

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

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

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар);

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.П. Казакевич

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

О.М. Карпаш

Харківський нац. ун-т Повітряних Сил імені Івана

Кожедуба, м. Івано-Франківськ

Й. Мірчев

Інститут механіки, Софія, Болгарія;

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук,

В.М. Учанін (заст. гол. ред.)

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

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

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХПІ», м. Харків;

М.Г. Чаусов

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий редактор – О.Т. Зельніченко,

Міжнародна Асоціація «Зварювання», м. Київ

Видавець

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Адреса редакції

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

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Журнал входить до переліку затверджених МОН

України видань для публікації праць здобувачів

наукових ступенів за спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу.

ISSN 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print

Doi.org/10.37434/tdnk

Журнал зареєстровано Національною радою України з

питань телебачення і радіомовлення 09.05.2024,

ідентифікатор медіа R30-04568.

Передплата 2025

Передплатний індекс 74475. 4 випуски на рік (видається

щоквартально). Друкована версія/електронна версія:

1200 грн. за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів видавець журналу

відповідальності не несе.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ЛИСЕНКО Ю.Ю., КУЦ Ю.В., МІРЧЕВ Й., ЛЕВЧЕНКО О.Е.,
ГЛАБЕЦЬ С.М. Ефективність технології автоматизованої
вихрострумкової дефектоскопії з матричними перетворювачами .3

ТОРОП В.М. Сучасні рівні оцінки конструкційної міцності
та алгоритм впровадження методології ризик-аналізу
експлуатації зварних металоконструкцій..... 9

МАХНЕНКО О.В., МІЛЕНІН О.С., ПАВЛОВСЬКИЙ В.І.,
САВИЦЬКИЙ В.В., ЦАРИК Б.Р. Залишкові напруження при
зварюванні тертям з перемішуванням пластин з термозмі-
цненого алюмінієвого сплаву 2219-T81 17

ОСАДЧУК С.О., НИРКОВА Л.І., ГОНЧАРЕНКО Л.В.
Причини пошкодження трубопроводу зі сталі AISI 316L..... 24

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

МОК Г., УЧАНІН В.М., ЛИСЕНКО Ю.Ю. Дослідження
вихрострумкових перетворювачів для контролю зварних
швів конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням
дефектоскопа на базі смартфона 32

СТОРОЖИК Д.В., ПРОТАСОВ А.Г. Автоматизована
система діагностики дорожнього покриття з комплексу-
ванням зображень 39

НЕДОСЄКА С.А., НЕДОСЄКА А.Я., ЯРЕМЕНКО М.А.,
БОЙЧУК О.І., ОВСІЄНКО М.А., ВОЛОШКЕВИЧ І.Г. вико-
ристання випробувань зварних зразків для оцінки прогно-
зних якостей акустико-емісійного обладнання 45

ГЛУХОВСЬКИЙ В.Ю., ЛИТВИНЕНКО В.А., КАХОВСЬКИЙ Ю.М.,
КАХОВСЬКИЙ М.Ю. Особливості ремонту та діагностики
галтельних переходів агрегата ПЛ15/3251-ГК-600 Київської ГЕС ... 49

ІНФОРМАЦІЯ

Новини Українського товариства неруйнівного контролю
та технічної діагностики 53

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

Publisher
International Association «Welding»

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

The Journal is included in the list of publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine for the publication of works of applicants for academic degrees in specialties 132, 151, 152.
Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.
Recommended for printing Editorial Board of the Journal.
ISSN 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print
Doi.org/10.37434/tdnk

The Journal was registered by the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting on 09.05.2024, carrier identifier R30-04568.

Subscription 2025

Subscription index 74475.
4 issues per year (issued quarterly), back issues available.
\$128, subscriptions for the printed (hard copy) version, air postage and packaging included.
\$104, subscriptions for the electronic version.
Publisher is not responsible for the content of the promotional material.

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

LYSENKO Ju.Ju., KUTS Ju.V., MIRCHEV J., LEVCHENKO O.E., GLABETS S.M. Effectiveness of the technology of automated eddy flaw detection with matrix converters 3

TOROP V.M. Modern levels of structural strength assessment and the algorithm of implementation of the methodology of risk analysis of the operation of welded metal structures 9

MAKHNENKO O.V., MILENIN O.S., PAVLOVSKY V.I., SAVITSKY V.V., TSARYK B.R. Residual stresses induced by friction stir welding of thermo strengthened aluminum alloy 2219-T81 plate..... 17

OSADCHUK S.O., NYRKOVA L.I., GONCHARENKO L.V. Causes of damage to a pipeline of AISI 316L steel 24

INDUSTRIAL

MOOK G., UCHANIN V., LYSENKO Ju. Research of eddy current probes for inspection of aluminum alloy structure welds using smartphone-based flaw detector 32

STOROZHYK D.V., PROTASOV A.G. Automated road surface diagnostic system with image complexing 39

NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A.Ya., YAREMENKO M.A., BOYCHUK O.I., OVSIENKO M.A., VOLOSHKEVICH I.G. Use of welded specimens testing for assessment of acoustic emission equipment predictive properties..... 45

GLUKHOVSKIY V.Yu., LYTVYNENKO V.A., KAKHOVSKIY Yu.M., KAKHOVSKIY M.Yu. Features of repair and diagnostics of PL15/3251-GK-600 unit of Kyiv HPP 49

INFORMATION

News of the Ukrainian society for non-destructive testing 53

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»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ВИХРОСТРУМОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ З МАТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Ю.Ю. Лисенко¹, Ю.В. Куц¹, Й. Мірчев², О.Е. Левченко¹, С.М. Глабець³

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

²Інститут механіки Болгарської академії наук. 1113, м. Софія, вул. Акад. Г. Бончев, бл. 4. E-mail: mirchev@imbm.bas.bg

³Лабораторія НК ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади». 03061, м. Київ, вул. Патріотів, 103. E-mail: s.glabets@gmail.com

У статті досліджується ефективність застосування методу матричних перетворювачів у вихрострумівому контролі (ВСК). Проаналізовано переваги використання вихрострумівих матриць, до числа яких належать підвищення чутливості до малих дефектів, скорочення загального часу контролю та покращення ймовірності виявлення дефектів різних типів. Для оцінювання їх ефективності запропоновано безрозмірний коефіцієнт, який враховує час перевірки, достовірність виявлення дефекту та чутливість до дефектів певного розміру. Експериментальні дослідження на зразках зі штучно створеними дефектами різних розмірів, типів та орієнтацій підтвердили доцільність використання цього коефіцієнта для оптимізації параметрів контролю з метою покращення виявлення дефектів в елементах конструкцій. Додатково проаналізовано вплив на продуктивність апаратно-програмних засобів ВСК з матричними перетворювачами різних факторів, таких як стан поверхні, конфігурація сенсорів у матриці та параметри перевірки. Отримані результати сприятимуть кращому розумінню можливостей та обмежень використання матриць у ВСК компонентів транспортної, авіаційної та військової техніки. Це дасть змогу оптимізувати стратегії перевірки контрольованих виробів, підвищити надійність виявлення дефектів і покращити загальні практики технічного обслуговування в багатьох галузях промисловості. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: автоматизований вихрострумівий контроль, матриця перетворювачів, ефективність, математичне моделювання, дефектоскопія, обробка сигналів, чисельні методи

Вступ. Потреби безпеки та надійності в сучасних критичних галузях економіки, таких як авіаційна, військова, автомобільна, нафтогазова та енергетична промисловості, надають першочергового значення ефективній перевірці та оцінюванню поточного стану компонентів. Необхідність виявляти дефекти в критично важливих елементах і вузлах конструкцій різного призначення є вирішальною для запобігання незворотнім збоєм і забезпечення оптимальної роботи систем. Нові технічні рішення в зазначених галузях і використання нових матеріалів підвищують попит на передові методи та методики неруйнівного контролю (НК) і адаптацію вже відомих методів до нових завдань НК [1–3].

Серед передових напрямів розвитку НК метод матричного вихрострумівого контролю (МВСК) відомий своїми численними перевагами та відноситься до перспективних рішень для виявлення дефектів та оцінювання їх характеристик в елементах конструкцій у різних галузях економіки [4, 5]. Використання МВСК передбачає застосування кількох близько розташованих електричних котушок, об'єднаних у масив перетворювачів, що сприяє покращенню площі покриття об'єкта контролю (ОК) та підвищеній чутливості до малих дефектів. Такий підхід дає змогу виявляти

аномалії, які можуть бути непоміченими за допомогою одиночних перетворювачів, та підвищує загальну ефективність діагностики ОК. Одночасне сканування за кількома каналами та збір даних значного обсягу за один прохід вихрострумівой матриці (ВСМ) значно скорочують час контролю, що є надзвичайно важливим при обстеженні великогабаритних ОК, адже зменшує час простою техніки під час технічного обслуговування [6, 7].

Можливості МВСК поширюються на виявлення дефектів як на поверхні, так і всередині ОК. Це робить його ефективним для виявлення тріщин, корозійних уражень, відшарувань та інших прихованих дефектів, які можуть порушити структурну цілісність елементів конструкцій. Це має особливе значення в контексті транспортної та військової промисловості, де надійність і безпека є критичними чинниками для захисту та збереження життів [5, 8].

Незважаючи на те, що МВСК демонструє значні перспективи застосування в різних галузях, певні проблеми, пов'язані з його впровадженням та оптимізацією, залишаються невирішеними. Використання ВСМ дає змогу отримувати інформацію про розмір, форму та орієнтацію виявлених дефектів, ґрунтуючись на амплітудному значенні сигналів котушок. Проте комплексна взаємодія факторів,

Лисенко Ю.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-9110-6684>, Куц Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>, Мірчев Й. – <https://orcid.org/0009-0002-4882-5282>, Левченко О.Е. – <https://orcid.org/0000-0002-3914-1818>, Глабець С.М. – <https://orcid.org/0009-0004-2740-9209>

© Ю.Ю. Лисенко, Ю.В. Куц, Й. Мірчев, О.Е. Левченко, С.М. Глабець, 2024

включаючи розмір масиву перетворювачів, його геометрію, властивості матеріалу та параметри контролю, вимагає комплексної оцінки їх впливу [9].

Сукупний аналіз інформативних параметрів сигналів ВСМ – амплітуди та фази гармонічних сигналів – дасть змогу точніше характеризувати природу дефектів і підвищити достовірність прийняття рішень в автоматизованих системах вихрострумової дефектоскопії. Крім того, значні обсяги отриманої за допомогою ВСМ вимірювальної інформації у формі цифрових даних доцільно обробляти та аналізувати за допомогою передових інформаційних технологій, включаючи штучний інтелект, що може покращити аналіз та інтерпретацію даних, підвищуючи ефективність і надійність контролю [10, 11]. Також це дасть змогу кількісно оцінювати характеристики дефектів і полегшить прийняття обґрунтованих рішень щодо стратегій прийнятності подальшої експлуатації чи відновлювального ремонту критично важливих елементів конструкцій [12].

Метою роботи є дослідження ефективності технології ВСМ у дефектоскопії за допомогою запропонованого безрозмірного коефіцієнта ефективності, який враховує час перевірки, надійність і чутливість, а також експериментальне тестування технології МВСК на матеріалах зі штучними дефектами з відомими характеристиками.

Теоретичне обґрунтування коефіцієнта ефективності ВСМ. Аналіз переваг застосування ВСМ показав, що, порівняно з традиційними перетворювачами, ця методологія забезпечує підвищену чутливість до виявлення малих дефектів, скорочення загального часу контролю та підвищену ймовірність виявлення дефектів різних типів [13, 14]. Враховуючи це, ефективність застосування ВСМ у дефектоскопії запропоновано оцінювати безрозмірним коефіцієнтом, що визначається за формулою:

$$k_{ef} = k_t k_p k_s \quad (1)$$

де k_t , k_p , k_s - відносні коефіцієнти, що характеризують скорочення часу контролю, підвищення достовірності контролю та покращення чутливості засобу контролю відповідно. Якщо крім виявлення дефекту виконується оцінювання конкретного параметра дефекту (наприклад довжина, глибина або глибина тріщини), то коефіцієнт (1) може бути доповнений множником, що характеризує підвищення точності оцінки цього параметра.

Коефіцієнт k_t визначається відносним скороченням часу дослідження ОК за формулою:

$$k_t = \frac{T_{ВСП}}{T_{ВСМ}}, \quad (2)$$

де $T_{ВСП}$, $T_{ВСМ}$ - сумарний час контролю з використанням традиційного одиночного вихрострумового перетворювача (ВСП) і ВСМ відповідно.

Для оцінювання часу контролю необхідно врахувати тривалість руху одиночним ВСП і ВСМ вздовж траєкторії сканування поверхні ОК [8]. Припустимо, що: 1) поперечний розмір (вздовж координати y) ділянки контролю збігається з поперечним розміром ВСМ, вздовж якого розміщено сенсори (рис. 1); 2) ВСМ переміщується лише вздовж координати x , тоді як для покриття такої площі поверхні ОК потрібно переміщати ВСП як вздовж координати x , так і вздовж координати y . У цьому випадку значення часових інтервалів $T_{ВСП}$, $T_{ВСМ}$ визначаються виразами:

$$T_{ВСП} = mn(t_n + t_b), \quad (3)$$

$$T_{ВСМ} = m t_n + nm t_b, \quad (4)$$

де t_n , t_b - час, необхідний для переміщення ВСП або ВСМ відповідно в наступну точку позионування та для виконання вимірювань в одній точці; m , n - кількість точок вимірювання на поверхні ОК по осях x та y відповідно.

Оскільки за прийнятих припущень кількість ліній сканування ВСП дорівнює кількості елементів у масиві (n), а $T_n \gg T_b$, то коефіцієнт (2) можна наближено представити виразом:

$$k_t \approx n. \quad (5)$$

Коефіцієнт k_p може бути визначений як відношення ймовірностей виявлення дефекту певного типу та розміру в процесі використання ВСП ($P_{ВСП}$) і ВСМ ($P_{ВСМ}$) за формулою:

$$k_p = \frac{P_{ВСМ}}{P_{ВСП}}. \quad (6)$$

Цей коефіцієнт доцільно визначити експериментально з використанням тестових зразків зі штучними або природними дефектами за умови, що параметри збудження електромагнітного поля вихрових струмів і коефіцієнти підсилення вимірювальних каналів однакові для ВСП і ВСМ.

Коефіцієнт k_s можна визначити як відношення абсолютних чутливостей $S_{ВСП}(l)$ і $S_{ВСМ}(l)$ при виявленні дефекту певного типу в діапазоні зміни розміру його параметра Δl за формулою:

$$k_s = \frac{S_{ВСМ}(\Delta l)}{S_{ВСП}(\Delta l)}, \quad (7)$$

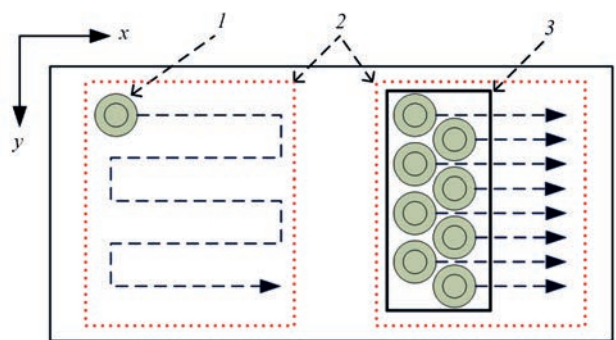


Рис. 1. Траєкторії сканування ВСП і ВСМ по поверхні ОК: 1 – ВСП; 2 – область сканування; 3 – ВСМ

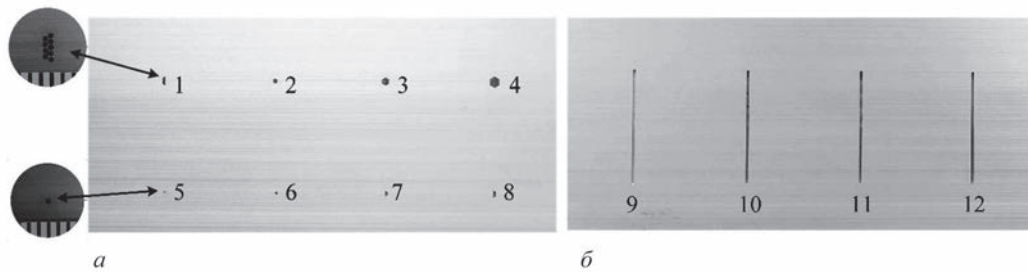


Рис. 2. Зразок зі сплаву АД31Т5: 1–12 – дефекти різних типів і розмірів

де параметр l – конкретний параметр дефекту (довжина, глибина залягання, глибина тріщини тощо).

Останній коефіцієнт також повинен визначатися за умови однакових для обох перетворювачів параметрів збудження електромагнітного поля вихрових струмів і коефіцієнтів підсилення вимірювальних каналів. До прикладу, якщо використовується амплітудний метод виявлення дефектів, а тестовий зразок має два дефекти з розмірами $l_1, l_2 \in \Delta l$, $l_1 < l_2$ і ці дефекти викликають у перетворювачах сигнали амплітудами $U_{\text{ВСМ}}(l_1)$, $U_{\text{ВСМ}}(l_2)$ та $U_{\text{ВСП}}(l_1)$, $U_{\text{ВСП}}(l_2)$, чутливості перетворювачів визначатимуться як:

$$S_{\text{ВСМ}}(\Delta l) = \frac{U_{\text{ВСМ}}(l_2) - U_{\text{ВСМ}}(l_1)}{l_2 - l_1},$$

$$S_{\text{ВСП}}(\Delta l) = \frac{U_{\text{ВСП}}(l_2) - U_{\text{ВСП}}(l_1)}{l_2 - l_1}, \quad (8)$$

а коефіцієнт (7):

$$k_s = \frac{U_{\text{ВСМ}}(l_2) - U_{\text{ВСМ}}(l_1)}{U_{\text{ВСП}}(l_2) - U_{\text{ВСП}}(l_1)}, \quad l_1, l_2 \in \Delta l. \quad (9)$$

Отже, для комплексної оцінки скорочення часу контролю, підвищення достовірності контролю та його чутливості запропонований безрозмірний коефіцієнт цілком придатний для визначення ефективності застосування ВСМ.

За неможливості експериментального отримання складових коефіцієнта k_p , k_s вони можуть бути прийняті рівними одиниці, а наближене значення $k_{\text{еф}}$ може бути оцінено як $k_{\text{еф}} \approx k_t$.

Експериментальні дослідження. Використані матеріали та прилади. Для проведення досліджень було підготовлено зразок із алюмінієвого сплаву 31Т5 (АД31Т5), що широко використовується в авіаційній промисловості. Цей зразок має штучно створені дефекти різної конфігурації та розмірів (рис. 2, а, б) і має розміри: 360 мм завдовжки, 120 мм завширшки та 5 мм завтовшки. У тестовому зразку поздовжні дефекти мають ширину 1 мм і глибину 1...4 мм. Крім цього, на поверхні зразка присутні дефекти, що являють собою скупчення різної кількості отворів (рис. 2, а) і тріщини різної глибини (рис. 2, б). Отвори мають глибину 4 мм і діаметр 0,5 мм кожний та розташовані у різній кількості та у безпосередній

близькості один від одного. Проте, деякі розміри сформованих таким чином дефектів можуть бути занадто малими для адекватного контролю за допомогою використовуваної у дослідженні ВСМ.

У даному дослідженні використовувався вихрострумний дефектоскоп Olympus Omniscan МХ з ВСМ (рис. 3), яка належить до категорії гнучких датчиків і виготовляється з плівки за технологією друкованої плати [15]. З метою підлаштування до досліджуваної поверхні датчик має можливість встановлення на основу з необхідною кривизною. ВСМ складається з 32 котушок, кожна з яких має діаметр 3 мм.

Дефектоскоп реалізує мультиплексування окремих елементів матриці для запобігання взаємному впливу сусідніх елементів, а його спеціальне програмне забезпечення дозволяє формувати С-скани сигналів та одночасно відображати сигнали у вигляді годографів.

