки зі сталі загальної призначеності		en
ДСТУ EN 12680-2:2022 (EN 12680-2:2003, IDT)	Литво. Ультразвуковий контроль. Частина 2. Сталеві відливки для високонапружених компонентів		en
ДСТУ EN 12680-3:2022 (EN 12680-3:2011, IDT)	Литво. Ультразвуковий контроль. Частина 3. Відливки з чавуну з кулястим графітом		en
ДСТУ EN 12681-1:2022 (EN 12681-1:2017, IDT)	Литво. Радіографічний контроль. Частина 1. Плівкові методи		en
ДСТУ EN 12681-2:2022 (EN 12681-2:2017, IDT)	Литво. Радіографічний контроль. Частина 2. Методи із застосуванням цифрових детекторів		en
ДСТУ EN 1369:2005	Литво. Контроль магнітопорошковий		ua
ДСТУ EN 1369:2022 (EN 1369:2012, IDT)	Литво. Магнітопорошкові випробування		en
ДСТУ EN 1370:2016 (EN 1370:2011, IDT)	Литво. Контроль стану поверхні	ДСТУ EN 1370:2005, ДСТУ EN 12454:2005	en
ДСТУ EN 1371-1:2015 (EN 1371-1:2011, IDT)	Литво. Капілярний контроль. Частина 1. Відливки, виготовлені литтям в піщані форми та литтям в кокіль під дією сили тяжіння і під низьким тиском		en
ДСТУ EN 1371-2:2015 (EN 1371-2:2015, IDT)	Литво. Капілярний контроль. Частина 2. Відливки, отримані точним литтям		en
ДСТУ ISO 11971:2016 (ISO 11971:2008, IDT)	Сталеве і чавунне литво. Візуальне контролювання якості поверхні		en
ДСТУ ISO 19959:2016 (ISO 19959:2005, IDT)	Візуальне контролювання стану поверхні відливок, виплавлених по моделях. Сталеві, нікелеві й кобальтові сплави		en
ДСТУ ISO 4986:2015 (ISO 4986:2010, IDT)	Сталеві відливки. Магнітопорошковий контроль		en
ДСТУ ISO 4987:2015 (ISO 4987:2010, IDT)	Сталеві відливки. Капілярний контроль		en
ДСТУ ISO 4993:2018 (ISO 4993:2015, IDT)	Сталеве та чавунне литво. Радіографічний контроль		en
Поковки			
ДСТУ EN 10228-1:2017 (EN 10228-1:2016, IDT)	Неруйнівний контроль поковок зі сталі. Частина 1. Магнітопорошковий контроль	ДСТУ EN 10228-1:2005	ua