Методика досліджень та обговорення результатів. Результати сканування у вигляді С-сканів поверхні досліджуваного зразка представлені на рис. 4 (для зручності результати сканування розбиті на три зони та використано нумерацію дефектів згідно з рис. 2). У проведеному експерименті використовувалися наступні нала-

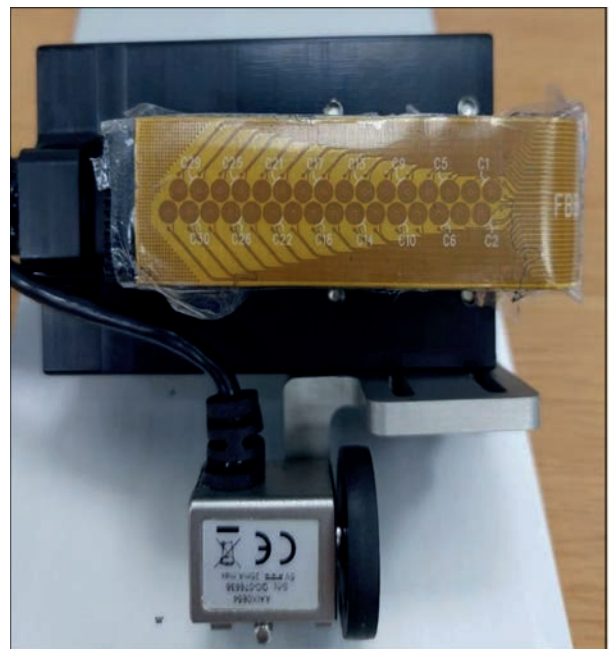


Рис. 3. Використана в досліді вихрострумова матриця

штування: робочі частоти 80, 160, 320 кГц, амплітуда сигналу на котушках збудження 1 В, підсилення сигналу в каналі вимірювання 78 дБ.

Для адекватної інтерпретації та порівняння результатів контролю було підбрано рівень чутливості в 78 дБ, який задовольняв (за амплітудною шкалою) усі режими сканування ОК і надавав чітку візуалізацію (видимість) дефектів. Збільшення чутливості підвищує ризик помилкових спрацьовувань через вищий рівень шуму та може призвести до того, що дефекти будуть пропущені, а бездефектні ділянки ОК будуть прийняті як дефектні [16].

Кількісну оцінку параметрів дефектів можна отримати за амплітудами сигналів після проходження ВСМ через дефектну ділянку. Отримані значення амплітуд сигналів дефектів зведені в табл. 1.

На рис. 4, а, б показані результати сканування ділянки ОК з різною кількістю отворів. Аналіз ре-

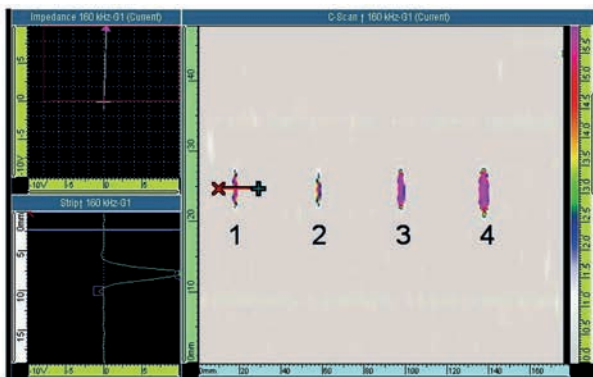
зультатів їх сканування свідчить, що найвища чутливість досягається на частоті 320 кГц, але якщо врахувати взаємне розташування отворів в одному скупченні (наприклад, дефекти 2 і 8 мають у своєму складі однакову кількість отворів, але відрізняються їх взаємним розташуванням), то частота 80 кГц дає різницю в амплітуді більше 600 мВ, але зі збільшенням частоти вплив геометрії стає менш помітним за амплітудою. Так, дефект 2 на частотах 160 і 320 кГц характеризується однаковою величиною амплітуди.

З наведених даних можна зробити наступні висновки. По-перше, сигнали від дефектів 9–12, які відрізняються глибиною штучних дефектів, на кожній з частот практично не відрізняються за амплітудами. Такий результат відповідає теоретичним очікуванням, оскільки глибина проникнення вихрових струмів в алюміній на частоті 80 кГц за питомої електропровідності алюмінію ~ 36 МСм/м становить $\sim 0,3$ мм, а мінімальна глибина дефектів 9–12 становить 1 мм. По-друге, для дефектів 1–8 (рис. 2) спостерігається певна залежність амплітуди сигналів дефектів від їх розмірів і сукупної площі (форми).

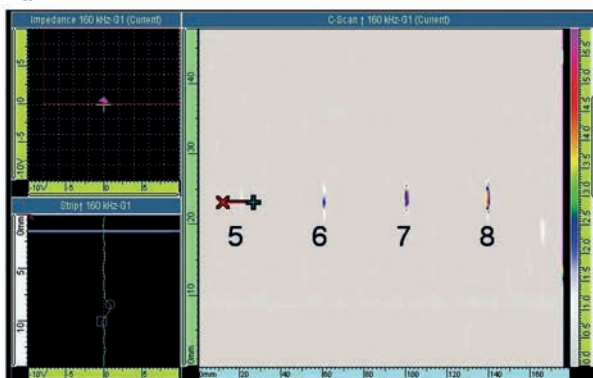
Для детальнішого аналізу цієї залежності виділимо підгрупу однотипних дефектів у вигляді протяжних сукупностей отворів. До цієї групи належать дефекти 1, 6, 7, 8. Значення амплітуд сигналів цих дефектів, упорядковані в порядку зростання розміру дефекту (чи кількості отворів n) для різних робочих частот представлені в табл. 2 та на рис. 5.

Аналізуючи отримані графіки можна дійти таких висновків.

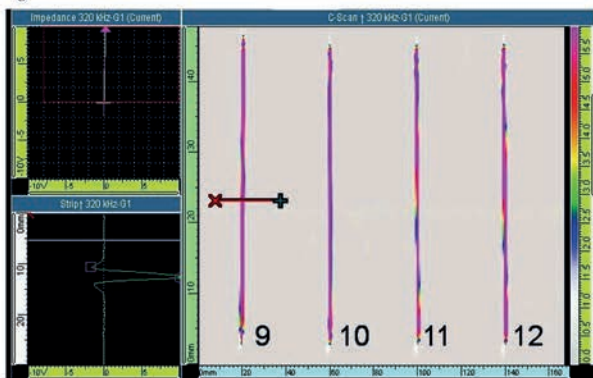
1. На робочих частотах не менше 80 кГц перетворювач здатний виявляти дефекти, менші за розміри котушок ВСМ (діаметр котушок становить 3 мм). Наприклад, від дефекту 6 протяжністю $\sim 1,1$ мм отримано сигнал амплітудою не менше 1 В, що свідчить про високу чутливість перетворювача до дефектів малих розмірів.



а



б



в

Рис. 4. Графічне відображення на екрані дефектоскопа Olympus Omniscan MX результатів сканування ОК

Таблиця 1. Дані експериментального дослідження ОК

Номер дефекту	Параметр дефекту	Розмір, мм	Амплітуда сигналу від дефекту, В		
			80 кГц	160 кГц	320 кГц
1	довжина	2,9	4,6	10,6	10,6
2		1,7	2,7	7,9	7,9
3		2,9	5,7	10,7	10,8
4		4,1	7,5	10,9	10,9
5		0,5	0,02	1,1	1,6
6		1,1	1,0	2,7	4,3
7		1,7	2,0	6,2	10,3
8		2,3	3,4	8,3	10,5
9	глибина	1,0	7,7	11,3	11,6
10		2,0	7,8	11,8	11,9
11		3,0	7,9	12,0	12,3
12		4,0	8,0	12,3	12,4

Таблиця 2. Експериментальні дані дослідження дефектів ОК, упорядковані за розмірами дефектів

Номер дефекту	Кількість отворів n у дефекті/протяжність дефекту, мм	Амплітуда сигналу від дефекту за різних робочих частот, В		
		80 кГц	160 кГц	320 кГц
6	3/1,1	1,0	2,7	4,3
7	5/1,7	2,0	6,2	10,3
8	7/2,3	3,4	8,3	10,5
1	9/2,9	4,6	10,6	10,6

2. Представлені залежності на частотах 80 і 160 кГц близькі до лінійних, що дає підстави для їх використання для кількісного оцінювання розмірів дефектів. Проте попередньо слід прийняти рішення про належність дефектів до певного класу, оскільки для різних класів і частот будуть мати місце різні функціональні залежності.

3. Зі збільшенням робочої частоти збільшується й чутливість перетворювачів, але разом з цим зменшується діапазон. Наприклад, на частоті 320 кГц цей діапазон обмежений значенням $\sim 1,1$ мм. Проте з'являється більша можливість розширити його в область дефектів менших розмірів.

Отже, для дефектів 1–8 існує певна залежність амплітуд сигналів дефектів від їх розміру та площ (форми сукупності отворів) (рис. 2, а). Очевидно, для детальнішого аналізу цієї залежності доцільно виділити підгрупу дефектів, які є однотипними за формою скупчень отворів. До цієї підгрупи слід віднести дефекти 1, 6, 7 і 8 з довжиною по вертикалі 2,9; 1,1; 1,7 та 2,3 мм відповідно. Порівнюючи значення сигналу для цих дефектів, видно, що для дефекту 6 завдовжки $\sim 1,1$ мм отримано сигнал з амплітудою не менше 1 В, що свідчить про високу чутливість ВСМ до дрібних дефектів за заданих налаштувань сканування.

Також на рис. 4, б видно, що колірне представлення дефектів 5 і 6 є найменш помітним за вказаних налаштувань сканування. Виявлення дефекту 5, який представлений одним отвором діаметром

0,5 мм, є складним без попереднього налаштування та калібрування ВСМ, що вказує на необхідність ретельнішого вибору режиму сканування для дефектів такого розміру.

На рис. 4, в показані результати сканування ділянки ОК з тріщинами різної глибини. Згідно з результатами (табл. 1), найвища чутливість отримана на частоті 160 кГц. Виходячи з експериментальних даних можна припустити, що збільшення глибини тріщини на 0,1 мм призведе до зміни напруги приблизно на 30...33 мВ, що є придатним для вимірювання з урахуванням можливостей дефектоскопа.

Коефіцієнт ефективності використання ВСМ за умови $k_p \approx k_s \approx 1$ визначається виражем у скороченні часу отримання вимірювальної інформації: $k_{\text{эф}} \approx k_t = n = 32$.

У цілому, результати проведених експериментів підтвердили високу продуктивність та ефективність технології ВСД на основі використання ВСМ і разом з цим дали можливість виявити обмеження та слабкі місця цієї технології, що потребує проведення подальших досліджень з метою визначення оптимальних режимів роботи таких перетворювачів у різних задачах ВСД та автоматизації даного процесу.

Висновки

Це дослідження підкреслює ключову роль технології ВСМ для контролю виробів з електропровідних матеріалів у багатьох галузях промисловості. У ході досліджень основну увагу було приділено надійності та чутливості контролю, а також оцінюванню продуктивності ВСМ у виявленні дефектів. Було запропоновано безрозмірний коефіцієнт, який дає змогу оцінити зменшення часу контролю, підвищення надійності контролю та чутливості, а також відносно зменшення часу контролю об'єкта, що є прийнятним для визначення ефективності застосування ВСМ.

Експериментальні дані, отримані на ОК з дефектами різних типів, розмірів і орієнтацій, виявили значні переваги ВСМ для вихрострумової дефектоскопії. Використання кількох близько розташованих котушок покращило покриття та чутливість до дефектів малих розмірів у процесі їх виявлення, які могли бути пропущені у випадку використання дефектоскопів із традиційними одноелементними ВСП. Сканування ОК і збір даних за один прохід ВСМ зі значної ділянки його поверхні дає змогу зменшити час контролю та спростити механічну частину засобів автоматизованого вихро-

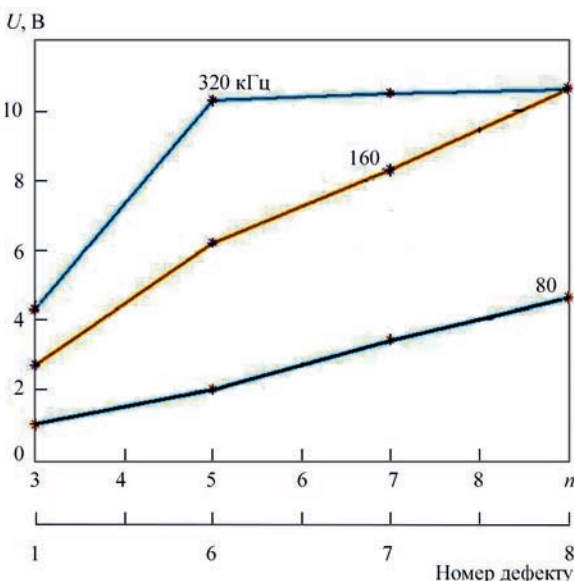


Рис. 5. Графіки залежності амплітуд сигналів дефектів 1, 6, 7, 8 від їх розміру та робочої частоти

струмового контролю, що є суттєвим у випадку виконання досліджень об'єктів значних розмірів.

Удосконалення технології ВСК із використанням ВСМ здатне призвести до розширення функціональних можливостей цього виду контролю та покращення технічних характеристик засобів контролю, що сприятиме підвищенню безпеки та надійності експлуатації критично важливих конструкцій і механізмів різного призначення.

Подяки

Дана робота була виконана за підтримки гранту № BG05M20P001-1.002-0011 «Створення та розвиток Центру компетенцій у галузі мехатроніки та чистих технологій MIRACle (мехатроніка, інновації, робототехніка, автоматизація, чисті технології)», фінансованого Операційною програмою «Наука та освіта для розумного зростання» (2014–2020) та співфінансованого Європейським Союзом через Європейські структурні та інвестиційні фонди.

Список посилань/References

- Hellier, C. (2001) *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill.
- Ahmad, A., Bond, L.J. (2002) *Non-Destructive evaluation and quality control*. Vol. 17. ASM International.
- Uchanin, V.M., Lutcenko, G.G., Opanasenko, A.V. (2023) Automated EDDY current inspection systems with surface probe of double differential type. *The Paton Welding J*, **5**, 48–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.08>
- ASTM International (2017) *ASTM E2884 – 17 Guide for eddy current testing of electrically conducting materials using conformable sensor arrays*.
- EN ISO 20339:2017 *Non-destructive testing – Equipment for eddy current examination – Array probe characteristics and verification* (ISO 20339:2017).
- Lysenko, I., Kuts, Y., Uchanin, V. et al. (2023) Problems of using eddy current arrays NDT. In: Pawelczyk M, Bismor D, Ogonowski S, Kacprzyk J, editors. *Advanced, Contemporary Control. PCC 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 708, pp. 287–293. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35170-9_27
- Allard, AM., Grenier, M., Sirois, M., Wassink, C. (2021) *Understanding eddy current array for high-performance inspections*. Materials Evaluation. DOI:<https://doi.org/10.32548/2021.me-04226>
- Lamarre, A. (2015) *Eddy current array technology serves a variety of industries*. Quality magazine. [11.07.2024]. <https://www.qualitymag.com/articles/92427-eddy-current-array-technology-serves-a-variety-of-industries>
- Куч Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю. та ін. (2021) Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Частина 2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **4**, 11–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01>
- Kuts, Yu.V., Uchanin, V.M., Lysenko, Yu.Yu. et al. (2021) Application of Hilbert transform for analysis of signals of automated eddy current inspection. Part 2. Deriving secondary diagnostic features and examples of realization. *Tekhn. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **4**, 11–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01>
- Deng, Y., Liu, X. (2011) Electromagnetic imaging methods for nondestructive evaluation applications. *Sensors*, **11**(12), 11774–11808. DOI:<https://doi.org/10.3390/s111211774>
- Mook, G., Michel, F., Simonin, J. (2011) Electromagnetic imaging using probe arrays. *J. of Mechanical Engineering*, **57**(3), 227–236. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.173>
- Lysenko, I., Kuts, Y., Uchanin, V. et al. (2024) Evaluation of eddy current array performance in detecting aircraft component defects. *Transactions on Aerospace Research*, **2024**(2), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0007>
- Uchanin, V.M. (2023) Surface EDDY current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems. *The Paton Welding J*, **2**, 46–55. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.02.07>
- Mook, G., Michel, F., Simonin, J. (2008) Electromagnetic imaging using probe arrays. Proc. of 17th World Conf. on Nondestructive Testing, Shanghai. www.ndt.net. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.173>
- Sun, Z., Cai, D., Zou, Ch. et al. (2017) Design and optimization of a flexible arrayed eddy current sensor. *Measurement Science and Technology*, **28**(4), 8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5b76>
- Ma, Q., Gao, B., Tian, G.Y. et al. (2020) High sensitivity flexible double square winding eddy current array for surface micro-defects inspection. *Sensors and Actuators A: Physical*, **309**, 111844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111844>

EFFECTIVENESS OF THE TECHNOLOGY OF AUTOMATED EDDY FLAW DETECTION WITH MATRIX CONVERTERS

Ju.Ju. Lysenko¹, Ju.V. Kuts¹, J. Mirchev², O.E. Levchenko¹, S.M. Glabets³

¹NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: j.lysenko@kpi.ua, y.kuts@ukr.net

²Institute of Mechanics of Bulgarian Academy of Sciences. Acad. G. Bontchev St., bl. 4 1113 Sofia, Bulgaria.

E-mail: mirchev@imbm.bas.bg

³Laboratory of SC LLC «SPF «Diagnostychni prylyady». 103 Patiotyv Str., 03061, Kyiv. E-mail: s.glabets@gmail.com

The effectiveness of application of matrix converter method at eddy current testing (ECT) is studied in the work. Advantages of eddy current matrix application are analyzed, which include improvement of sensitivity to small defects, shortening of the total control time and improvement of the probability of detection of various types of defects. To evaluate their effectiveness, a dimensionless coefficient is proposed, which takes into account the inspection time, the reliability of defect detection, and the sensitivity to defects of a certain size. Experimental studies on samples with artificially induced defects of different dimensions, types and orientation confirmed the rationality of application of this coefficient for testing parameter optimization, in order to improve defect detection in structural elements. The influence of various factors, such as condition of the surface, sensor configuration in the matrix and verification parameters on the productivity of ECT hardware and software with matrix converters was additionally analyzed. Obtained results will promote better understanding of the possibilities and limitations of matrix application in ECT of the components of transport, aviation and military equipment. It will allow optimizing the strategies of checking the controlled products, improving the reliability of defect detection and general maintenance practices in many industries. 16 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: automated eddy current control, converter matrix, effectiveness, mathematical modelling, flaw detection, signal processing, numerical methods

Отримано 31.07.2024

Отримано у переглянутому вигляді 30.08.2024

Прийнято 30.09.2024

СУЧАСНІ РІВНІ ОЦІНКИ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ ТА АЛГОРИТМ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ РИЗИК-АНАЛІЗУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗВАРНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

В.М. Тороп

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

Розглянуто три рівні оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій для побудови системи управління цілісністю. Рівень 1 використовує критерії граничного стану зварних металоконструкцій на основі коефіцієнтів запасу міцності та реалізується нами за допомогою двокритеріального підходу. Рівень 2 імовірнісного аналізу безпеки та надійності передбачає формулювання та оцінку значень імовірнісних показників, що використовуються для оцінки конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій при невизначеності та відсутності повноти вхідних даних. Для рівня 3 ризик-аналізу експлуатації зварних металоконструкцій запропоновано алгоритм його реалізації та прописаний варіант впровадження у вигляді системи управління цілісністю. Двокритеріальна діаграма оцінки руйнування є основою реалізації всіх трьох рівнів. Бібліогр. 14, рис. 6.

Ключові слова: ризик, імовірність руйнування, наслідки, двокритеріальна діаграма оцінки руйнування, імовірнісний аналіз безпеки, матриця ризику, система управління цілісністю

Вступ. Сучасні високоефективні діагностичні засоби, наприклад технології внутрішньотрубною діагностики, дозволяють виявити та ідентифікувати тисячі й навіть сотні тисяч дефектів, що контролюються на магістральному трубопроводі. Після проведення внутрішньотрубною діагностики постає питання про класифікацію дефектів за ступенем їх впливу на надійну та безпечну експлуатацію. Необхідно розробити раціональну та обґрунтовану процедуру для проведення покращувальних заходів (ремонт, перегляд регламенту експлуатації тощо), планування наступних інспекцій (із визначенням їх термінів та об'ємів), виділити ділянки, які необхідно відремонтувати в першу чергу. Оскільки в експлуатації залишається значна кількість дефектів, які можуть кваліфікуватись як допустимі, говорити про абсолютну надійність такої конструкції мабуть не доречно. За таких обставин конструкція буде завжди мати певну ймовірність руйнування. У свою чергу ймовірність руйнування слід розглядати в поєднанні з такою важливою характеристикою, як наслідки руйнування, що вимагають експертних оцінок. Очевидно, що за однієї й тієї ж імовірності руйнування наслідки руйнування трубопроводу першого контуру енергоблоку атомної електростанції (АЕС) і трубопроводу нафтопереробного заводу будуть різними. Таким чином, для різних елементів конструкцій в рамках розгляду одного об'єкту слід оперувати різними рівнями надійності. Добуток імовірності руйнування на показник наслідків руйнування визначає ризик, що може викорис-

товуватись як універсальне мірило надійності та ефективності експлуатації об'єкта.

Імовірнісний ризик-аналіз, як правило, виконується для потенційно небезпечних виробництв, хімічних і техногенно-небезпечних технологічних процесів, для оцінок надійності атомних електростанцій та їх обладнання, а також в аерокосмічній галузі. Є дві причини, які дещо стримують впровадження ідеології ризик-аналізу: по-перше, низка факторів, що може викликати відмову або аварію, є настільки широкою, що вимагає комп'ютерної паспортизації об'єктів, кваліфікованої обробки статистичного матеріалу та оперування різними законами розподілу випадкових величин для отримання достовірних оціночних даних надійності, і, по-друге, більшість покращувальних заходів, спрямованих на підвищення безпеки об'єкту, що ґрунтуються на застарілих методах діагностики, можуть бути ефективними й без знання істинного ризику, пов'язаного з експлуатацією об'єкта. Останній підхід має право на існування, але він повинен бути методичною складовою загальної стратегії управління надійністю та ефективністю (у тому числі економічною) відповідальних об'єктів з досить переконливим обґрунтуванням їх використання.

Значна активність, що спостерігається в світі в галузі забезпечення надійності технічних систем і впровадження ідеології ризик-аналізу [1], викликана, з одного боку, конкуренцією – оптимізацією технологічного процесу в бік зменшення його затратності, а з іншого – жорсткішими правилами безпеки, що встановлюються державними контро-



Рис. 1. Сучасні рівні оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій

люючими органами (регулятором, наприклад Державною інспекцією з ядерної та радіаційної безпеки України, Держгірпромнаглядом тощо).

З вищерозглянутого випливає, що в загальному випадку необхідно користуватися трирівневим підходом до оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій: посудин тиску, мостів, балонів, резервуарів, трубопроводів і т. і. (рис. 1).

Рівень 1 використовує критерії граничного стану зварних металоконструкцій на основі коефіцієнтів запасу міцності (КЗМ) і передбачає формулювання та використання традиційних детерміністичних показників конструкційної міцності з визначенням критеріїв граничного стану при крихкому, квазікрихкому та в'язкому руйнуванні. На цьому рівні ми рекомендуємо використовувати двокритеріальний підхід, а саме двокритеріальну діаграму оцінки руйнування (ДОР) та її розгортки [2]. На рис. 2, а наведено модифіковану ДОР, гранична крива якої використовується як критерій руйнування магістральних трубопроводів з дефектами [3]. Особливістю запропонованої нами ДОР та її температурно-навантажувальної розгортки (рис. 2, б) є використання в явному вигляді точки T_x – критичної температури крихкості (КТК), що відмежовує зону крихких руйнувань від квазікрихких та однозначно визначається координатами точки Б на ДОР у наступний спосіб: $B(1; \xi = 0,8 P_n^T / P_n^B)$ (рис. 2, а). Абсциса точки квазікрихко-в'язкого переходу В, що відповідає T_B – температурі в'язкості, на рис. 2, б визначається з умови досягнення руйнівним навантаженням граничного значення P_n^B . Ордината точки В за наявними експериментальними даними відповідає значенню $\mu = \frac{K_I}{K_{IC}} \approx 0,6...0,7$. Як видно з рис. 2, а,

при $K_r = \frac{K_I}{K_{IC}} < \mu$ реалізується критерій в'язкого руйнування: $S_r = 1$ або $P = P_n^B$, де P – узагальнене

прикладене до ЕКЗТ навантаження.

ДОР, яка у загальному випадку являє собою деяку граничну область II, відокремлює область безпечної експлуатації елемента конструкції з тріщиною (ЕКЗТ) I за допомогою використання допустимих КЗМ k , від області руйнування III. В області II виділимо граничну лінію АБВГ для того, щоб, по-перше, спростити та виконати інженерну оцінку граничного стану елемента конструкції з тріщиною, по-друге, мати можливість прогнозувати крихкий (промінь 01 перетинає ділянку АБ граничної лінії ДОР на рис. 2, а), квазікрихкий або змішаний (промінь 02 перетинає ділянку БВ граничної лінії ДОР на рис. 2, а) та в'язкий (промінь 03 перетинає ділянку ВГ граничної лінії ДОР на рис. 2, а) характер руйнування.

Зеленим кольором на рис. 2, а виділено допустимо область I експлуатації ЕКЗТ, що визначається з урахуванням допустимого КЗМ k . Допустимий КЗМ за критерієм статичної міцності є нормованою величиною, що регламентується стандартами, нормами, правилами, нормативно-технічною документацією тощо. Так, для відповідального обладнання АЕС [4] $k = 2,5$, а для магістральних трубопроводів k встановлюється у відповідності до СНиП 2.05.06-85 [5]:

$$k = \frac{0,9 \cdot k_1 \cdot k_H}{m} \quad (1)$$

де m – коефіцієнт умов роботи; k_1 – коефіцієнт надійності за матеріалом; k_H – коефіцієнт надійності за призначенням.

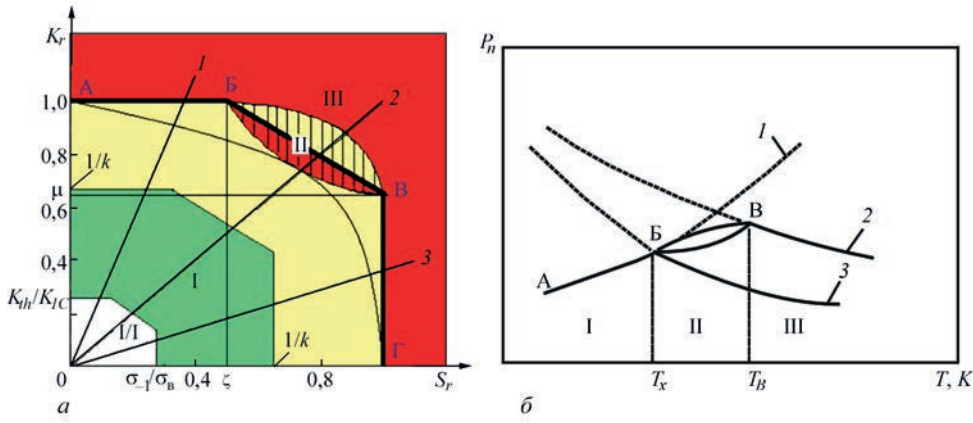


Рис. 2. Двокритеріальна ДОР (а): $S_r = \frac{P_1}{P_n^B} \cdot \xi = 0,8 \frac{P_n^T}{P_n^B}$ та її навантажувально-температурна розгортка (б): 1 – $P_n^x(K_{1C})$; 2 – $P_n^B(\sigma_B)$; 3 – $P_n^T(\sigma_T)$

Жовтим кольором на рис. 2, а виділено зону дії КЗМ II, що вимагає застосування відповідних покращувальних заходів щодо можливості подальшої безпечної експлуатації даного ЕКЗТ і відповідає субкритичному контрольованому підростанню тріщини, а червоним – недопустиму зону III експлуатації ЕКЗТ.

Білим кольором на рис. 2, а виділено область «шумів» IV, що визначається координатами

$$K_r = \frac{K_{th}}{K_{IN}} \text{ та } S_r = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}, \text{ де } K_{th} - \text{порогове значення}$$

коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) при циклічному навантаженні; σ_{-1} – границя втоми. Ця область відповідає стадії зародження та розвитку дефектів за механізмом втоми до розмірів, що контролюються законами механіки руйнування.

Рівень 2 імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) та надійності передбачає формулювання та оцінку значень імовірнісних показників $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ у вигляді математичного очікування $M(F, [R])$ та середньоквадратичного відхилення $C(F, [R])$ узагальненого стохастичного навантаження (прикладені навантаження), розкиду замірів геометрії конструктивних елементів та інтерпретації (схематизація, класифікація, опис геометрії та місця залягання) дефектів, що виявляються засобами неруйнівного контролю та розкиду експериментальних даних механічних властивостей і характеристик тріщиностійкості матеріалів та їх зварних з'єднань.

У загальному випадку функція граничного стану металоконструкції $g(\bar{x})$ може бути виражена у вигляді:

$$g(\bar{x}) = [R] - F(\bar{x}), \quad (2)$$

де $[R]$ – узагальнений стохастичний опір руйнуванню, що характеризується допустимими параметрами, які визначаються механічними властивостями та характеристиками тріщиностійкості з урахуванням нормованих коефіцієнтів запасу міцності (КЗМ); $F(\bar{x})$ – максимальні, еквівалент-

ні щодо вибраних критеріїв міцності, стохастичні параметри напруженого стану конструкції, що встановлені за допомогою побудови розрахункової моделі та аналізу невизначеності.

Тоді ймовірність руйнування металоконструкції, як ілюструє рис. 3, обчислюється рівнянням:

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_{[R], F(\bar{x})}([R], F(\bar{x})) dR dF(\bar{x}) \quad (3)$$

У якості інтегральної функції для показників надійності експлуатації металоконструкцій RN^* можуть виступати [9, 10]:

- математичне очікування та середньоквадратичне відхилення відповідних показників надійності металоконструкції ($M(F, [R])$ і $C(F, [R])$ відповідно);

- імовірність того, що значення відповідного показника надійності R не буде нижче заданого (нормативного) значення R_3 . Позначимо цей імовірнісний показник як $P(R \geq R_3)$

У залежності від цілей дослідження та задач, що вирішуються на основних етапах життєвого циклу елементів конструкцій (проектування, будівництво (ремонт) або експлуатація [7]), на кожний з розглянутих показників $M(F, [R])$, $C(F, [R])$, $P(R \geq R_3)$ можуть бути накладені умови оптимальності або придатності, які ще називають критерієм «придатність за призначенням» [11]. Так, для

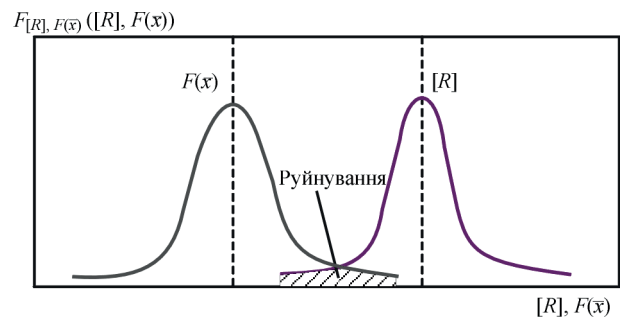


Рис. 3. Імовірність руйнування P_f , що визначається областю перетинання параметрів напруженого стану конструкції $F(\bar{x})$ з узагальненим стохастичним опором руйнуванню $[R]$

показника $P(R \geq R_3)$ критерій придатності за призначенням має вигляд:

$$P(R \geq R_3) \geq P_r \quad (4)$$

де P_r – гарантована ймовірність того, що значення відповідного показника надійності R не буде нижче нормативного значення R_3 .

В основу побудови алгоритма імітаційної моделі руйнування металоконструкції нами покладено непрямий метод статистичного ймовірнісного моделювання (метод Монте-Карло [8]), що складається з наступних кроків:

1. Відповідно до відомих законів розподілу $f_i(x)$ згенерувати вибірку із реалізацій N : $\overline{XN} = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)_i, i = \overline{1, N}$ випадкових величин x_1, x_2, \dots, x_n , що належать заданій області значень (параметрів, характеристик).

2. Сформульовані реалізації $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)_i, i = \overline{1, N}$, підставити в (2) і отримати відповідну вибірку реалізацій показників надійності $F, [R]$: $RN^* = (F_i, [R])_i, i = \overline{1, N}$.

3. На основі вибірки реалізацій показників надійності $RN^* = (F_i, [R])_i, i = \overline{1, N}$ отримати вибірку оцінювальних значень відповідних імовірнісних показників надійності $(M^*(F, [R]), C^*(F, [R]), P^*(R \geq R_3), \dots)_i, i = \overline{1, N}$.

4. На основі вибірки оцінювальних значень відповідних імовірнісних показників надійності $(M^*(F, [R]), C^*(F, [R]), P^*(R \geq R_3), \dots)_i, i = \overline{1, N}$ зробити висновки щодо конструкційної міцності та істинності значень цих показників.

Реалізація першого кроку спирається на стандартні методи моделювання випадкових величин і векторів з використанням алгоритмічних датчиків випадкових величин [8].

Особливу увагу на другому кроці слід звернути на використання коректної детерміністичної моделі (критерію) руйнування. Ми використовуємо двокритеріальний підхід [2] та розроблені на його основі двокритеріальні діаграми оцінки руйнування.

Реалізація третього кроку заснована на отриманні точкових оцінок імовірнісних показників надійності $(M^*(F, [R]), C^*(F, [R]), P^*(R \geq R_3), \dots)_i, i = \overline{1, N}$ за допомогою вибірки реалізацій детермінованих показників $RN^* = (F_i, [R])_i, i = \overline{1, N}$. Точкові значення оцінок перших двох показників (математичного очікування та середньоквадратичного відхилення) визначаються наступним чином:

$$M^*(F, [R]) = \sum_{i=1}^j \frac{F_i, [R]}{j}, j = \overline{1, N} \quad (5)$$

$$C(F, [R]) = \sqrt{D(F, [R])}, j = \overline{1, N} \quad (6)$$

де $D(F, [R])_j$ – оцінка дисперсії вибірових значень:

$$D(F, [R])_j = \sum_{i=1}^j \frac{(F_i, [R] - M^*(F, [R]))^2}{j}, j = \overline{1, N} \quad (7)$$

Прикладом реалізації рівня 2 для магістральних нафто-, газопроводів може слугувати міжнародний стандарт ISO 16708:2006 [6]. У граничних станах, коли конструкція зазнає додаткових навантажень або втрати якості та порушує стандарти безпеки відповідно до детерміністичного підходу, сам детерміністичний підхід більше не може бути застосований для визначення того, чи є конструкція все ще достатньо безпечною. Граничними станами в цьому контексті є, наприклад, старіння матеріалу, значна корозія та додаткові навантаження, не враховані в початковому проекті.

У цьому випадку можна застосувати ймовірнісний підхід, розраховуючи частоту відмов конструкції. Він був введений приблизно 20 років тому при проектуванні конструкцій. Порівняно з детерміністичним підходом розрахунок частоти відмов є складним процесом. Проблема є встановлення загальноприйнятих обмежень для частоти відмов.

Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) працювала над цим питанням протягом багатьох років і стандарт ISO 16708 «Нафтова та газова промисловість – Системи трубопроводного транспорту – Методи граничного стану, засновані на надійності» [6] часто змінювався в статусі проекту протягом тривалого періоду часу. У 2006 р. він був прийнятий як DIN EN ISO 16708 в якості національного стандарту Німеччини.

Сфера застосування стандарту DIN EN ISO 16708 дозволяє використовувати детерміністичний та ймовірнісний підхід паралельно. Стандарт має високий рівень визнання серед органів влади, експертів і спеціалістів-інженерів.

У сучасній практиці забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд використовується ДБН В.1.2-14:2018 [11], що застосовується при вишукуванні, проектуванні, будівництві та ліквідації будівель і споруд незалежно від їх призначення. Таким чином, рівень 2 ІАБ та надійності застосовується для складних питань невизначностей при створенні баз даних «Об'єкти», «Дефекти», «Навантаження», «Властивості», що необхідні для побудови розрахункової моделі, ідентифікації потенційно небезпечних перерізів зварної металоконструкції та оцінки конструкційної міцності з використанням двокритеріального підходу на основі методу Монте-Карло [8–10].

Рівень 3. На цьому рівні необхідно формулювати та оцінювати вищерозглянуті ймовірнісні

показники конструкційної міцності, надійності та довговічності з гарантованим або довірчим рівнем, що враховують наслідки руйнування [10, 12].

Вибір того або іншого рівня оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності елементів конструкції буде залежати від таких основних чинників, як: важливість конструкції, що оцінюється; етап її життєвого циклу, що розглядається; початкові дані, що використовуються для отримання відповідних оцінок показників і рівень довіри до них.

Для впровадження методології оцінки ризику експлуатації зварних металоконструкцій перш за все треба розробити програму оцінки ризику. Оператор повинен взяти до уваги всі особливості своєї металоконструкції, що працює в певній системі (наприклад, енергоблок атомної електростанції слід розглядати в якості такої системи тощо) та визначитись, який з підходів є найприйнятнішим. Основна мета оцінки ризику полягає в ідентифікації найбільших ризиків в системі так, щоби оператор міг вирішити, як, де і коли здійснити ремонтні та покращувальні заходи, щоб це найефективніше підвищило цілісність металоконструкції вказаної системи. Оператор повинен вирішити, яка інформація може бути корисною для виконання оцінки та як ця інформація має бути застосована, щоб точність і ефективність оцінок були максимальними. Спрощену схему виконання ризик-аналізу показано на рис. 4 [12, 13].

Очевидно, що ризик-аналіз включає в собі три принципові складові – аналіз ризику, що розглядає та аналізує можливість аварій (руйнувань) з їх наслідками; оцінка ризику, що співставляє отриманий ризик з існуючими критеріями його допу-

стимості; управління ризиком, що передбачає та формулює заходи зі зменшення ризику.

Обґрунтована методологія оцінки ризику повинна бути:

Структурованою. Процедури оцінки ризику зазвичай використовують вхідні дані систем моніторингу технічного стану (датчиків, контролерів тощо) або ж формулюються експертами в галузі оцінки міцності, захисту від корозії, зварювання, технологічних процесів виробництва тощо. Проте всі методи оцінки ризику визначають і використовують логічні схеми для того, щоб визначити, як дані, що розглядаються, впливають на ризик у термінах імовірності виникнення аварії чи її потенційних наслідків.

Забезпеченою достатніми ресурсами. Має бути виділено достатнє число персоналу і адекватний час для того, щоб успішно виконати всі етапи та деталізувати аналіз ризику.

Базованою на реальному досвіді. Повинні розглядатись частота і тяжкість наслідків минулих подій (на даній чи подібній зварній металоконструкції), а також розуміння та врахування всіх покращувальних заходів, що мали місце для попередження подібних ситуацій. Методи оцінки ризику повинні враховувати специфічну історію функціонування даної зварної металоконструкції.

Передбачувальною. За своєю природою процедура повинна бути дослідницькою, тобто вона повинна ідентифікувати попередньо не враховані загрози цілісності зварної металоконструкції, мають розглядатись сценарії аварій, які ніколи раніше не відбувались на даній металоконструкції.

Використовувати адекватні дані. Деякі рішення ризик-аналізу є просто суб'єктивними експертними судженнями. Тому адекватні вхідні дані систем моніторингу технічного стану металоконструкції є просто необхідними для прийняття об'єктивніших рішень і оцінок.

Здатною до впровадження зворотного зв'язку. Ризик-аналіз є інтерактивним процесом. Реальні події та вихідні дані щодо стану зварної металоконструкції повинні використовуватись для підтвердження або корекції зроблених припущень.