ДСТУ EN 10228-2:2017 (EN 10228-2:2016, IDT)	Неруйнівний контроль поковок зі сталі. Частина 2. Капілярний контроль	ДСТУ EN 10228-2:2001	ua
ДСТУ EN 10228-3:2017 (EN 10228-3:2016, IDT)	Неруйнівний контроль поковок із сталі. Частина 3. Ультразвуковий контроль поковок із феритних або мартенситних сталей	ДСТУ EN 10228-3:2001	en
ДСТУ EN 10228-4:2017 (EN 10228-4:2016, IDT)	Неруйнівний контроль поковок із сталі. Частина 4. Ультразвуковий контроль поковок із аустенітних і аустенітно-феритних нержавяких сталей		en
Зварні з'єднання			
ДСТУ 4857:2007	Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу		ua
ДСТУ CEN/TR 15135:2022 (CEN/TR 15135:2005, IDT)	Зварювання. Просектування та неруйнівний контроль зварних швів		en
ДСТУ EN 13100-1:2017 (EN 13100-1:2017, IDT)	Неруйнівний контроль зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 1. Візуальний контроль		en
ДСТУ EN 13100-2:2022 (EN 13100-2:2019, IDT)	Неруйнівний контроль зварних з'єднань напівфабрикатів із термопластів. Частина 2. Рентгенівський радіографічний контроль		en
ДСТУ EN 13100-3:2022 (EN 13100-3:2004, IDT)	Неруйнівний контроль зварних з'єднань напівфабрикатів із термопластів. Частина 3. Ультразвуковий контроль		en
ДСТУ EN 16296:2022 (EN 16296:2021, IDT)	Дефекти в зварних з'єднаннях термопластів. Рівні якості	ДСТУ EN 16296:2018 (EN 16296:2012, IDT)	en
ДСТУ EN 1711:2019 (EN 1711:2000, IDT)	Контроль неруйнівний зварних з'єднань. Контроль вихрострумний за допомогою аналізу сигналу на комплексній площині		
ДСТУ EN ISO 10042:2019 (EN ISO 10042:2018, IDT; ISO 10042:2018, IDT)	Зварювання. З'єднання з алюмінію та його сплавів, виконані дуговим зварюванням. Рівні якості залежно від дефектів	ДСТУ EN ISO 10042:2015 (EN ISO 10042:2005, IDT; ISO 10042:2005, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 10675-1:2022 (EN ISO 10675-1:2021, IDT; ISO 10675-1:2021, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 1. Сталь, нікель, титан та їхні сплави	ДСТУ EN ISO 10675-1:2017 (EN ISO 10675-1:2016, IDT; ISO 10675-1:2016, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 10675-2:2022 (EN ISO 10675-2:2021, IDT; ISO 10675-2:2021, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 2. Алюміній та його сплави	ДСТУ EN ISO 10675-2:2018 (EN ISO 10675-2:2017, IDT; ISO 10675-2:2017, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 10863:2022 (EN ISO 10863:2020, IDT; ISO 10863:2020, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування дифракційно-часового методу (TOFD)	ДСТУ EN ISO 10863:2014 (EN ISO 10863:2011, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 11666:2019 (EN ISO 11666:2018, IDT; ISO 11666:2018, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Рівні приймання	ДСТУ EN ISO 11666:2014	en
ДСТУ EN ISO 13588:2022 (EN ISO 13588:2019, IDT; ISO 13588:2019, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Використання технології автоматизованої фазованої решітки		en
ДСТУ EN ISO 15626:2019 (EN ISO 15626:2018, IDT; ISO 15626:2018, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Дифракційно-часовий метод (TOFD). Рівні приймання	ДСТУ EN ISO 15626:2014	en
ДСТУ EN ISO 17635:2018 (EN ISO 17635:2016, IDT; ISO 17635:2016, IDT)	Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Загальні правила для металевих матеріалів	ДСТУ ISO 17635:2015 (ISO 17635:2010, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 17636-1:2014	Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 1. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням плівки	ДСТУ EN 1435:2005	en

ДСТУ EN ISO 17636-2:2014	Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 2. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням цифрових детекторів		en
ДСТУ EN ISO 17637:2017 (EN ISO 17637:2016, IDT; ISO 17637:2016, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Візуальний контроль з'єднань, виконаних зварюванням плавленням	ДСТУ ISO 17637:2003	en
ДСТУ EN ISO 17638:2018 (EN ISO 17638:2016, IDT; ISO 17638:2016, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль	ДСТУ EN ISO 17638:2014	en
ДСТУ EN ISO 17640:2022 (EN ISO 17640:2018, IDT; ISO 17640:2018, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролювання та оцінювання	ДСТУ EN ISO 17640:2018 (EN ISO 17640:2017, IDT; ISO 17640:2017, IDT); ДСТУ EN ISO 17640:2019 (EN ISO 17640:2010, IDT; ISO 17640:2010, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 17643:2022 (EN ISO 17643:2015, IDT; ISO 17643:2015, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Вихрострумовий контроль зварних швів методом аналізу комплексної площини	ДСТУ ISO 17643:2018 (ISO 17643:2015, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 19285:2022 (EN ISO 19285:2017, IDT; ISO 19285:2017, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль фазованою решіткою (PAUT). Рівні приймання		en
ДСТУ EN ISO 20601:2022 (EN ISO 20601:2018, IDT; ISO 20601:2018, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування технології автоматизованої фазованої решітки для тонкостінних сталевих компонентів		en
ДСТУ EN ISO 22825:2017 (EN ISO 22825:2017, IDT; ISO 22825:2017, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Контроль зварних швів в аустенітних сталях і сплавах на основі нікелю		ua
ДСТУ EN ISO 23277:2018 (EN ISO 23277:2015, IDT; ISO 23277:2015, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Капілярний контроль. Рівні приймання	ДСТУ EN ISO 23277:2014	en
ДСТУ EN ISO 23278:2018 (EN ISO 23278:2015, IDT; ISO 23278:2015, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль. Рівні приймання	ДСТУ EN ISO 23278:2014	en
ДСТУ EN ISO 23279:2019 (EN ISO 23279:2017, IDT; ISO 23279:2017, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Характеристика розривів у зварних швах	ДСТУ EN ISO 23279:2014	en
ДСТУ EN ISO 23864:2022 (EN ISO 23864:2021, IDT; ISO 23864:2021, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування автоматизованого методу повного фокусування (TFM) та пов'язаних технологій		en
ДСТУ EN ISO 5817:2022 (EN ISO 5817:2014, IDT; ISO 5817:2014, IDT)	Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів	ДСТУ ISO 5817:2016 (ISO 5817:2014, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 6520-1:2015 (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT)	Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 1. Зварювання плавленням	ДСТУ 3491-96 (ГОСТ 30242-97)	en
ДСТУ EN ISO 6520-2:2015 (EN ISO 6520-2:2013, IDT; ISO 6520-2:2013, IDT)	Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 2. Зварювання тиском		en
ДСТУ ISO 4761:2022 (ISO 4761:2022, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль тонкостінних сталевих виробів фазованою решіткою (UT-PA). Рівні приймання		en
Труби			
ДСТУ EN ISO 10893-1:2015 (EN ISO 10893-1:2011, IDT; ISO 10893-1:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 1. Автоматизований електромагнітний контроль сталевих безшовних і зварних труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для верифікації герметичності		en