Перші кроки в процесі оцінки ризику. Загальноприйнятий початок процесу оцінки полягає в утворенні представницької групи експертів компанії для ідентифікації подій чи умов (аналізу ризиків), що можуть призвести до руйнування даної металоконструкції, для оцінки наслідків аварій, а також для визначення заходів, що зменшують ризик для даної металоконструкції. Ця група має включати представників із відділів управління, експлуатації, служби контролю металу, корозії, безпеки, інженерів з будівництва, представників регулятора (наглядових) органів і т.д. Головна

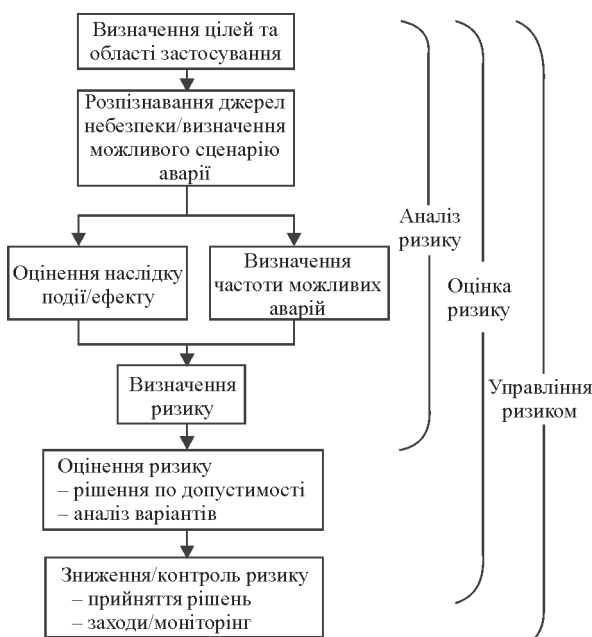


Рис. 4. Спрощена схема ризик-аналізу

мета цієї групи полягає в тому, щоб окреслити та вмонтувати в метод оцінки ризику досвід різних груп експертів так, щоб ці методи могли використовувати досвід та інформацію, які поки що не враховані в базах даних системи управління цілісності (СУЦ) [1, 7, 13, 14].

Для проведення систематичного та повного дослідження можуть використовуватись наступні загальноприйняті методи:

- вільний за формою метод «мозкового штурму» для аналізу потенційних ризиків;
- виконання посегментного аналізу (ділянка за ділянкою) металоконострукції з використанням геоінформаційних систем;
- використання списку структурованих питань, які належать до повного списку можливих загроз і проблем цілісності металоконострукції;
- застосування простих матриць ризику, що в якості прикладу наведені на рис. 5, для якісного опису ймовірності та наслідків можливих подій [1, 13].

Основні компоненти методології оцінки ризику. Оцінка ризику – це процес комбінування оцінок частоти та наслідків аварій в єдину величину ризику. Величина ризику може бути кількісною, якісною чи комбінацією двох у залежності від процедури оцінки чи мети, яку ставить собі оператор при розробці СУЦ [1, 7, 13, 14]. Чутливість і точність методів оцінки ризику є функцією числа змінних, що використовуються, і здатністю визначати зміну ризику вздовж координат зварної металоконострукції.

Деякі методи вимагають від користувача оцінювати ризик на окремих ділянках металоконострукції, використовуючи однорідні характеристики, у той час як інші враховують локальні ефекти зміни умов функціонування. Наприклад, стосовно магістральних трубопроводів це можуть бути значення показників катодного захисту, наявність дефектів, кількість діагностичних аномалій, меха-

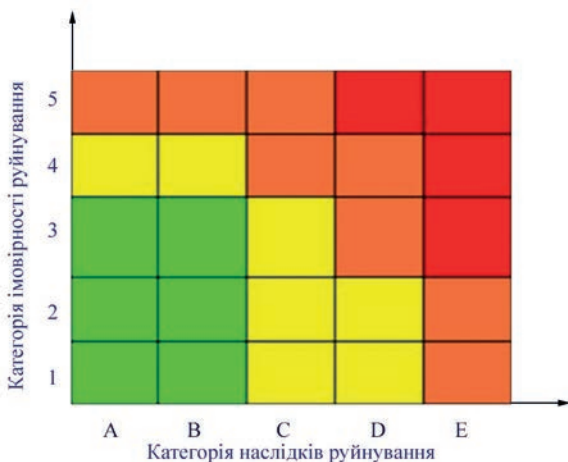


Рис. 5. Матриця ризику [1, 13]

нізми руйнування тощо. У багатьох методах ймовірність події оцінюється з використанням змінних величин і показників, що відносяться до:

- зовнішньої корозії;
- внутрішньої корозії;
- пошкодження третіми сторонами;
- зрушення ґрунту (зсуви, просідання, підробітки ґрунту у районах шахт та ін.);
- проєктні умови та характеристики матеріалу;
- функціонування металоконострукції в системі.

Наслідки оцінюються за допомогою змінних, що відносяться до категорій:

- вплив на оточуюче середовище;
- вплив на населення;
- економічні наслідки.

Чим більше таких змінних використовується, тим кількіснішим є аналіз. Точність кількісного аналізу поглиблюється з подальшою специфікацією змінних (ефект взаємодії з опорами, фундаментом, тип ґрунту, вік (старіння) металоконострукції, якість захисного покриття тощо).

Валідація та ідентифікація ризиків. Незалежно від процесу виконання оцінки ризиків оператор повинен проаналізувати вихідну інформацію, щоб гарантувати, що прийнята методологія дає результати, які загалом відповідають меті аналізу. Це може бути досягнуто за допомогою або спеціаліста з ризик-аналізу, що має досвід в аналізі аналогічних систем, або різнопланової команди спеціалістів з функціонування аналогічних об'єктів діагностики. Якщо отримані результати не відповідають уявленням оператора з реального ризику, він повинен вивчити причини цих розбіжностей і в разі потреби піддати ревізії методи, вхідні допущення або дані.

Після проведення валідації методів оцінки ризику оператор має необхідну інформацію для ранжування ризиків. Сегмент з більшим ступенем ризику повинен отримати більшу пріоритетність при визначенні місць, де слід проводити покращувальні заходи (першочерговість діагностики, ремонту тощо). Щоб зменшити загальний ризик, оператор спочатку має проаналізувати причини появи великого ризику на цьому сегменті. Це може бути викликано або великою ймовірністю події (руйнування), або значними наслідками. Ця інформація є важливою для прийняття рішень щодо об'єму і переліку покращувальних заходів.

Контроль ризику та покращувальні заходи. Методи оцінки ризику є важливим інструментом підтримки оператора для прийняття економічно та технічно обґрунтованих рішень щодо зменшення ризиків їхніх систем. Як тільки ідентифіковано потенціальний ризик і визначено засоби з його зменшення, методи оцінки ризику можуть бути повторно застосовані для визначення вели-

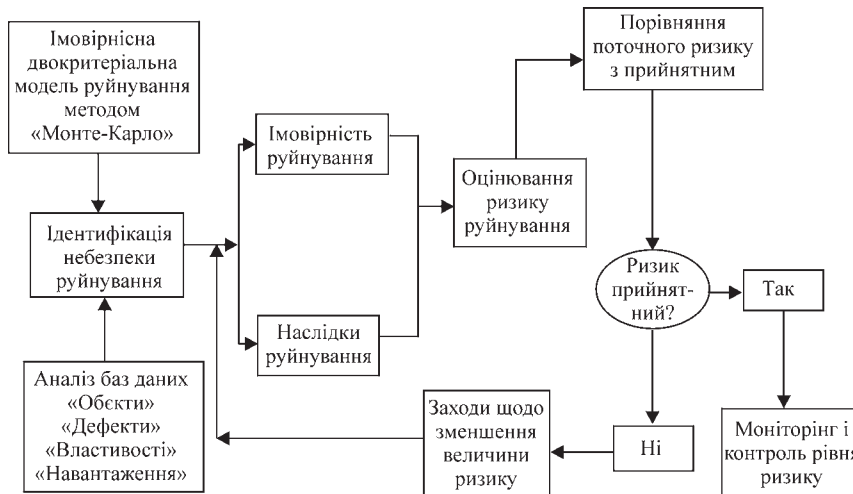


Рис. 6. Алгоритм впровадження методології оцінки ризику зварних металоконструкцій

чин зменшення ризику та отримання матеріальної вигоди. Ці методи можуть постійно застосовуватись при оцінці доцільності запропонованих покращувальних заходів. У комбінації з аналізом затрат на впровадження цих заходів ризик-аналіз дозволяє компанії вибрати найефективніші заходи, що можуть бути застосовані в даний період.

На рис. 6 представлено алгоритм впровадження методології оцінки ризику зварних металоконструкцій, що реалізований нами за допомогою програмно-методичного комплексу (ПМК) «Імовірнісний ризик-аналіз» експертної системи (ЕС) «Міцність» [7, 12].

Висновки

1. Розглянуто три рівні оцінки показників конструкційної міцності, надійності та довговічності зварних металоконструкцій для побудови системи управління цілісністю, в яких використовується двокритеріальна діаграма оцінки руйнування.

2. Запропоновано алгоритм впровадження методології оцінки ризику на основі системи управління цілісністю зварних металоконструкцій.

Список літератури

1. Тороп В.М. (2024) Сучасний стан впровадження методології ризик-аналізу в Україні. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 41–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.02.06>
2. Красовский А.Я., Красико В.Н., Тороп В.М., Орыняк И.В. (1987) Оценка предельной несущей способности тела с трещиной и определение температур хрупко-вязкого перехода в металлах. *Пробл. прочности*, 12, 8–13.
3. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 *Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами.*
4. (1989) ПНАЭ Г-7-002-86 *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.*
5. (1985) СНиП 2.05.06-85 *Магістральные трубопроводы. Строительные нормы и правила.*
6. ISO 16708:2006 *Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Reliability-based limit state methods.*
7. Torop, V.M. (1994) Decision support systems for strength accompaniment of the safe operation of NPP Equipment. *In: Proc. Third Int. Conf. on Material Science Problems in NPP Equipment Production and Operation*, ST. Petersburg, 17–22 June 1994, 3, 740–750.

Proc. Third Int. Conf. on Material Science Problems in NPP Equipment Production and Operation, ST. Petersburg, 17–22 June 1994, 3, 740–750.

8. (1951) *Monte Carlo Method*. Applied Mathematics Series, Vol. 12, National Bureau of Standards, Washington D.C.
9. Тороп В.М. (2005) Імовірнісний ризик-аналіз експлуатації трубопровідних систем, резервуарів та посудин тиску. Повідомлення 1. Основні підходи до побудови імовірнісних моделей. *Пробл. прочности*, 2, 85–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0030-1>
10. Тороп В.М. (2005) Імовірнісний ризик-аналіз експлуатації трубопровідних систем, резервуарів та посудин тиску. Повідомлення 2. Метод оцінки функціональної придатності елемента конструкції за обмеженими статистичними даними. *Пробл. прочности*, 3, 96–103. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0042-x>
11. ДБН В.1.2-14:2018 *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.*
12. Тороп В.М., Тороп О.В. (2004) Реализация риск-анализа в системе обеспечения целостности магистральных трубопроводов. *14-я международная деловая встреча «Диагностика 2004»*, Москва, сс. 81–85.
13. (2016) *Risk based Inspection Technology Codes API 581 Ninth Edition*. American Petroleum Institute (API), Washington, D.C, API Publishing Services.
14. ДСТУ ISO 31000:2014 *Менеджмент ризиків. Принципи та керівні вказівки*. Нова версія від 2018 р. ДСТУ ISO 31000:2018 *Менеджмент ризиків. Принципи та настанови* (ISO 31000:2018, IDT) https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322

References

1. Torop, V.M. (2024) Practice of implementing the methodology of risk analysis of the operation of welded metal structures in Ukraine. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 41–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.02.06> [in Ukrainian].
2. Krasovsky, A. Ya., Krasnyko, V.N., Torop, V.M., Orynyak, I.V. (1987) Estimation of the ultimate bearing capacity of a body with a crack and determination of brittle-viscous transition temperatures in metals. *Problemy Prochnosti*, 12, 8–13 [in Russian].
3. DSTU-N B V.2.3-21:2008 *Main pipelines. Directive. Determination of the residual strength of main pipelines with defects* [in Ukrainian].
4. (1989) PNAE G-7-002-86 *Norms of strength analysis of equipment and pipelines of nuclear power plants* [in Russian].
5. (1985) SNiP 2.05.06-85 *Main pipelines. Building regulations* [in Russian].
6. ISO 16708:2006 *Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Reliability-based limit state methods.*

7. Torop, V.M. (1994) Decision support systems for strength accompaniment of the safe operation of NPP equipment. *In: Proc. of Third Int. Conf. on Material Science Problems in NPP Equipment Production and Operation*, St-Petersburg, 17–22 June 1994, Vol. 3, 740–750.

8. (1951) *Monte Carlo Method*. Applied Mathematics Series, Vol. 12, National Bureau of Standards, Washington D.C.

9. Torop, V.M. (2005) Probability hazard analysis of the operation of pipeline systems, tanks, and pressure vessels. Part 1. Algorithm of construction of the probability model. *Strength of Mater.*, **37**, 174–179. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0030-1>.

10. Torop, V.M. (2005) Probability hazard analysis of the operation of pipeline systems, tanks, and pressure vessels. Part 2. Method for the evaluation of the functional fitness of a structural element according to the restricted statistical data. *Strength of Mater.*, **37**, 298–303. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0042-x>.

11. DBN V.1.2-14:2018 *The fundamental principles of ensuring reliability and constructive safety of life and disputes*.

12. Torop, V.M., Torop, O.V. (2004) Implementation of risk analysis in the system of ensuring the integrity of main pipelines. *In: 14th Int. Business Meeting on Diagnostics 2004*, Moscow, 81–85 [in Russian].

13. (2016) *Risk based Inspection Technology Codes API 581 Ninth Edition*. API, Washington, D.C, API Publ. Services.

14. DSTU ISO 31000:2014 *Risk management. Principles and guidelines*. New version from 2018. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 [in Ukrainian].

MODERN LEVELS OF STRUCTURAL STRENGTH ASSESSMENT AND THE ALGORITHM OF IMPLEMENTATION OF THE METHODOLOGY OF RISK ANALYSIS OF THE OPERATION OF WELDED METAL STRUCTURES

V.M. Torop

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: v.torop@gmail.com

Three levels of assessment of indicators of structural strength, reliability and durability of welded metal structures are considered for the construction of a system for managing the integrity of welded metal structures. Level 1 uses the criteria of the limit state of welded metal structures based on safety margin factors and is implemented by us using a failure assessment diagram. Level 2 of probabilistic analysis of safety and reliability involves the formulation and evaluation of the values of probabilistic indicators used to assess the structural strength, reliability and durability of welded metal structures in the presence of uncertainty and lack of completeness of input data. For level 3 of the risk analysis of the operation of welded metal structures, an algorithm for its implementation is proposed and an implementation option in the form of an integrity management system is prescribed. The failure assessment diagram of damage assessment is the basis of the implementation of all three levels. 14 Ref., 6 Fig.

Keywords: risk, probability of destruction, consequences, failure assessment diagram of destruction assessment, probabilistic safety analysis, risk matrix, integrity management system

Отримано 02.05.2024

Отримано у переглянутому вигляді 27.06.2024

Прийнято 06.09.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.				
	місяць	два місяця	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-2374 (Print). ISSN 3041-234X (Online). Передплатний індекс 70031	–	300	–	900	1800
«Сучасна електromеталургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-238 (Print). ISSN 3041-2331 (Online). Передплатний індекс 70693	–	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2366 (Print). ISSN 3041-2358 (Online). Передплатний індекс 74475	–	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X (Print). ISSN 3041-2293 (Online). Передплатний індекс 21971.	600	1200	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електromеталургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль». Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРГОШТА», «Прес Центр», «Меркурій» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів. Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf. На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 рр.

Адреса видавництва

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ПЛАСТИН З ТЕРМОЗМІЦНЕНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 2219-T81

О.В. Махненко, О.С. Міленін, В.І. Павловський, В.В. Савицький, Б.Р. Царик

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

Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) – відносно новий процес зварювання, який вже отримав досить широке застосування для виконання з'єднань конструкцій в авіакосмічній галузі, транспортному та суднобудуванні. Вважається, що в порівнянні з традиційними дуговими процесами зварювання ЗТП забезпечує менший нагрів металу з'єднання та зниження рівня залишкових напружень і деформацій. У роботі досліджувались особливості розподілу залишкових напружень у стиковому ЗТП з'єднанні із термозміцненого алюмінієвого сплаву, що необхідно для прогнозування міцності та ресурсу зварних конструкцій. Побудовано математичну модель для визначення залишкових напружень при ЗТП, розглянуто врахування ефекту знеміцнення алюмінієвого сплаву при зварювальному нагріві на залишкові напруження. Порівняння розрахункових та експериментальних даних розподілу залишкових повздовжніх напружень у зразках, виконаних ЗТП, показало їх задовільний рівень відповідності. Показано, що визначений рівень залишкових розтягувальних напружень близький до границі текучості відпаленого металу. Бібліогр. 12, рис. 14.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, зварювання тертям з перемішуванням, стикове з'єднання, залишкові напруження, математичне моделювання, експериментальне вимірювання

Вступ. На сьогодні технологія зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) знаходить широке використання для виконання з'єднань різноманітних конструкцій в авіакосмічній галузі, транспортному та суднобудуванні, та ін. [1, 2]. Для прогнозування надійності, ресурсу, міцності та довговічності зварних конструкцій, виконаних ЗТП, актуальним завданням є визначення залишкових напружень і деформацій [3, 4]. Враховуючи, що процес впровадження ЗТП у промисловості розвинутих країн почався не так давно – кілька останніх десятиліть, то на теперішній час питання залишкових напружень і деформацій при ЗТП різних конструкційних матеріалів і сплавів ще недостатньо вивчене. Тобто немає загальноприйнятого уявлення про рівень максимальних значень і характер розподілу залишкових напружень і деформацій, а існуючі дані дуже часто є суперечливими. У роботі з цією метою були використані методи експериментальних досліджень напружено-деформованого стану стикового з'єднання пластин із алюмінієвого сплаву 2219-T81 при зварювальному нагріві ЗТП [5], а також проведено порівняння отриманих розподілів залишкових напружень при ЗТП з результатами математичного моделювання.

Експериментальне вимірювання залишкових напружень при ЗТП. Було виконано експериментальне визначення залишкових напружень у зразках з'єднань із алюмінієвого сплаву 2219-T81, які були отримані з використанням технології

ЗТП. Вимірювання залишкових зварювальних напружень проводилося наступними методами:

1. Методом розрізування металу зварного з'єднання на вузькі повздовжні смужки (темплети) для звільнення в них внутрішніх напружень і вимірювання отриманих при цьому пружних деформацій (залишкових зварювальних повздовжніх напружень) [9]. Для цього використовувався механічний деформометр на базі 20 мм (рис. 1) і система конусних отворів, попередньо висвердлених на верхній і нижній сторонах зразка у поперечних перерізах у середній частині зразків. Вимірювання за допомогою механічного деформометра кожної вимірювальної бази (20 мм) проводились до і після повного розрізування зразків на темплети для повного звільнення залишкових напружень. Після цього був виконаний перерахунок отриманих даних пружних деформацій кожної вимірювальної бази в залишкові зварні напруження в заданій точці зразка. Для алюмінієвого сплаву 2219 у розрахунках використовувався модуль пружності $E = 75000$ МПа.

2. Методом отворів у поєднанні з реєстрацією переміщень, що виникають у результаті локальної релаксації напружень, за допомогою лазерної спекл-інтерферометрії (ESPI-HD метод) (рис. 2). Він не вимагає підготовки поверхні та може використовуватись для визначення залишкових напружень на базі 0,5...1,0 мм у діаметрі та завглибшки до 1 мм. Вимірювання виконувались у наступній послідовності: спекл-інтерферометр встановлювався на зварне

© Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Павловський В.І. – <https://orcid.org/0000-0002-5441-3447>, Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>, Царик Б.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-8929-7722>
О.В. Махненко, О.С. Міленін, В.І. Павловський, В.В. Савицький, Б.Р. Царик, 2024

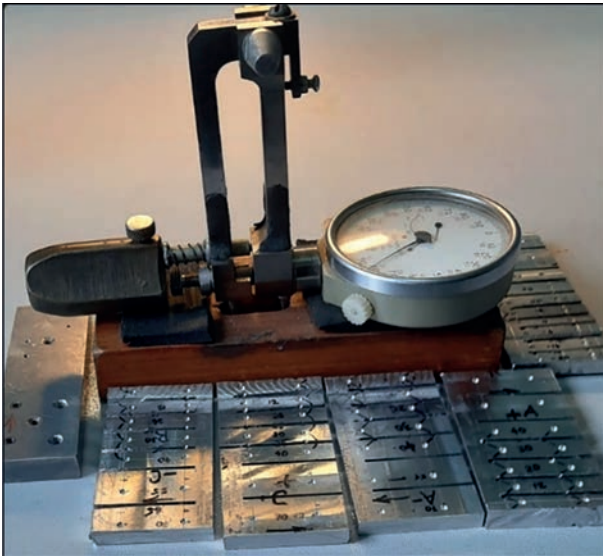


Рис. 1. Зовнішній вигляд механічного деформометра на базі 20 мм та вирізані частини зварного зразка (темплети) з вимірювальними базами (конусні отвори) для визначення залишкових напружень

з'єднання, після чого записувалися цифрові зображення, що характеризують початковий стан поверхні до свердління отвору. Після релаксації напружень, що викликана свердлінням некрізного отвору діаметром 1,0 мм і завглибшки 0,5 мм, записувався інший набір спекл-зображень, що відображали деформований стан. На основі отриманих зображень методом фазових кроків розраховувались значення переми-

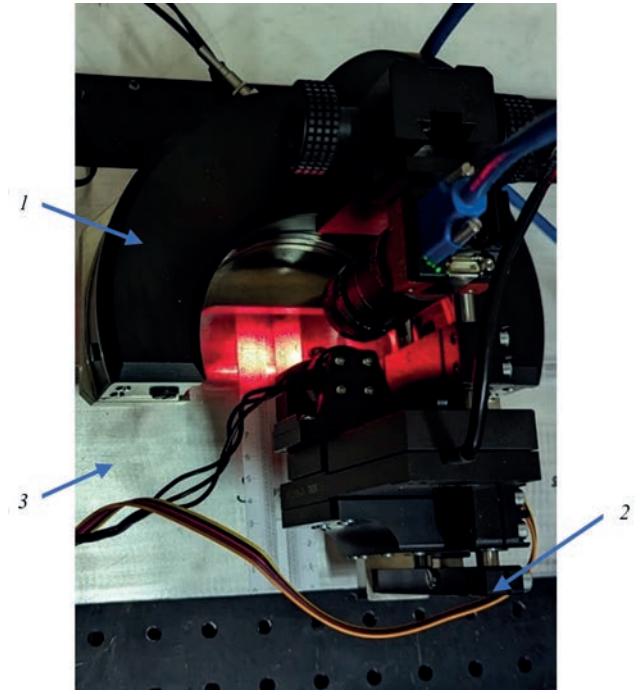


Рис. 2. Зовнішній вигляд ESPI-HD приладу для вимірювання залишкових напружень

щення в площині зразка навколо отвору, за якими визначалися залишкові напруження [10, 11]. Метод ESPI-HD продемонстрував задовільне збіг результатів вимірювань напруженого стану з іншими традиційними методами під час Round-Robin тесту Міжнародного інституту зварювання [12].

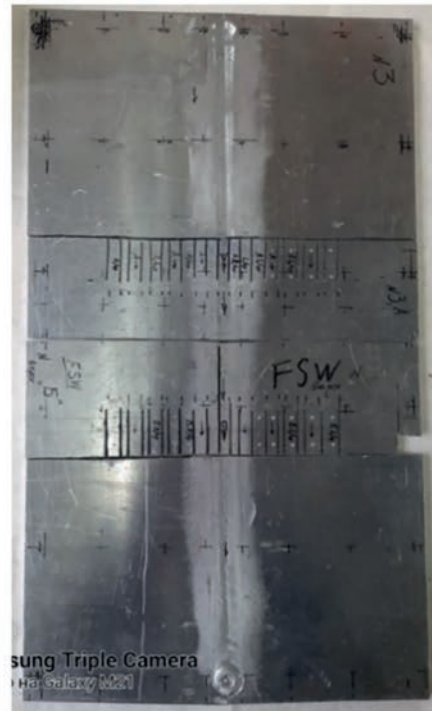
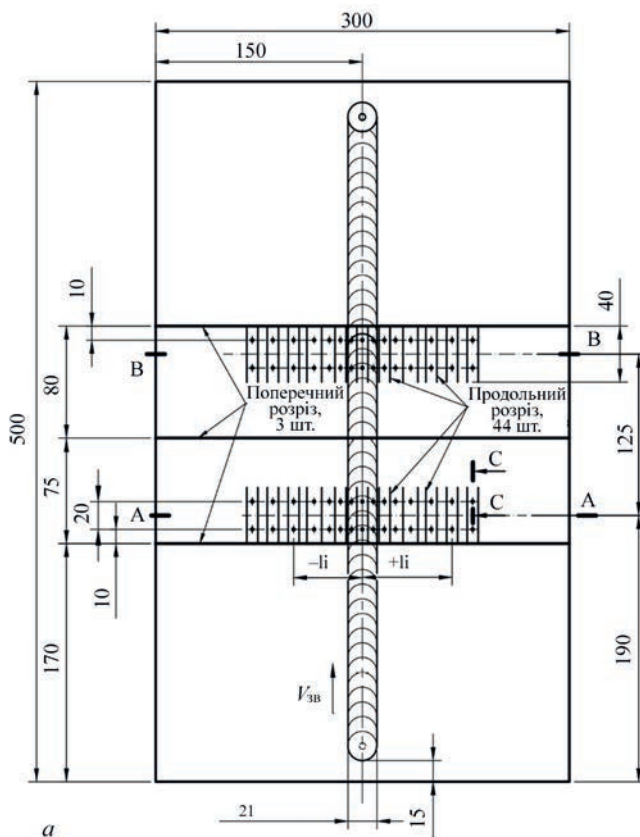


Рис. 3. Схема розташування вимірювальних баз (а) та зовнішній вигляд (б) зразка (зразок № 2) розміром 500×300×8 мм стикового з'єднання пластин за

Зразок для вимірювання залишкових напружень являє собою стикове з'єднання двох однакових пластин завдовжки 500 мм, завширшки 300 мм і завтовшки 8 мм. Для вимірювання залишкових пружних деформацій використано 26 вимірювальних баз (52 отвори) у поперечному перерізі на обох сторонах зразка (рис. 3).

Результати вимірювання залишкових поздовжніх напружень у зразку № 1 у центральному перерізі та у зразку № 2 у двох перерізах А і В (рис. 3) зразка стикового з'єднання, виконаного ЗТП, після повного розрізання матеріалу на поздовжні темп-

лети та вимірювання пружних деформацій показали гарну повторюваність результатів і максимальний рівень розтягувальних напружень до 180 МПа (рис. 4, 5). Визначено значна відмінність між рівнем залишкових поздовжніх напружень на верхній і нижній сторонах зразка. На верхній стороні рівень виміряних напружень помітно нижче: максимальні розтягувальні напруження не перевищують 80...100 МПа, у той час як на нижній стороні – досягають 180 МПа. Значну згинальну складову поздовжніх напружень по товщині підтверджує наявність залишкового поздовжнього прогину центральної частини зразка до 2,5 мм.

Вимірювання методом спекл-інтерферометрії (із застосуванням свердління отворів діаметром 1 мм) проводили на зразку № 1 у двох поперечних перерізах: переріз 1 – на відстані 130 мм від початку зварного шва та переріз 2 – на відстані 350 мм. У перерізі 1 вимірювання отримано на верхній і нижній сторонах зразка, а в перерізі 2 – тільки на нижній стороні, в зоні високих розтягувальних напружень. Результати вимірювання показали (рис. 6, а), що на верхній стороні розтягувальні поздовжні напруження не перевищують 120...150 МПа, а на нижній стороні досягають 200...210 МПа. Решта компонентів залишкових напружень істотно нижчі

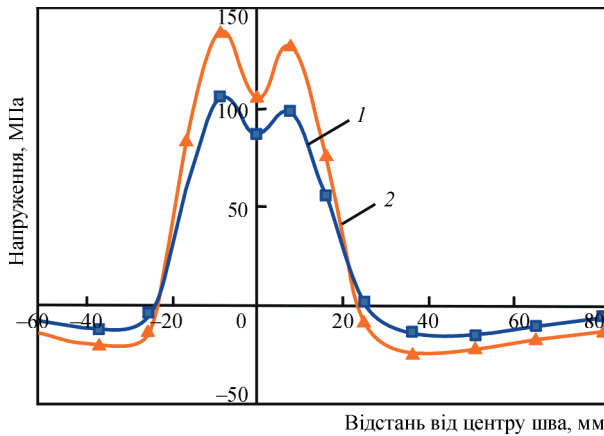


Рис. 4. Залишкові поздовжні напруження в поперечному центральному перерізі в зразку № 1 на верхній (σ_x , верх) (1) і нижній (σ_x , низ) (2) сторонах зразка

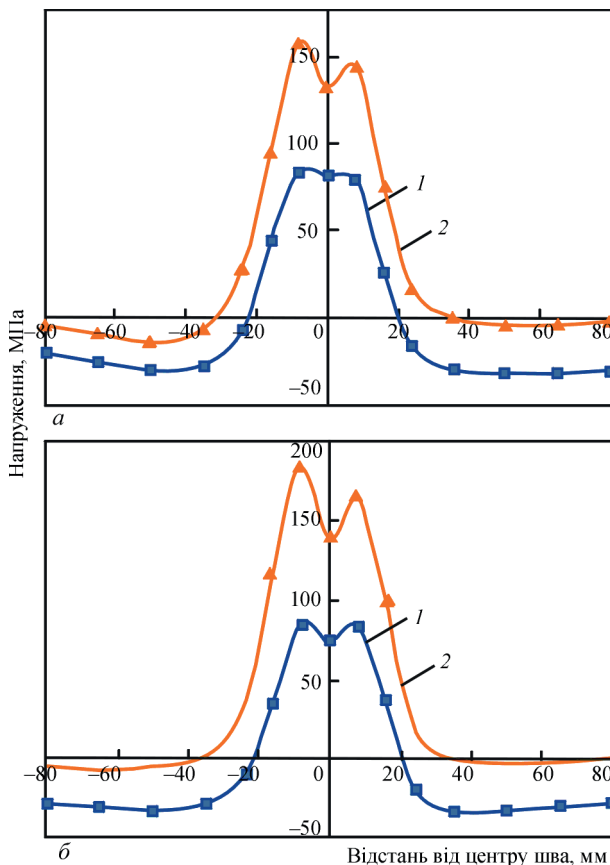


Рис. 5. Експериментальні розподіли залишкових поздовжніх напружень на і верхній (1) і нижній (2) сторонах зварного зразка № 2 в перерізах А-А (а) і В-В (б)

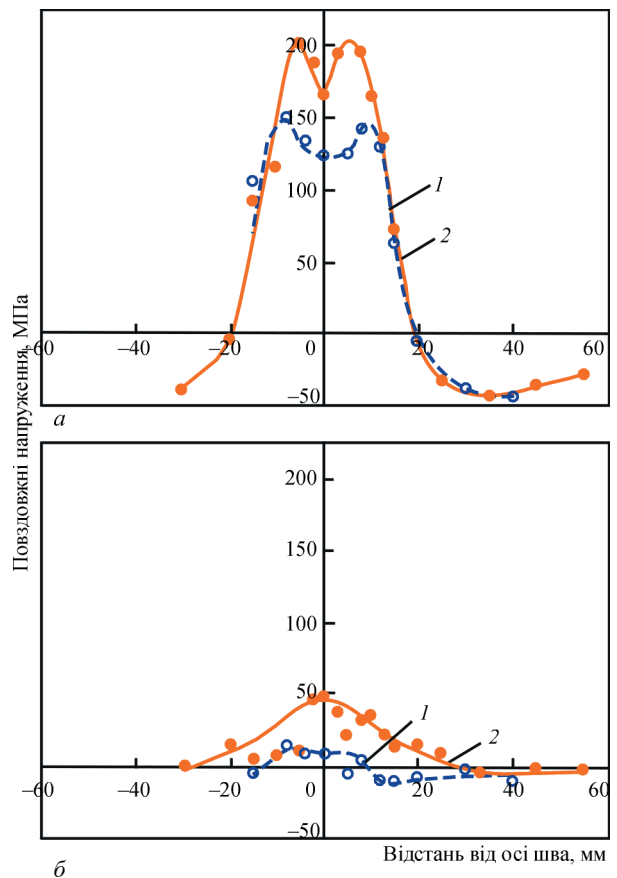


Рис. 6. Результати вимірювання залишкових напружень методом спекл-інтерферометрії у зразку № 1: а – поздовжня компонента; б – поперечна компонента; 1 – верхня сторона зразка; 2 – нижня сторона зварного зразка

за величиною: поперечні розтягувальні напруження на верхній стороні не перевищують 20...25 МПа, а на нижній 50 МПа (рис. 6, б).

Результати визначення напруженого стану в зразку № 1 двома методами показали, що при зварюванні тертям з перемішуванням значення максимальних залишкових поздовжніх напружень доволі високі та близькі до границі текучості алюмінієвого сплаву А2219 у відпаленому стані (до 150...180 МПа), тобто з урахуванням знеміцнення матеріалу в зоні зварювального нагріву. При цьому залишкові напруження на нижній стороні зразка істотно вищі, ніж виміряні на верхній стороні: поздовжні – на 20...30 %, поперечні – в 5 разів.

Вимірювання механічних характеристик матеріалу зварного з'єднання. Проведено дослідження механічних властивостей матеріалу зварних зразків. Для випробувань на одиницний розтяг було зроблено по 10 зразків на розрив з основного матеріалу (рис. 7, а) у двох взаємно перпендикулярних напрямках з метою визначення напрямку прокату. Метал із зварного з'єднання значно меншою мірою залежить від напрямку прокату через перекристалізації металу шва та ЗТВ у процесі зварювання, тому для цих випробувань використовувалися 10 зразків (рис. 7, б).

Результати випробувань показали, що вплив напрямку прокату на механічні властивості матеріалу зварних зразків не перевищує 4,5 %. Це дозволяє не враховувати анізотропію матеріалу під час проведення відповідних експертних оцінок, оперуючи мінімальною середньою величиною ($\sigma_{0,2} = 370$ МПа, $E = 75,3$ ГПа). Крім того, відчутний вплив надає процес перекристалізації металу в області шва, де спостерігається суттєве розміцнення металу: зниження тимчасового опору розриву σ_B до 44,4 % і справжньої границі плинності $\sigma_{0,2}$ до 63,4 % порівняно зі зразком основного матеріалу вздовж прокату.

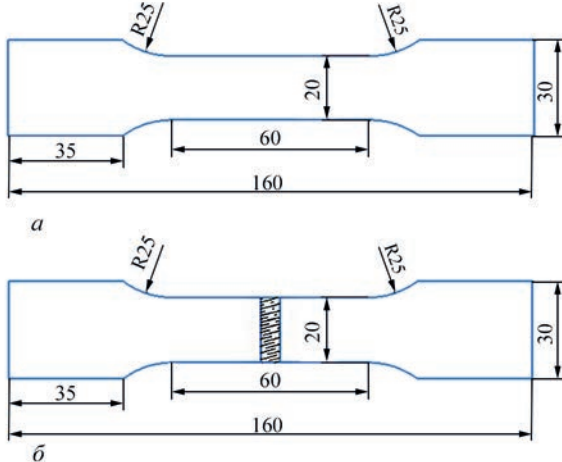


Рис. 7. Схеми зразків на розтяг основного металу (а) і металу шва зварного з'єднання (б)

За результатами вимірювання твердості за Роквелом у поперечному перерізі дослідного зразка (рис. 8) було визначено, що в зоні зварного з'єднання в ЗТВ спостерігається зона знеміцнення матеріалу завширшки ~20 мм, де характеристики твердості знижуються майже вдвічі, у середньому з 70 до 35 HRB. Це також узгоджується з визначеним у результаті механічних випробувань зразків на розтяг зниженням у ЗТВ характеристик міцності матеріалу для сплаву А2219-Т81, а саме границі текучості з 350 до 160 МПа.

Порівняння з результатами математичного моделювання ЗТП. Для математичного моделювання залишкових напружень при ЗТП алюмінієвого сплаву використовувалась розроблена раніше модель [5], яка була доповнена врахуванням ефекту знеміцнення матеріалу в зоні шва і ЗТВ.

Температурна модель:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(x, y, z, t), \quad (1)$$

де T – температура °С; c – питома теплоємність, Дж/кг×°С; ρ – густина, кг/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м×°С; $W(x, y, z, t)$ – потужність об'ємного тепловиділення, Вт/м³.

Особливістю розробленої моделі джерела нагріву при ЗТП є тепловиділення за рахунок тертя інструменту відносно матеріалу з'єднання. Інструмент обертається навколо вертикальної осі з певною кутовою швидкістю ω , об/с, і притискається до пластин з осьовим зусиллям P_n , Па, що викликає на поверхні контакту інструменту тепловий потік у матеріал з'єднання, Вт/м²:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot r, \quad (2)$$

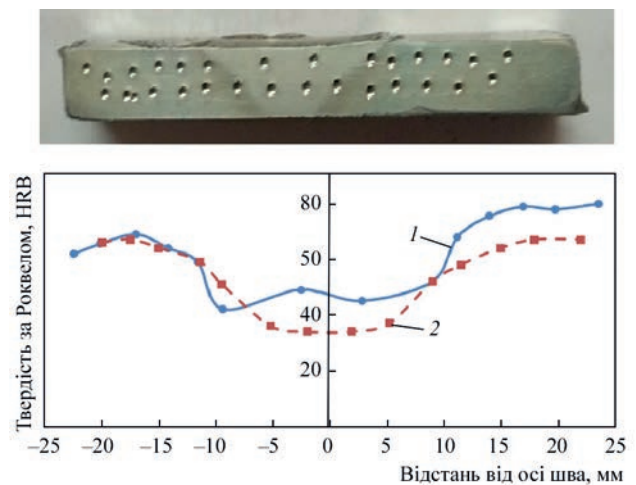


Рис. 8. Розподіл твердості за Роквелом у з'єднанні ЗТП пластин зі сплаву А2219-Т81: 1 – верхня сторона зразка; 2 – нижня сторона зразка

де μ – коефіцієнт тертя, $r = \sqrt{(x - x_0 - v_w t)^2 + (y - y_0)^2}$ – відстань розглянутої точки контакту від осі обертання робочого інструменту ($x_0 + v_w t, y_0$), v_w – лінійна швидкість руху інструменту.

Тоді потужність тепловиділення Q , Вт, на відповідних поверхнях контакту площею S (рис. 9):

$$Q = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot \pi \cdot \iint_S r dS, \quad (3)$$

плече ($z = \delta, R_1 < r < R_2$) $Q_1 = \frac{2\pi}{3} \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot (R_2^3 - R_1^3)$,

бічна поверхня штиря ($\delta - h < z < \delta, r = R_1$)

$$Q_2 = 2\pi \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^2 \cdot h,$$

нижня торцева поверхня штиря ($z = \delta - h, 0 > r > R_1$)

$$Q_3 = \frac{2\pi}{3} \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^3,$$

де δ – товщина зварюваних пластин, м; h – довжина штиря, який входить у матеріал, м.

Відповідно потужність об'ємного тепловиділення $W(x, y, z, t)$, Вт/м³ складається з двох складових. Перша пов'язана з тепловиділенням в об'ємі V_1 на верхній стороні пластин з'єднання під плечем інструменту ($\delta - dz < z < \delta, R_1 < r < R_2$), dz – розмір скінченного елемента, а друга – в об'ємі штиря V_2 ($\delta - h < z < \delta, 0 > r > R_1$):

$$W(x, y, z, t) = W_1 + W_2,$$

$$W_1 = \frac{Q_1}{V_1} = \frac{\frac{2\pi}{3} \mu P_n \omega (R_2^3 - R_1^3)}{\pi (R_2^2 - R_1^2) dz} = \frac{2\mu P_n \omega (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2)}{3(R_2 + R_1) dz},$$

$$W_2 = \frac{Q_2 + Q_3}{V_2} = \frac{2\pi \mu P_n \omega R_1^2 h + \frac{2\pi}{3} \mu P_n \omega R_1^3}{\pi R_1^2 h} = 2\mu P_n \omega \left(1 + \frac{R_1}{3h} \right). \quad (4)$$

Модель термопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання при ЗТП ґрунтується на припущенні, що процес перемішування матеріалу зварного з'єднання відбувається в зоні зварного шва при досить високій температурі та помітно не впливає на загальний результат утворення та розвитку пластичних деформацій у матеріалі ЗТВ і зварного шва за робочим інструментом. Тобто пластичні деформації і залишкові напруження утворюються тільки внаслідок градієнту температур, який виникає при русі робочого інструменту як джерела об'ємного тепловиділення (4). Детальніше запропоновану математична модель термопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання при ЗТП представлено в [5].