ДСТУ EN ISO 10893-10:2015 (EN ISO 10893-10:2011, IDT; ISO 10893-10:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 10. Автоматизований ультразвуковий контроль по всій окружності безшовних і зварних сталевих труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів		en
ДСТУ EN ISO 10893-11:2015 (EN ISO 10893-11:2011, IDT; ISO 10893-11:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 11. Автоматизований ультразвуковий контроль шва зварних сталевих труб для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів		en
ДСТУ EN ISO 10893-12:2015 (EN ISO 10893-12:2011, IDT; ISO 10893-12:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 12. Автоматизований ультразвуковий контроль товщини по всій окружності безшовних і зварних сталевих труб (крім труб, отриманих дуговим зварюванням під флюсом)		en
ДСТУ EN ISO 10893-2:2015 (EN ISO 10893-2:2011, IDT; ISO 10893-2:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 2. Автоматизований вихрострумний контроль сталевих безшовних і зварних труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для виявлення дефектів		en
ДСТУ EN ISO 10893-3:2015 (EN ISO 10893-3:2011, IDT; ISO 10893-3:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 3. Автоматизований контроль методом розсіювання магнітного потоку по всій окружності безшовних і зварних труб з феромагнітної сталі для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів		en
ДСТУ EN ISO 10893-4:2015 (EN ISO 10893-4:2011, IDT; ISO 10893-4:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 4. Капілярний контроль сталевих безшовних зварних труб для виявлення поверхневих дефектів		
ДСТУ EN ISO 10893-5:2014	Неруйнівний контроль сталевих труб. Магнітопорошковий контроль безшовних і зварних сталевих труб для виявлення поверхневих несутцільностей		en
ДСТУ EN ISO 10893-6:2022 (EN ISO 10893-6:2019, IDT; ISO 10893-6:2019, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 6. Радіографічний контроль шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів	ДСТУ EN ISO 10893-6:2015 (EN ISO 10893-6:2011, IDT; ISO 10893-6:2011, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 10893-7:2022 (EN ISO 10893-7:2019, IDT; ISO 10893-7:2019, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 7. Цифровий радіографічний контроль зварного шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів	ДСТУ EN ISO 10893-7:2015 (EN ISO 10893-7:2011, IDT; ISO 10893-7:2011, IDT)	en
ДСТУ EN ISO 10893-8:2015 (EN ISO 10893-8:2011, IDT; ISO 10893-8:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 8. Автоматизований ультразвуковий контроль сталевих безшовних і зварних труб для виявлення дефектів розшарування		en
ДСТУ EN ISO 10893-9:2015 (EN ISO 10893-9:2011, IDT; ISO 10893-9:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 9. Автоматизований ультразвуковий контроль для виявлення дефектів розшарування в смуговому/листовому металі, що використовується для виготовлення зварних сталевих труб		en
ДСТУ ISO 18211:2018 (ISO 18211:2016, IDT)	Неруйнівний контроль. Далекодійне інспектування наземних трубопроводів та виробничих трубних систем за допомогою контролю спрямованими хвилями з аксіальним поширенням		en
Прокат			
ДСТУ EN 10160:2015 (EN 10160:1999, IDT)	Контроль ультразвуковий сталевих виробів плоскої форми завтовшки 6 мм або більше (метод відбиття)		en
ДСТУ EN 10306:2017 (EN 10306:2001, IDT)	Залізо і сталь. Ультразвуковий контроль двотаврових балок Н і І перетинів з паралельними полицями		en
ДСТУ EN 10307:2017 (EN 10307:2001, IDT)	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль листового прокату із аустенітних і аустенітно-феритних нержавяких сталей завтовшки 6 мм і більше (метод відбиття)		en
ДСТУ EN 10308:2015 (EN 10308:2001, IDT)	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль сталевих сортового прокату		en