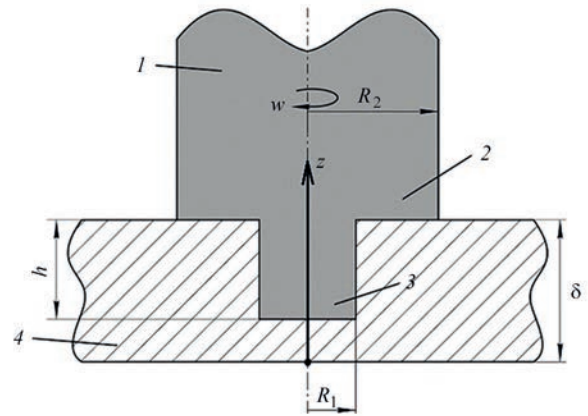


Рис. 9. Схема робочого інструменту при ЗТП: 1 – інструмент; 2 – плече; 3 – пластина; 4 – штир

З метою спрощення моделі було прийнято припущення, що значення коефіцієнту тертя не залежить від температури та дорівнює приблизно середньому значенню $\mu = 0,4$, отриманому для алюмінієвого сплаву 2219 у діапазоні температури матеріалу до 400 °С [8].

На рис. 10, 11 представлені механічні та теплофізичні властивості сплаву 2219-T81 у залежності від температури [6], які використовувались при математичному моделюванні:

Аналіз результатів чисельних експериментів показав, що серед факторів, які можуть у той чи

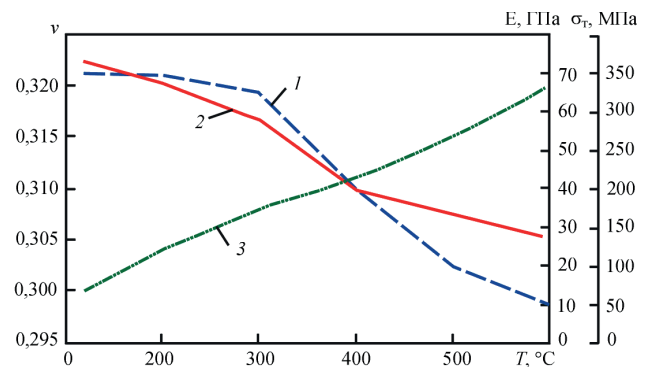


Рис. 10. Механічні властивості сплаву 2219-T81: 1 – $\sigma_T(T)$; 2 – $E(T)$; 3 – $\nu(T)$

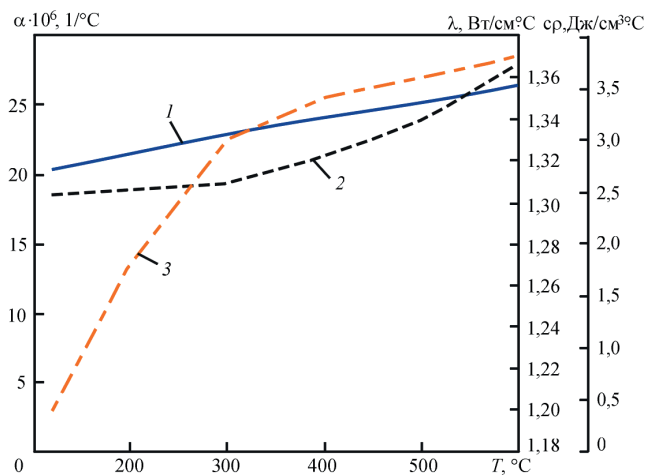


Рис. 11. Теплофізичні властивості сплаву 2219-T81: 1 – $\alpha(T)$; 2 – $c_p(T)$; 3 – $\lambda(T)$

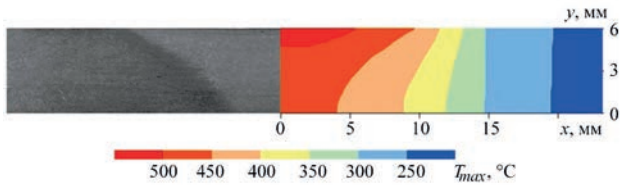


Рис. 12. Порівняння розрахункового розподілу максимальних температур у поперечному перерізі зварного з'єднання ЗТП з формою ЗТВ на макрощіфі

іншій мірі впливати на утворення залишкових напружень у зварному з'єднанні при ЗТП алюмінієвих сплавів, найбільший ефект має зменшення матеріалу від зварювального нагріву [7].

Порівняння розрахункового розподілу максимальних температур у поперечному перерізі зварного з'єднання ЗТП пластин $\delta = 6$ мм зі сплавом А2219-Т81 (рис. 12) з результатами вимірювання твердості (рис. 8) показало, що ширина зони початку зменшення 40 мм відповідає температурі $T_s = 240$ °С, а зона максимального зменшення на верхній стороні завширшки ~ 20 мм і на нижній стороні завширшки 10 мм визначає температуру завершення зменшення на рівні $T_e = 450$ °С нагріву матеріалу при зварюванні.

Прийняті в моделі параметри зменшення матеріалу – це границя текучості зменшеного матеріалу $\sigma_{soft} = 160$ МПа, а також температури початку $T_s = 240$ °С і завершення $T_e = 450$ °С зменшення (рис. 13). При математичному моделюванні НДС при ЗТП неврахування зменшення матеріалу призводить до суттєвого збільшення (більш ніж на 30 %) максимальних поздовжніх залишкових напружень.

Порівнюючи результати розрахунку та експериментальні дані, отримані на зразку № 2, за розподілом залишкових поздовжніх напружень при ЗТП (рис. 14), можна стверджувати, що характер розподілу розрахункових залишкових напружень

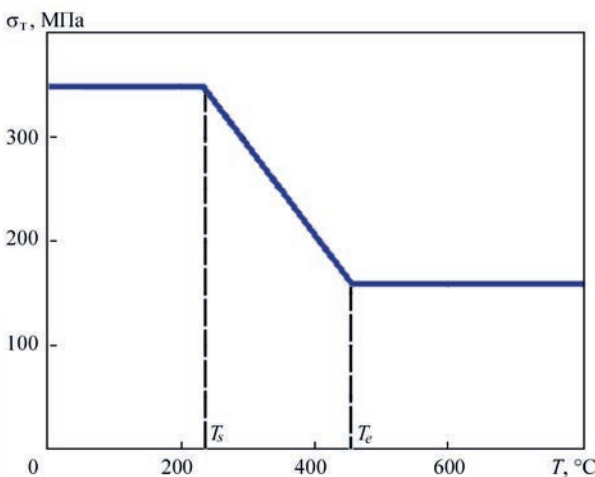


Рис.13. Залежність границі текучості матеріалу зразка зі сплаву А2219-Т81 від максимальної температури нагріву при зварюванні: $T_s = 240$ °С, $T_e = 450$ °С, $\sigma_{soft} = 160$ МПа, $\sigma_T = 350$ МПа

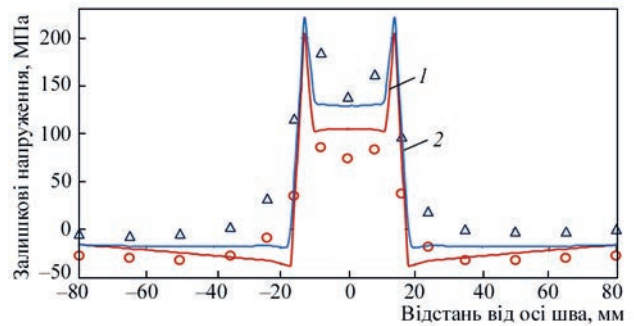


Рис. 14. Порівняння експериментальних даних з результатами математичного моделювання розподілу залишкових поздовжніх напружень для зразка ЗТП: експериментальні дані: \circ – верхня сторона зразка; Δ – нижня сторона зразка; розрахункові дані: 1 – верхня сторона зразка; 2 – нижня сторона зразка

близький до експериментального. У центрі зварного з'єднання є зона суттєвого зниження розтягувальних поздовжніх напружень, що пов'язано з ефектом зменшення алюмінієвого сплаву. Ширина зони розтягувальних напружень приблизно 36 мм ($-18 \dots +18$ мм) і однакова як для експериментальних, так і для розрахункових даних.

Розрахунковий розподіл напружень характеризується різкими градієнтами та вищими значеннями напружень у зоні шва. Гладкіша крива експериментального розподілу залишкових напружень пов'язана з достатньо великим кроком (8 мм) між точками вимірювання, що призводить до усереднення значень напружень.

Важливо, що для експериментальних і розрахункових даних характерною є значна різниця між напруженнями на верхній і нижній сторонах зварного з'єднання – на нижній стороні залишкові поздовжні напруження вищі. За абсолютною величиною розтягувальних напружень у центрі зварного з'єднання ця різниця за експериментальними даними досягає 140 і 130 МПа згідно з розрахунком.

Оцінка похибки розрахункових даних для ЗТП показує, що в зоні розтягувальних напружень (3 центральні точки, $-16 \dots +16$ мм) середньоквадратичне відхилення від експериментальних значень на нижній стороні зразка складає 21 %, а на верхній стороні – до 30 %. Така похибка може прийматися задовільною, враховуючи складний характер розподілу залишкових напружень.

Висновки

1. Для зразків зварних стикових з'єднань завтовшки 8 мм, виконаних із алюмінієвого сплаву А2219-Т81 зварюванням тертям з перемішуванням, виміряний рівень розтягувальних залишкових поздовжніх напружень виявився досить високим (до 180 МПа), близьким до границі текучості алюмінієвого сплаву у відпаленому стані. При

цьому залишкові напруження на нижній стороні зразка вищі, ніж на верхній стороні (приблизно на 20 %). Поперечні розтягувальні залишкові напруження істотно нижчі за величиною: на верхній стороні не перевищують 20...25 МПа, а на нижній – 50 МПа.

2. На результат математичного моделювання залишкових напружень при ЗТП алюмінієвих сплавів суттєво впливає врахування моделі знеміцнення матеріалу в зоні зварювального нагріву, параметрами якої є значення границі текучості знеміцненого матеріалу σ_{soft} , а також діапазон температури початку T_s і завершення T_e ефекту знеміцнення. Неврахування знеміцнення матеріалу призводить до суттєвого збільшення (більш ніж на 30 %) максимальних повздовжніх залишкових напружень.

Список літератури/References

- Hattel, J.H., Sonne, M.R., Tutum, C.C. (2015) Modelling residual stresses in friction stir welding of Al alloys—a review of possibilities and future trends. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **76**, 1793–1805. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6394-2>
- Poklyatskyi, A.G., Motrunich, S.I., Fedorchuk, V.Ye. et al. (2023) Mechanical properties and structural features of butt joints produced at FSW of aluminium alloys of different alloying systems. *The Paton Welding J.*, **4**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.04.01>
- Feng, Z., Wang, X.-L., David, S.A., Sklad, P.S. (2007) Modelling of residual stresses and property distributions in friction stir welds of aluminium alloy 6061-T6. *Science and Technology of Welding and Joining*, **12**(4), 348–356. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329307X197610>
- Mohammad Riahi, Hamidreza Nazari (2011) Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **55**, 143–152. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3038-z>
- Tsaryk, B.R., Muzhychenko, O.F., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical model of determination of residual stresses and strains in friction stir welding of aluminium alloy. *The Paton Welding J.*, **9**, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.09.06>
- Abdulrahman Shuaibu Ahmad, Yunxin Wu, Hai Gong, Lin Nie (2019) Finite element prediction of residual stress and deformation induced by double-pass TIG welding of Al 2219 plate. *Materials*, **12**(14), 2251. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12142251>
- Махненко О.В., Царик Б.Р. (2024) Врахування розміцнення матеріалу при розрахунковому визначенні залишкових напружень при зварюванні алюмінієвого сплаву 2219-T81. *Матеріали XIV міжн. наук.-практ. конф. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, 23–24 травня 2024 р., м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка», Т. 2, сс. 110–111.
- Makhnenko, O.V., Tsaryk, B.R. (2024) Consideration of material softening in the calculated determination of residual stresses at welding of aluminum alloy 2219-T81. In: *Proc. of 14th Int. Sci.-Pract. Conf. on Comprehensive Quality Assurance of Technological Processes and Systems*, May 23–24, 2024, Chernihiv, Chernihiv Polytechnic National University, NU Chernigivska Politechnik, Vol. 2, 110–111.
- Aziz, S.B., Dewan, M.W., Huggett, D.J. et al. (2016) Impact of friction stir welding (FSW) process parameters on thermal modeling and heat generation of aluminum alloy joints. *Acta Metal. Sin. (Eng. Lett.)*, **29**, 869–883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40195-016-0466-2>
- Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М. (1981) *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений*. Киев, Наукова думка.
- Kasatkin, B.S., Kudrin, A.B., Lobanov, L.M. (1981) *Experimental methods for studying deformations and stresses*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V. et al. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **8**, 35–40.
- Lobanov, L., Pivtorak, V., Savitsky, V., Tkachuk, G. (2014) Technology and equipment for determination of residual stresses in welded structures based on the application of electron speckle-interferometry. *Materials Science Forum*, **768-769**, 166–173. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.166>
- Wohlfahrt, H., Nitschkepagel, T., Dilger, K. et al. (2012) Residual stress calculations and measurements – review and assessment of the IIW round robin results. *Weld. World*, **56**, 120–140. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03321387>

RESIDUAL STRESSES INDUCED BY FRICTION STIR WELDING OF THERMO STRENGTHENED ALUMINUM ALLOY 2219-T81 PLATE

O.V. Makhnenko, O.S. Milenin, V.I. Pavlovsky, V.V. Savitsky, B.R. Tsaryk

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Friction stir welding (FSW) is a relatively new welding process that has already been widely used for joining structures in the aerospace industry, transport and shipbuilding. It is believed that, in comparison with traditional arc welding processes, FSW ensures less heating of the metal of the joint and a reduction in the level of residual stresses and strains. In the work the features of the distribution of residual stresses induced by FSW in the butt joint of thermo-strengthened aluminum alloy are investigated, which is necessary for predicting the strength and service life of welded structures. A mathematical model was built to determine the residual stresses at FSW, and the effect of softening of the aluminum alloy during heating in welding on the residual stresses was considered. Comparison of calculated and experimental data on the distribution of residual longitudinal stresses in FSW samples showed a satisfactory level of their correspondence. It is shown that the determined level of residual tensile stresses is close to the yield strength of the annealed metal. 12 Ref., 14 Fig.

Keywords: aluminum alloy, friction stir welding, butt joint, residual stresses, mathematical modeling, experimental measurement

Отримано 15.08.2024

Отримано у переглянутому вигляді 17.09.2024

Прийнято 30.09.2024

ПРИЧИНИ ПОШКОДЖЕННЯ ТРУБОПРОВОДУ ЗІ СТАЛІ AISI 316L

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

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03105, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: lnyrkova@gmail.com

Досліджено пошкоджений трубопровід з нержавкої сталі AISI 316L, призначений для транспортування холодної води, на підприємстві харчової промисловості після будівництва та простоювання впродовж одного року. За результатами візуального огляду зразка зварних з'єднань чотирьох труб встановлено, що труби, які монтувалися в горизонтальному положенні, у нижній частині мають дефекти зварювання: нерівності шва, напливи, протікання металу. Показано, що зварні з'єднання труб є тривкими проти міжкристалітної корозії, а основний метал – проти пітингової корозії. Пошкодження досліджуваного зразка зварного з'єднання труб, що підтверджено металографічними дослідженнями, викликано несплавленням шва з основним металом, неповним проваром у корені шва, що призвело до наскрізних уражень внаслідок контакту з залишками води після гідравлічних випробувань через щільну корозію. Бібліогр. 17, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: нержавка сталь, зварне з'єднання, потенціометрія, оптична мікроскопія, пітингова корозія, щільна корозія

Вступ. Корозія є складною проблемою при експлуатації зварних виробів з аустенітної нержавкої сталі, зокрема труб, що контактують з водою. Більшість уражень спричинені важко контрольованою локальною корозією. Одним з найнебезпечніших видів корозії є пітингова, що супроводжується утворенням виразок у металі, які починаються з поверхні [1]. Внаслідок складної взаємодії різних чинників корозійний процес має ймовірнісний характер. Пітинг утворюється, якщо пасивну плівку пошкоджено в результаті хімічного або механічного впливу [2]. В основі всіх теорій, які намагаються пояснити ініціацію пітинга, лежить припущення про адсорбцію хлорид-аніону на поверхні металу [3]. У процесі пітингоутворення виділяють три стадії: зародження пітингів, взаємодія між ними та злиття пітингів. Взаємодія пітингів між собою призводить до загасання процесу їх розвитку і пасивації слабких пітингів. Тривкість нержавкої сталі проти пітингоутворення можна оцінити за індексом пітингостійкості – PREN (pitting resistance equivalent) відповідно до рівняння:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 \%Mo + k \%N. \quad (1)$$

Наприклад, індекс пітингостійкості для сталі AISI 316 (вміст молібдену 2,0...2,5 %) – 25. Тривкість проти щільної корозії забезпечується при індексі пітингостійкості більше 45 [4]. Молібден покращує корозійну тривкість, особливо у хлоридвмісному середовищі [5].

Чинники пітингової корозії. Під час механічного оброблення металеві частинки нелегованих і низьколегованих сталей можуть потрапляти на

поверхню нержавкої сталі. Вони працюють як мікроаноди в корозійних елементах, в яких катодом є нержавка сталь. У процесі розчинення анодів за наявності в середовищі хлорид-іонів їх локальна концентрація буде зростати за рахунок міграції, а отже, імовірність виникнення пітингової корозії підвищується.

Вплив середовища. Застосування аустенітних нержавких сталей обмежується температурою водного носія близько 50 °C і вмістом хлоридів [3]. Імовірність пітингової корозії аустенітних нержавких сталей, які не містять молібден, у холодній воді підвищується, якщо концентрація хлорид-іонів перевищує 6 ммоль/л [2]. Зміна складу середовища при експлуатації (наприклад, внаслідок шламо- і накипоутворення) сприяє зростанню концентрації хлоридів в осадах, що підвищує ймовірність локальної корозії [3]. Якщо після випробувань тиском залишки води залишаються в системі після зливання, імовірність виникнення пітингів зростає внаслідок випаровування води, що призводить до підвищення концентрації хлоридів [2]. Імовірність пітингової корозії дуже мала у водах з високою швидкістю потоку [2]. У середині пітинга значення рН може дорівнювати 3,5 [6], що сприятиме його розвитку вглиб, імовірно, і в період експлуатації.

Вплив інших речовин. При періодичному змоцунні поверхні нержавкої сталі локальний корозійний процес прискорюється при відносно низьких вихідних концентраціях хлоридів і кисню. Пітинговій корозії може сприяти дефіцит кисню в

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

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

© С.О. Осадчук, Л.І. Ниркова, Л.В. Гончаренко, 2024

невеликій області. Ця область стає анодною, в той час як зона надлишку кисню – катодною, що викликає місцеву корозію. Продукти корозії заліза є ефективнішими окиснювачами, ніж розчинений у воді кисень. Особливо слід відзначити негативний вплив підвищеного вмісту у воді іонів двовалентного заліза, які при контакті з розчиненим у воді киснем окиснюються і затримуються на поверхні нержавкої сталі у вигляді осаду, що сприяє пітінгоутворенню під осадом [6].

Структура сталі та термічне оброблення. Явно вираженого впливу структурного чинника на пітінгостійкість не встановлено. Локальне утворення фаз фериту та мартенситу в аустенітній матриці може призвести до зародження пітінгів, переважно на границі зерен аустеніт-ферит. Термічне оброблення погіршує опірність пітінговій корозії через можливе виникнення ділянок, збіднених хромом і молібденом [6]. Справедливо вважати, що хімічний склад сильніше впливає на пітінгостійкість, ніж структурний чинник.

Вплив процесу зварювання. Під час процесу зварювання можуть утворюватися оксидні плівки, які значно підвищують імовірність пітінгової корозії. Цього можна уникнути за допомогою методів зварювання та газового захисту, якщо увага приділяється правильному постачанню та очищенню газу. Оксидні плівки, які мають кольори темніше, ніж солом'яний, сильно збільшують імовірність пітінгової корозії. Видалення оксидних плівок виконують шляхом травлення у розчинах без соляної кислоти, тонкого шліфування або дробоструминного оброблення. У критичних умовах (наприклад, залежно від складу матеріалу та температури води) навіть оксидні плівки солом'яного кольору підвищують імовірність пітінгової корозії [2]. При виробництві труб треба враховувати, що властивості сталі під час та після зварювання залежать не тільки від марки сталі, але й від виду термооброблення, що застосовується, умов підготування до зварювання та його виконання [2]. Процес повинен бути описаний у відповідному інспекційному документі.

Способи захисту від пітінгової корозії. Вибір методів захисту від пітінгової корозії залежить від умов експлуатації, особливостей конструкції тощо. Іноді проблеми захисту обладнання від пітінгоутворення можуть бути вирішені використанням сталей із високим вмістом хрому та молібдену; усуненням гетерогенності термообробленням; обробленням поверхні (шліфування, полірування, пасивація); усуненням застійних зон, небажаних контактів різнорідних матеріалів тощо [6].

Щілинна корозія відбувається в середині чи навколо вузького отвору, щілини або проміжку [1], виникає при перерозподілі швидкостей електрохімічних реакцій по поверхні в результаті механічного оброблення поверхні, нещільного з'єднання металевих деталей (непровар зварного шва) у місцях застою розчину, в яких розвиваються корозійні пітінги. У зазорі відбувається витіснення кисню та накопичення агресивних іонів (наприклад, хлоридів), внаслідок чого в області зазору формується анод, а матеріал поза зазором – катод. Далі пасивна плівка руйнується через витіснення кисню, а кислотність в анодній зоні з часом зростає через перебіг корозійних реакцій. Щілинна корозія може прискорюватися в застійних хлоридвмісних середовищах.

Контактна корозія може відбуватися на одному металі внаслідок локальних відмінностей середовища (наприклад, концентрації кисню) або відкладень на металевій поверхні.

Мета роботи полягала у встановленні причин пошкодження зварного трубопроводу з нержавкої сталі AISI 316L, призначеного для транспортування водного середовища, на підприємстві харчової промисловості.

Методи дослідження. Контроль хімічного складу на вміст елементів в основному металі виконували на дифракційному фотоелектричному спектрометрі ДФС-51, у зварних швах – на дифракційному фотоелектричному спектрометрі ДФС-36. Вміст феритної фази визначали магнітним методом за допомогою феритометра МФ-10И на основному металі та зварному шві. Вимірювання потенціалів під краплею, утвореною капіляром діаметром 0,7 мм, проводили в розчині 3%-го NaCl відносно хлоридсрібного електрода порівнянням упродовж 30 хв на різних зонах зварного з'єднання за допомогою цифрового потенціостата-гальваностата MTech PGP-550F.

Схильність до міжкристалітної та пітінгової корозії визначали за стандартними методиками [7, 8]. Середнє число пітінгів на поверхні ділянок зразка визначали неозброєним оком на одиницю площі поверхні (шт/м²). Пітінги по краях зразків не враховували, оскільки їх утворення пов'язано з обробленням країв поверхні.

Металографічні дослідження проводили методом оптичної мікроскопії. Металографічні шліфи виготовляли за стандартною методикою, контролювали глибину руйнування границь зерен та утворення корозійних уражень у поперечному перерізі на мікроскопі NEOPHOT 21 із використан-

ням цифрової камери Allied Vision 1800 U-2050c і програмного забезпечення SEO ImageLAB.

Аналіз проб води за показником рН і вмісту хлоридів проводили за стандартною методикою, на вміст металів, зокрема заліза, міді та ін., – методом ІSP-спектрометрії за допомогою приладу іCAP 6500 DUO Termo E.C.

Окиснювально-відновлювальний потенціал визначали методом потенціометрії із застосуванням платинового електрода та хлоридсрібного електрода порівняння.

$$E_{\text{red/ox}} = E + E_{\text{x.c.e.}}, \quad (2)$$

де E – виміряна різниця потенціалів між платиновим і хлоридсрібним електродом порівняння, В; $E_{\text{x.c.e.}}$ – потенціал хлоридсрібного електрода порівняння, дорівнює +0,23 В.

Аналіз умов поводження з трубами на підприємстві. Будівництво трубопроводів на об'єкті тривало один рік. Згідно з сертифікатом якості труби виготовлені зі сталі аустенітного класу TP.316 L/1.4404, хімічний склад якої відповідав ASTM A240/ EN 10088-2/EN 10028-7, що підтверджено результатами лабораторного контролю хімічного складу зварного з'єднання труб щодо вмісту основних легуючих елементів: основний метал труби зразка зварного з'єднання труб відповідає сталі 1.4404 згідно з EN 10088-2 [9] (табл. 1). Проте метал шва має знижений вміст хрому (17,4 %) та нікелю (8,8 %) і підвищений вміст міді (0,31 %). Відповідно до сертифікату повинно бути 0,150 % міді.

Труби зварено з холоднотягнутого плоского прокату, очищено від окалини до «чистого металу», шорсткість основного металу Ra_{max} становила 0,8 мкм, у зоні зварювання – 1,6 мкм. Труби витри-

мали гідравлічні випробування, неруйнівний контроль, є тривкими проти міжкристалітної корозії.

Труби доставляли автотранспортом, зберігали на складі або одразу проводили зварювання вольфрамним електродом у захисному газі (аргоні). Після зварювання виконували пасивування поверхні травильною пастою та механічне очищення щітками. Під час будівництва системи трубопроводів відхилень від проектних рішень не було.

Під час пусконаладжувальних робіт проведено їх гідравлічні випробування підготовленою артезіанською водою тиском не більше 1,1 МПа. Після гідравлічних випробувань воду зливали, але продування труб повітрям з метою осушування не проводили. Перші наскрізні ураження виявлені через один рік після пусконаладжувальних робіт, оскільки внаслідок певних обставин підприємство не працювало і руху води в трубопроводах не було. За спостереженнями більшою мірою уражені труби великих діаметрів у зоні зварних швів у нижній частині труб.

Джерелом водопостачання підприємства є артезіанська вода. Проби води для аналізу відібрані з ємності, в якій вода аналогічна тій, що використовувалася під час гідравлічних випробувань, і зберігалася впродовж одного року (1), до входу у фільтр (2), після виходу з фільтра (3), проби води, що залишалася в трубопроводі впродовж одного року (4) (табл. 2).

За результатами аналізу якості проб води встановлено (табл. 2), що випробувана вода не є агресивною за показником рН (> 4,0 [6]), хлоридів 0,47...3,10 ммоль/л (< 6 ммоль/л [2]), міді 0,001...0,014 мг/л. Проте у дефектах труб за відсутності кисню рівень рН може знижуватися до

Таблиця 1. Хімічний склад зразка основного металу та зварного шва з'єднання труб № 1, 2

Зразок та марка сталі	Масова частка елементів у відсотках						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo
Основний метал труби 1	0,010	0,53	1,20	18,3	11,0	0,33	2,1
Зварний шов 1–2	–	0,51	1,20	17,4	8,8	0,31	2,1
Основний метал труби 2	0,013	0,60	1,57	17,6	10,0	0,32	2,1
Сталь TP.AISI 316L згідно з ASTM A 240/A 240M [10]	0,030	0,75	2,00	16,0...18,0	10,0...14,0	–	2,00...3,00

Таблиця 2. Результати аналізу проб води

Назва показника	Норма згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10 [11]	Проба води			
		1	2	3	4
Водневий показник рН	6,5...8,5 < 4,0*	8,0	6,9	7,5	6,3
Вміст заліза, мг/л	≤ 0,2	0,002	0,105	0,026	170,00
Вміст міді, мг/л	≤ 1,0	0,013	0,001	0,013	0,014
Хлориди: – мг/л – ммоль/л	≤ 250 < 6,0**	16,6 0,47	104,7 2,95	105,6 2,97	110,1 3,10
Окислювально-відновлювальний потенціал, В	–	0,405	0,435	0,442	0,437

Примітка. *Небезпечним є рівень рН < 4 [6]. **Рекомендації EN 12502-4 [2] для холодної води.

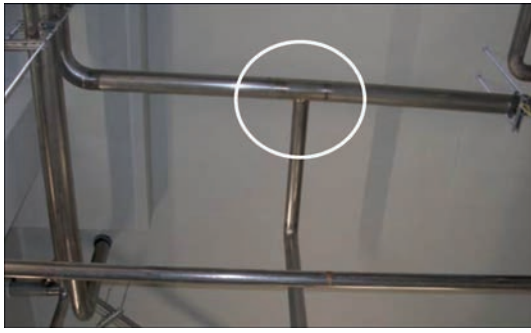


Рис. 1. Ділянка трубопроводу, на якій виявлено наскрізні ураження

небезпечних значень (< 4) внаслідок знекиснення середовища та з часом становити локальну корозійну небезпеку. Оскільки вода знаходилася тривалий час у замкнутому об'ємі системи, про що

свідчить високий вміст заліза (170,0 мг/л), треба припустити знижений вміст кисню, що сприяє зниженню корозійної тривкості труб. Отримані значення окислювально-відновлювального потенціалу 0,405...0,442 В свідчать про слабоокислювальні властивості досліджуваних проб води (згідно з наведеною у роботі [12] класифікацією, 0,400...0,500 В). Припустили, що таке середовище викликає окиснення заліза з пітінгів, продукти якого осаджуються на внутрішній поверхні труб, що й спостерігали під час зовнішнього огляду (рис. 2).

Відкладення, відібрані на зварному шві, мали червоне забарвлення, що вказує на присутність продуктів корозії заліза; на основному металі –

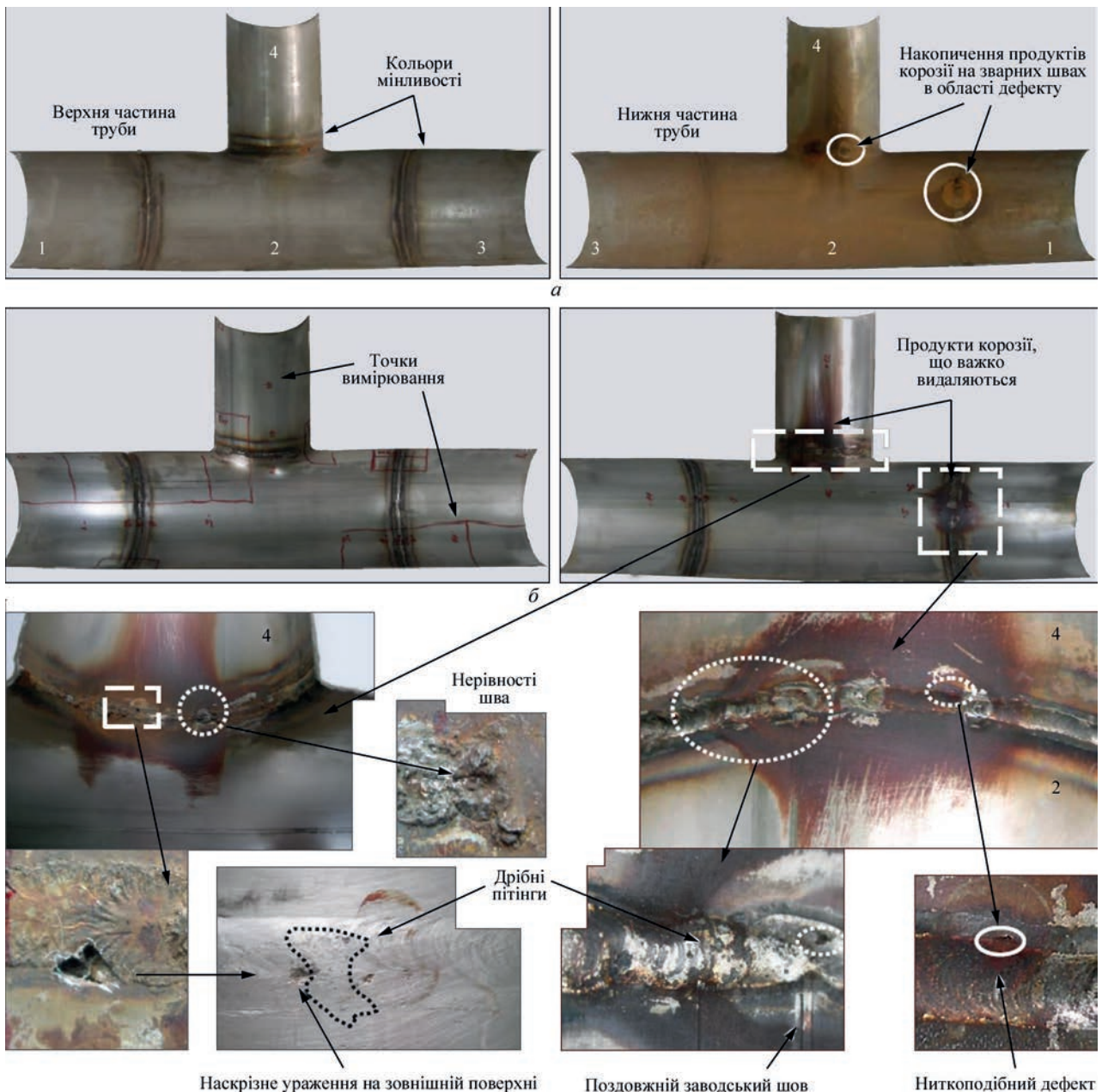


Рис. 2. Зовнішній вигляд зразка зварного з'єднання труб № 1–4: *a* – внутрішня поверхня з продуктами корозії; *б* – внутрішня поверхня після видалення продуктів корозії; *в* – дефекти в області швів

жовтуватий відтінок, що свідчило на присутність, окрім продуктів корозії заліза, більшого вмісту солей твердості (кальцію та магнію) порівняно з відкладеннями, відібраними на зварному шві. З результатів проведеного аналізу усередненої проби, складовими відкладень, які виявлені на внутрішній поверхні зразка, є: залізо (22,9 %), хром (7,19 %), нікель (2,07 %), молібден (0,636 %), мідь (0,375 %), кремній (0,845 %), марганець (0,388 %), що є складовими металу труб. Осад, що утворився з води, містить кальцій (10,1 %) та магній (0,426 %). Осадження з електролітів іонів більш благородного металу на менш благородний призводить до появи контактної корозії, яка може виникнути і без безпосереднього контакту різнорідних металів, якщо в середовищі присутні більш благородні метали. Наявність міді могла сприяти утворенню локальних пошкоджень труб під продуктами корозії внаслідок різниці потенціалів пар «мідь–нержавка сталь».

Огляд зразків. Для детального дослідження причин утворення наскрізних уражень вирізано зразок із горизонтально розміщеного трубопроводу діаметром 129 мм з товщиною стінки 2,0 мм. Зразок є зварним з'єднанням чотирьох труб (рис. 1), має три званих шва з магнітними властивостями. Локальні корозійні пошкодження зварних швів спостерігалися в нижній частині труби в більшій мірі, ніж у верхній.

Огляд зразка показав (рис. 2), що з внутрішнього боку в нижній частині труб деякі ділянки мають напливи на основний метал пористого характеру (рис. 2, а). По зоні термічного впливу в нижній частині труби виявлено наскрізний корозійний дефект, а ближче до верхньої частини труб – ниткоподібний початковий дефект по лінії сплавлення.

Внутрішня поверхня основного металу нижньої частини зразка вкрита майже рівномірним шаром осаду світло-бурого кольору, слабо зчепленого з поверхнею. Осад утворився внаслідок тривалого контакту з залишками води. Під осадом на зварному шві виявлено точкові ураження – пітінги, діаметром до 1 мм (рис. 2, а). У верхній частині зразка продукти корозії вкривають поверхню основного металу дуже тонким пилоподібним шаром світло-бурого кольору з жовтуватим відтінком (рис. 2, а).

В області зварного шва наявні товстіші шари продуктів корозії червоно-бурого кольору, місцями нарости продуктів корозії, які утворилися під час наскрізного руйнування. По обидва боки зварних швів видно смуги кольорів мінливості від світлого (темніше солом'яного) до темного (коричнево-

го та синього) відтінків, що утворилися в процесі зварювання (рис. 2, а, б). Ширина смуг кольорів мінливості 15...20 мм. На смугах кольорів мінливості після змивання залишається тонкий шар осаду світлого кольору, який важко видаляється. Зварний шов має нерівності, напливи, що є дефектами зварювання, і на яких затримувалися продукти корозії.

Після видалення осаду мийним засобом поверхня є блискучою, металевого кольору, на ній наявні наскрізні ураження в області зварних швів у вигляді точок та тріщин діаметром до 1 мм (рис. 2, в). Наприклад, наявне ураження в зоні перекриття ділянок зварного шва під час зварювання та лазерного поздовжнього шва, наскрізне ураження приблизно до 2 мм (рис. 2, в).

За результатами візуального огляду зразків зварних з'єднань труб встановлено, що труби, які монтувалися в горизонтальному положенні, у нижній частині мають дефекти зварювання: нерівності шва, напливи, протікання металу. Виявлено шар відкладень внаслідок наявності залишків води впродовж одного року. Наскрізні корозійні ураження відмічено в нижній частині труб. Згідно з ГОСТ 9.908 [13] ідентифіковано вид корозії, що призвела до наскрізних уражень труб: внутрішня, щілинна в дефектах зварних швів.

Визначення гетерогенності зварних з'єднань труб. Відомо, що метал має аустенітну структуру, якщо кількість феритної фази не більше 10 % [14]. Феритна фаза (дельта-ферит, ферит), яка може утворитися під час зварювання, виникає при кристалізації з рідкого стану хромонікелевих сталей аустенітного та аустенітно-феритного класу [15], має об'ємноцентровану кубічну кристалічну ґратку. Високий вміст феритної фази вказує на схильність аустенітної нержавкої сталі до окрихчення.

За результатами визначення гетерогенності зварних з'єднань методом феритометрії (рис. 3, крива 1, 2) встановлено, що метали труб і зварних швів відрізняються вмістом феритної фази, яка у зварних швах становить 4,0...13,0 %, у зоні термічного впливу – 0...2 %, в основному металі – 0. Різниця потенціалів між основним металом і зварним швом, визначена методом потенціометрії, становить від 0,094 В (з'єднання 1–2) до 0,215 В (з'єднання 2–3) (рис. 3, крива 3). У зварних конструкціях різниця потенціалів між зварним швом і основним металом не має перевищувати 30...50 мВ [16]. Різниця вмісту феритної фази в основному металі труб і зварному шві стала причиною електрохімічної гетерогенності зварного з'єднання.

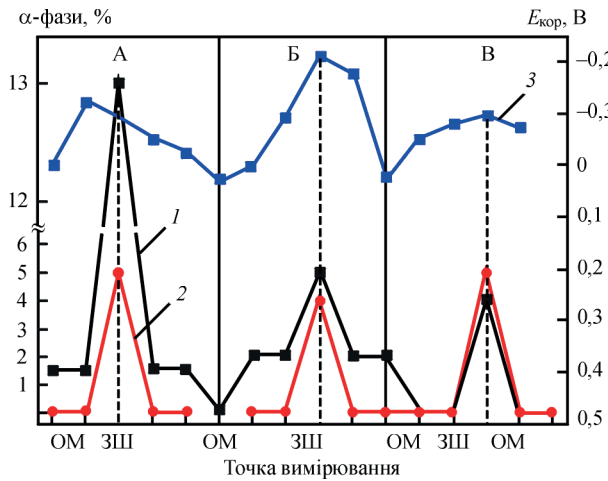


Рис. 3. Вміст феритної фази з боку зовнішньої (1) та внутрішньої (2) поверхні, розподіл потенціалів корозії по внутрішній поверхні (3) зразка труби. А, Б, В – з'єднання труб 1–2, 2–3, 2–4 відповідно (рис. 2): ЗШ – зварний шов, ОМ – основний метал

Таким чином, відмінності фазового складу основного металу труб і зварного шва створюють електрохімічну гетерогенність, що підтверджено вимірними потенціалами корозії.