Звернення Президента Міжнародного комітету з неруйнівного контролю (ICNDT) доктора Sajeesh Kumar Babu щодо підсумків 2025 року

У той час як ми долаємо період глобальної невизначеності – від геополітичної напруженості та економічних коливань до стрімких технологічних змін – наша відданість міжнародному співробітництву у сфері неруйнівного контролю (НК) стає важливою як ніколи. У ці складні часи роль ICNDT як об'єднаної платформи для національних товариств, представників промисловості та науково-дослідних установ продовжує набувати актуальності та впливу.

Однією з головних подій цього року стало підписання Практичних домовленостей між ICNDT та Міжнародним агентством з атомної енергії (IAEA) у квітні 2025 року. Ця історична угода, укладена під час конференції ICARST у Відні, формалізує наше спільне бачення щодо зміцнення глобального потенціалу НК, особливо в регіонах, що розвиваються. Завдяки підтримці IAEA та розгалуженій мережі ICNDT ми тепер маємо кращі можливості для допомоги країнам-членам у створенні національних систем сертифікації, підвищенні відповідності нормативним вимогам та впровадженні безпечніших промислових практик за допомогою передових методологій НК.

Успішне проведення PANNDT 2025 у Торонто є ще одним відображенням колективної сили нашого регіонального та глобального партнерства. Конференція не лише продемонструвала останні інновації в галузі НК, оцінки цілісності та технологій інспектування, а й акцентувала увагу на питаннях сталого розвитку, енергоефективності та цифрової тран-

сформації. Вражаюча кількість учасників і високий рівень дискусій підтверджують наше спільне прагнення до розвитку знань і зміцнення зв'язків між країнами.

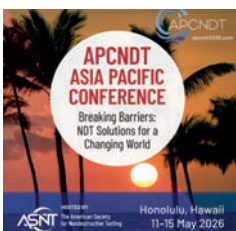
У цьому ж дусі Виконавчий комітет ICNDT залишається зосередженим на забезпеченні цінності для наших членів через ініціативи, що сприяють інклюзивності, технічній досконалості та перспективній співпраці. Наші робочі групи, зокрема WG3 з питань освіти, досліджень і сталого розвитку, продовжують вивчати екологічно свідомі методи контролю та стратегії інклюзивної розбудови потенціалу для задоволення майбутніх потреб.

Ми закликаємо всі національні товариства – особливо ті, що розташовані в регіонах, які наразі недостатньо забезпечені офіційною інфраструктурою НК – до активної взаємодії. Давайте співпрацювати заради розбудови систем кваліфікації, створення дослідницьких центрів та розширення можливостей наступного покоління фахівців з НК. Тільки завдяки спільним зусиллям ми зможемо забезпечити критично важливу роль НК у глобальній безпеці, інноваціях і сталому розвитку.

Я висловлюю щире вдячність усієї спільноті ICNDT за вашу непохитну підтримку, відданість і спільну мету, яку ви поділяєте зі мною та моєю командою. Рухаймося вперед – єдині у своєму баченні дій – щоб сформувати наступний розділ в еволюції нашої професії.

ICNDT Journal, Vol. 9, Issue 15

17th Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (APCNDT)



Приєднуйтеся до світової спільноти неруйнівного контролю в одному з найнатхненніших місць світу. APCNDT 2026 відбудеться в Гонолулу, пропонуючи чотири дні технічного програмування, співпраці та відкриттів на тлі природної краси Гаваїв.

Конференція проходитиме під гаслом «Долаючи бар'єри: рішення НК для світу, що змі-

нюється – впроваджуйте інновації, адаптуйтеся, трансформуйтеся», продемонструє найновіші винаходи та перспективні технології, які змінюють уявлення про неруйнівний контроль. Учасники матимуть можливість поспілкуватися зі світовими експертами, поділитися знаннями та вивчити нові рішення для викликів, що постають перед галузями промисловості у усьому світі.

Більше інформації за посиланням:
<https://www.apcndt2026.com/>

КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ ТА ВИСТАВОК

20–22 квітня 2026	Ньюкасл, Австралія	AINDT Summit 2026 (Самміт Австралійського інституту неруйнівного контролю)	Australian Institute for NDT
11–14 травня 2026	Гаваї, США	17 th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (17-а Азіатсько-Тихоокеанська конференція з НК)	American Society for NDT
11–13 травня 2026	Ахен, Німеччина	DGZIP Annual Conference конференція Німецького товариства з НК	DGZIP
19–21 травня 2026	Ліон, Франція	COFREND Days 2026 (Щорічна конференція Французького товариства з НК)	France Society of NDT
26–28 травня 2026	Уїстлер, Канада	NDT in Canada 2026 (Неруйнівний контроль в Канаді)	Canadian Institute for NDE
09–11 червня 2026	Йорк, Велика Британія	The 22 nd International Conference on Condition Monitoring and Asset Management (22-а Міжнародна конференція з моніторингу технічного стану і управління ресурсами)	British Institute of NDT
15–19 червня 2026	Верона, Італія	The 14 th European Conference on Non-Destructive Testing (14 th ECNDT) (14-а Європейська конференція з НК)	Italian Society for NDT
01–03 липня 2026	Online	ICNDT 2026: The 1st International Online Conference on Non-Destructive Testing (1-а Міжнародна онлайн конференція з НК)	NDT (MDPI Journal)
07–10 липня 2026	Тулуза, Франція	12 th European Workshop on Structural Health Monitoring (12-й Європейський семінар з моніторингу технічного стану конструкцій)	France Society of NDT
08–10 вересня 2026	Ліон, Франція	37 th Conference of the European Working Group on Acoustics (EW-GAE 2026) (37-а конференція Європейської робочої групи з акустичної емісії)	Європейська робоча група з АЕ
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
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
10–11 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
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

Довідкові матеріали

Перелік веб-ресурсів провідних організацій та компаній України у сфері неруйнівного контролю

Громадські організації

✓ **Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД)**

Сайт: <https://usndt.com.ua>

Діяльність: Професійне об'єднання спеціалістів України, що працюють в галузі НК. Є членом Європейської федерації з НК (EFNDT) та Міжнародного комітету з НК (ICNDT). Координує питання підготовки, атестації та сертифікації персоналу з НК. Займається питаннями стандартизації в

НК. На сайті також можна знайти інформацію про конференції, реєстр сертифікованих фахівців і новини галузі.

Науково-технічні центри

✓ **Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України**

Сайт: <https://paton.org.ua>

Діяльність: Фундаментальні дослідження методів контролю зварних з'єднань, прикладні дослідження та розробка систем діагностики технічного стану зварних конструкцій, розробка нових технологій контролю та діагностики.

✓ **Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України**

Сайт: <https://ipm.lviv.ua>

Діяльність: Фундаментальні та прикладні дослідження у галузі матеріалознавства, механіки руйнування, неруйнівного контролю, технічної діагностики та протикорозійного захисту. Розробка передових технологій, методів і засобів технічної діагностики елементів конструкцій промислових об'єктів тривалої експлуатації з використанням вихрострумової, ультразвукової, акусто-емісійної, магнітної та вібраційної дефектоскопії.

Вищі навчальні заклади

✓ **Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Сайт: <https://asn.kpi.ua>

Діяльність: Підготовка фахівців з розробки методів і засобів вимірювання та контролю параметрів технологічних процесів, систем неруйнівного контролю, технічної та медичної діагностики, проектування робототехнічних систем, засобів інтелектуального контролю та діагностики.

✓ **Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Сайт: <https://ivt.kpi.ua/>

Діяльність: Підготовка фахівців з розробки та програмування комп'ютерних систем із використанням інформаційно-вимірювальних технологій для проведення контролю, діагностики, випробувань, вимірювань, прогнозування в різних сферах науки і техніки.

✓ **Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут»**

Сайт: <https://web.kpi.kharkov.ua/iits/uk/prokafedru-2>

Діяльність: Освітня траєкторія кафедри об'єднує напрямки метрології, електроніки та ІТ, викладаються фізичні принципи функціонування засобів вимірювальної техніки та неруйнівного контролю, схемотехніка, програмування, мікропроцесорна техніка.

✓ **Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету**

Сайт: <https://pmkt.chdtu.edu.ua>

Діяльність: Студенти вивчають інтелектуальні вимірювальні системи, методи технічної діагностики та засоби неруйнівного контролю. Викладаються курси, пов'язані з

фізичними основами неруйнівного контролю (акустичні, магнітні, електромагнітні та теплові методи).

Розробники та виробники обладнання

✓ **Група компаній «Асоціація «ОКО»**

Сайт: <https://www.ndt.com.ua>

Діяльність: Асоціація включає компанії: «Український науково-дослідний інститут неруйнівного контролю» (УкрНДІНК), «Ультракон-Сервіс», «Промприлад». Займається розробкою та виготовленням широкого асортименту приладів неруйнівного контролю, а саме: ультразвукових, вихрострумових, магнітних дефектоскопів, автоматизованих систем контролю.

✓ **НВФ «Ультракон»**

Сайт: <https://ultracon.com.ua>

Діяльність: Виготовлення засобів для ультразвукового, вихрострумового, акустико-емісійного контролю, вимірювання твердості та шорсткості, контролю якості покриттів тощо. Комплексне обслуговування у сфері неруйнівного контролю та технічної діагностики.

✓ **НВЦ «Діагностика та контроль»**

Сайт: <https://diagnostic.mk.ua>

Діяльність: Розробка та виготовлення ультразвукових товщиномірів і перетворювачів, у тому числі хордових, для контролю труб малого діаметра, та нестандартних перетворювачів для особливих умов: високотемпературних, для підводних робіт, для вимірювання товщини поліетиленів.

✓ **НВП «Новотест»**

Сайт: <https://www.novotest.ua>

Діяльність: Виготовлення приладів для вимірювання та контролю якості: ультразвукових дефектоскопів і товщиномірів, твердомірів металу, товщиномірів покриттів, магнітометрів, приладів контролю якості будівельних матеріалів тощо.

Постачальники та дистриб'ютори

✓ **ТОВ «Діагностичні прилади»**

Сайт: <https://dp-ndt.uaprom.net>

Діяльність: Комплексне забезпечення підприємств України обладнанням та матеріалами для неруйнівного контролю: капілярного, радіаційного, магнітного, ультразвукового, вимірювання твердості. Надання послуг акредитованої випробувальної лабораторії.

✓ **Група компаній «Інтрон-СЕТ»**

Сайт: <https://intron-set.com.ua>

Діяльність: Постачання та ремонт приладів і засобів для неруйнівного контролю:

дефектоскопів, структуроскопів, вібротримів, товщиномірів, твердомірів, перетворювачів, стандартних зразків тощо. Спеціалізоване виробництво магнітних дефектоскопів для сталевих канатів і підйомних механізмів.

✓ **ТОВ «ОНІКО»**

Сайт: <https://oniko.ua/products/non-destructive-testing>

Діяльність: Постачання засобів для неруйнівного контролю провідних світових компаній. Портативне та стаціонарне устаткування

і матеріали: дефектоскопи, товщиноміри, тепловізори, плівки, пенетрати, проявники, очисники тощо.

✓ **НВП «Укрінтех»**

Сайт: <https://ukrintech.com.ua>

Діяльність: Поставка, метрологічний супровід, сервісне обслуговування обладнання для контролю якості матеріалів і покриттів, хімічного аналізу складу металів і сплавів, металографії, механічних випробувань. Власний сервісний центр і випробувальна лабораторія.



EF European Federation for
Non-Destructive Testing
NDT



**CENTRO ITALIANO
DI COORDINAMENTO
PER LE PROVE
NON DISTRUTTIVE**

Verona, 15/19 June 2026

ITALECNDT 14th
2026

EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING

The European Federation for Non-Destructive Testing is pleased to invite all professionals in the Non-Destructive Testing sector to participate in the 14th European Conference on Non-Destructive Testing, which will be held in Verona, Italy, in 2026

Organizing Secretariat:
Italian Society for NDT
ecndt2026@aipnd.it
www.aipnd.it





Центр сертифікації при Українському товаристві
неруйнівного контролю та технічної діагностики

Атестаційний центр неруйнівного контролю
при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ

ЗАПРОШУЮТЬ СПЕЦІАЛІСТІВ

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

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

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

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

в 12 виробничих секторах:

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

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

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

Три кроки до сертифікату:

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

м. Київ, вул. Казимира Малевича, 23 (корпус 6 ІЕЗ ім. Є.О. Патона)

м. Київ-38, 03038, а/с 20 (для листування)

тел. (044) 205-22-49, 200-81-40; e-mail: usndt@ukr.net, acnk@ukr.net