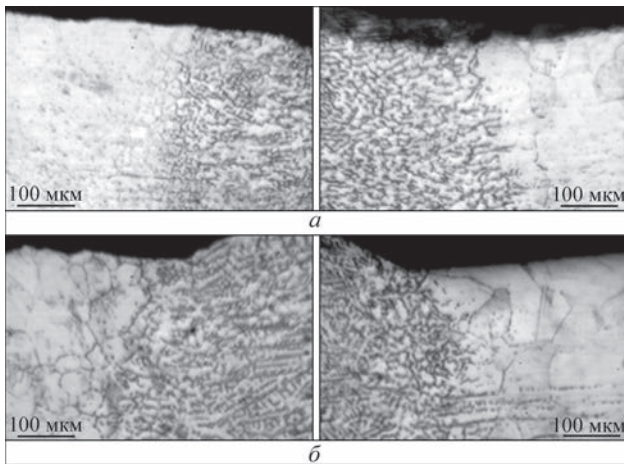


Рис. 4. Фотографії мікросліфів зварного з'єднання труб до корозійних випробувань (а) і після випробувань тривкості проти міжкристалітної корозії (б), $\times 100$

Тривкість проти локальної корозії. У результаті випробування відповідно до ДСТУ ISO 3651-2 (6.1. Метод А) [7] показано, що зварні з'єднання труб є тривкими проти міжкристалітної корозії – міжкристалітних тріщин не виявлено (рис. 4).

Оскільки робоча поверхня зразків – внутрішня та контактує з корозійним середовищем, пітінгостійкість після прискорених випробувань [8] (ГОСТ 9.912) оцінювали за числом пітінгів, що утворилися на внутрішній поверхні (рис. 5).

Пітінги на зварному шві, що утворилися в процесі експлуатації та отримали розвиток під час прискорених випробувань, не враховували. Найбільші пітінги (діаметром до 1,5 мм) наявні на гнущій частині основного металу труби 4 на відстані 1,5...2 мм від зварного шва. Через 72 год випробувань основний метал труб локальних уражень не має. Натомість через 24 год середнє число пітінгів на одиницю площі внутрішньої поверхні для з'єднань 1–2, 2–3, 2–4 становило 740 (ЗТВ), 341 (ОМ) і 2308 (ЗТВ) шт/м² відповідно. Через 72 год випробувань кількість пітінгів не змінилася, що вказувало на ймовірний їх розвиток вглиб товщини металу. Загалом основний метал труб зразка є тривким проти пітінгової корозії. Проте кільцевий шов, зона термічного впливу та заводський шов схильні до пітінгової корозії. З часом під дією експлуатаційних чинників внаслідок зниження захисної здатності оксидної плівки на поверхні можливий розвиток пітінгової корозії.

Металографічні дослідження зварних з'єднань зразка у поперечному перерізі показали (рис. 6, 7), що основний метал має аустенітну структуру. Структура металу шва має стовбчастий характер, відповідає типовій структурі для металу шва, виконаного на сталі аустенітного класу. Розмір зерна, визначений відповідно до ДСТУ ISO 643 [17], має номер 5–6 для основного металу та 8–9 – для зварного

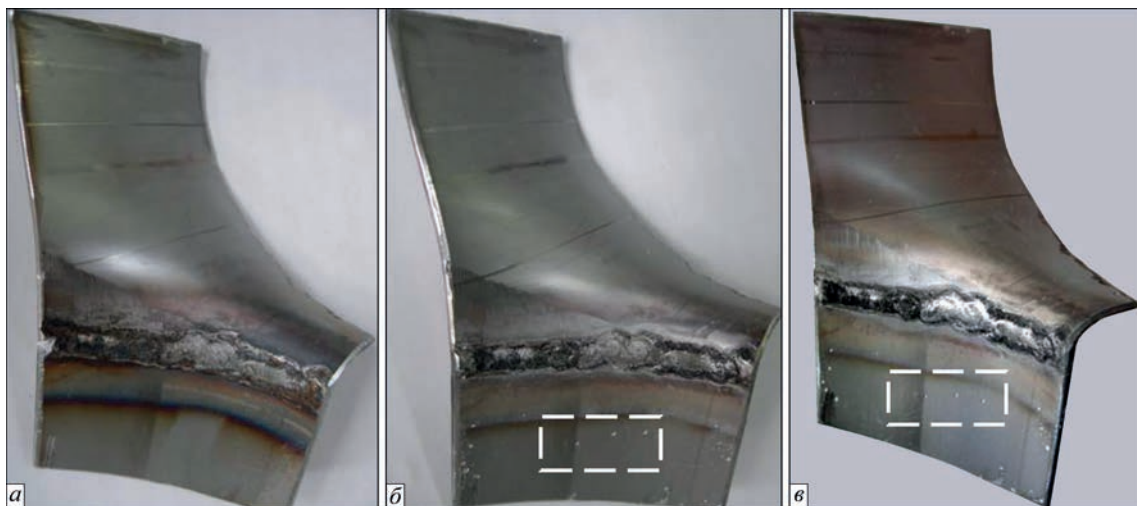


Рис. 5. З'єднання труб до випробувань тривкості проти пітінгової корозії (а) та після випробувань впродовж 24 год (б), 72 год (в)

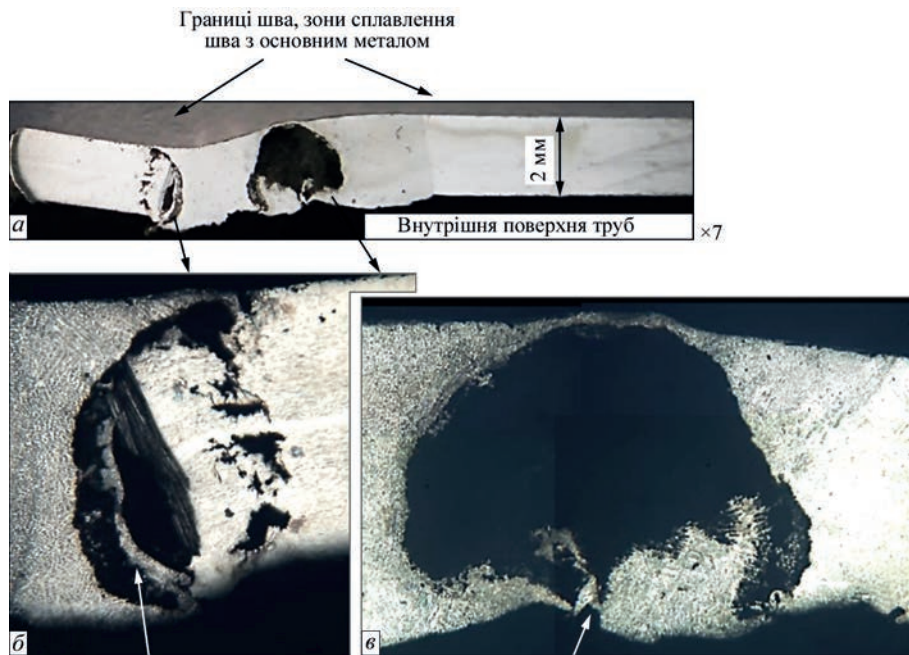


Рис. 6. Наскрізні дефекти у шві: а – поперечний переріз зразка, ×7; б – несплавлення шва з основним металом, корозія, ×27; в – непровар кореня шва, корозія металу шва у порожнині з боку внутрішньої поверхні, ×27

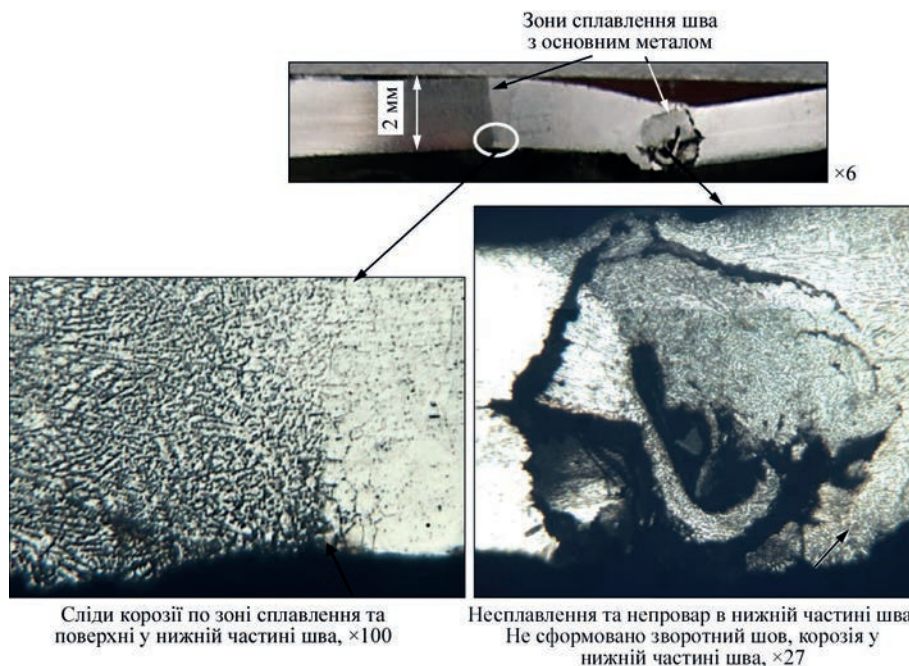


Рис. 7. Наскрізний дефект (частина порожнини) по зоні сплавлення

шва. У зварних з'єднаннях виявлено несучільності у вигляді порожнин розміром до 2,2 мм, які виникли через несплавлення шва з основним металом, неповного провару в корені шва, що призвело до наскрізнних уражень внаслідок контакту з залишками води. Проте корозійні пошкодження з боку внутрішньої поверхні в зоні кореня шва завглибшки до 0,15 мм не є основною причиною руйнування труб.

Висновки

За результатами дослідження встановлено, що наскрізні ураження на внутрішній поверхні зразка зварного з'єднання труб зі сталі AISI 316L обу-

мовлені взаємодією комплексу чинників, а саме: наявністю дефектів зварного з'єднання внаслідок непровару в корені шва; розвитком щілинної корозії при тривалому контакті впродовж одного року з залишками води після пусканалагоджувальних робіт при простоюванні підприємства, під час якого руху води в трубопроводах не було. Наголошено, що властивості сталі під час і після зварювання залежать не тільки від марки сталі, а також і від умов підготовки до зварювання та його виконання.

Список літератури

1. ДСТУ 3830-98 Коррозія металів і сплавів. Терміни та визначення основних понять.

2. BS EN 12502-4:2004 *Protection of metallic materials against corrosion – Guidance on the assessment of corrosion likelihood in water distribution and storage systems – Part 4: Influencing factors for stainless.*
3. Martins, C.M.B., Moreira, J.L., Martins, J.I. (2014) Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316. *Engineering Failure Analysis*, **39**, 65–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.017>
4. Degremont® *water handbook. stainless steel.* <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/corrosion-in-metal-and-concrete/corrosion-in-metallic-materials/stainless-steel>.
5. ДСТУ EN 10088-1:2019 *Сталі нержавкві. Частина 1. Перелік нержавквих сталей* (EN 10088-1:2014, IDT)
6. Сокол И.Я., Ульянин Е.А., Фельдгандлер Э.Г. и др. (1989) *Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас. Справ.* изд. Москва, Металлургия.
7. ДСТУ EN ISO 3651-2:2005 *Сталі корозійнотривкі. Визначення тривкості до міжкристалічної корозії. Частина 2. Феритні, аустенітні та феритно-аустенітні (двофазні) сталі. Випробування на корозію у сірчаноокислотних середовищах* (EN ISO 3651-2:1998, IDT).
8. ГОСТ 9.912-89 *Единая система защиты от коррозии и старения. Сталы и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии.*
9. EN 10088-2:2005 *Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes.*
10. ASTM A 240/A 240M-04 *Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications.*
11. ДСанПіН 2.2.4-171-10 *Державні санітарні норми та правила. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною.*
12. Третьякова О.И. (2013) *Избранные лекции по химии почв. Учебно-методическое пособие.* Краснодар.
13. ГОСТ 9.908-85 ЕСЗКС. *Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.*
14. Каховский Н.И. (1975) *Сварка высоколегированных сталей.* Техніка.
15. ДСТУ EN ISO 8249:2019 *Зварювання. Визначення феритної фази (FN) у металі зварного шва аустенітних і дуплексних феритно-аустенітних Cr–Ni нержавквих сталей* (EN ISO 8249:2018, IDT; ISO 8249:2018, IDT).
16. ГОСТ 9.005-72 *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами.*
17. ДСТУ ISO 643:2009 (ISO 643:2003, IDT) *Сталі. Мікрографічний метод визначення видимого розміру зерна.*
2. BS EN 12502-4:2004 *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.*
3. Martins, C.M.B., Moreira J.L., Martins J.I. (2014) Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316. *Engineering Failure Analysis*, **39**, 65–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.017>
4. Degremont® *water handbook. stainless steel.* <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/corrosion-in-metal-and-concrete/corrosion-in-metallic-materials/stainless-steel>.
5. DSTU EN 10088-1:2019 *Stainless steels – Pt 1. List of stainless steels* [in Ukrainian].
6. Sokol, I.Ya., Ulyanin, E.A., Feldgandler, E.G. et al. (1989) *Structure and corrosion of metals and alloys: Atlas.* Ref. ed. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. DSTU EN ISO 3651-2:2005 *Corrosion resistant steels. Determination of resistance to intergranular corrosion. Pt 2. Ferritic, austenitic and ferritic-austenitic (duplex) steels. Corrosion test in media containing sulfuric acid* (EN ISO 3651-2:1998, IDT) [in Ukrainian].
8. GOST 9.912-89 *Unified system of corrosion and protection ageing. Corrosion-resistant steels and alloys. Method of accelerated tests for resistance to pitting corrosion* [in Russian].
9. EN 10088-2:2005 *Stainless steels. Pt 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes.*
10. ASTM A 240/A 240M-04 *Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications.*
11. DСанПиН 2.2.4-171-10 *National sanitary standards and regulations. Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption* [in Ukrainian].
12. Tretjakova, O.I. (2013) *Selected lectures on soil chemistry: Educational and methodological manual.* Krasnodar [in Russian].
13. GOST 9.908-85 ESZKS *Metals and alloys. Methods for determination of corrosion and corrosion-resistance indices* [in Russian].
14. Kakhovsky, N.I. (1975) *Welding of high-alloyed steels.* Tekhnika [in Russian].
15. DSTU EN ISO 8249:2019 *Welding. Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr–Ni stainless steel weld metals* (EN ISO 8249:2018, IDT; ISO 8249:2018, IDT) [in Ukrainian].
16. GOST 9.005-72 *Unified system of protection against corrosion and aging. Metals, alloys, metallic and non-metallic inorganic coatings. Permissible and impermissible contacts with metals and non-metals* [in Russian].
17. DSTU ISO 643:2009 (ISO 643:2003, IDT) *Steels. Micrographic method of determining the apparent grain size* [in Ukrainian].

References

CAUSES OF DAMAGE TO A PIPELINE OF AISI 316L STEEL

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

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

E-mail: lnyrkova@gmail.com

A damaged pipeline of stainless AISI 316L steel for cold water transportation, at a food industry enterprise after construction and stoppage for one year was investigated. A visual inspection of the specimens of welded joints of four pipes established that the pipes, mounted in a horizontal position, have the following welding defects in the lower part: weld irregularities, overlaps and metal leakage. It was shown that the welded pipe joints are durable against intergranular corrosion, and the base metal is resistant to pitting corrosion. The damage to the examined specimen of the welded pipe joint, which was confirmed by metallographic examinations, was caused by non-fusion of the weld with the base metal and partial penetration at the weld root, which led to through damages due to contact with residual water after hydraulic tests as a result of crevice corrosion. 17 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: stainless steel, welded joint, potentiometry, optical microscopy, pitting corrosion, crevice corrosion

Отримано 26.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 29.04.2024

Прийнято 04.06.2024

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗВАРНИХ ШВІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ДЕФЕКТОСКОПА НА БАЗІ СМАРТФОНА

Г. Мок¹, В.М. Учанін², Ю.Ю. Лисенко³

¹Університет Отто фон Геріке, Магдебург, Німеччина

²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: vuchanin@gmail.com

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37

Наведено особливості побудови та можливостей вихрострумове дефектоскопа на базі смартфона із застосуванням EddySmart, який в перспективі може забезпечити дистанційний контроль із бездротовим передаванням результатів контролю каналами мобільного зв'язку для подальшого аналізу та зберігання. Розглянуто перспективи застосування вихрострумове перетворювачів (ВСП) подвійного диференціювання щодо контролю зварних швів конструкцій із алюмінієвих сплавів. Представлено характеристики та результати досліджень низькочастотних ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 0801 і МДФ 1001М з діаметрами робочої поверхні 8 і 10 мм відповідно, які розроблено для виявлення дефектів зварних швів із алюмінієвих сплавів. Показано, що для виявлення протяжних і локальних дефектів зварних швів конструкцій із алюмінієвих сплавів на більшій глибині перевагу слід надавати вдосконаленому ВСП типу МДФ 1001М з діаметром робочої поверхні 10 мм, який забезпечує більший рівень сигналів і кращу завадостійкість. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: неруйнівний контроль, вихрострумове перетворювач, дефектоскоп на базі смартфона, зварний шов, алюмінієвий сплав

Вступ. Сьогодні кишенькові смартфони стали невід'ємною частиною нашого життя. Смартфони відрізняються від звичайних мобільних телефонів наявністю повноцінної операційної системи, яка відкрита для розробки програмного забезпечення на відміну від мобільних телефонів, у яких операційна система закрита. Крім того, смартфони мають риси персонального комп'ютера з постійним сховищем інформації, оперативною пам'яттю та порівняно потужним центральним і графічним процесорами. Сучасний смартфон може мати у своєму складі різноманітні датчики (зокрема акселерометр, гіроскоп, магнітометр, датчик освітлення, барометр, термометр, датчик Холла та сканер відбитків пальців), що збільшує його багатфункціональність і можливість використання не тільки для зв'язку або розваг. Дещо нестандартним є використання смартфона в якості вимірювального приладу. Відомі приклади створення на основі смартфона повноцінної функціонуючого мікроскопа за допомогою гумової насадки на камеру з лінзою діаметром в 1 мм. Роздільна здатність такого мікроскопа складала близько 1,5 мікрона. Іншим цікавим прикладом є реалізація на основі смартфона спектрометра для аналізу світлових хвиль.

Відомі також приклади реалізації на основі смартфона повноцінних систем неруйнівного

контролю (НК), технічної діагностики та моніторингу [1–9]. У [1–3] наведено створений у Київському політехнічному інституті імені Ігоря Сікорського ультразвуковий дефектоскоп, який складається з електронного блоку з ультразвуковим сенсором і смартфона. Обмін інформацією між сенсорним блоком і смартфоном відбувається за допомогою бездротових мереж, що використовують технологію Bluetooth. Алгоритм роботи дефектоскопа реалізовано за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке працює в середовищі операційної системи Android. Аналогічний підхід реалізовано в розробці французької фірми LECOEUR ELECTRONIQUE [4]. Інший приклад стосується системи вібраційного моніторингу технічного стану конструкцій [5]. Автори розробили системний застосунок для Android, який може легко перетворити кілька смартфонів у бездротову систему вібраційного моніторингу конструкцій. Використано архітектуру «сервер-клієнт», коли один смартфон призначений для системи дистанційного керування всіма іншими смартфонами, що дозволяє смартфону-серверу швидко та легко підключати кілька смартфонів із датчиками для створення бездротової мережі. Запропоновано також метод синхронізації різних

смартфонів для одночасного вимірювання вібрації конструкцій.

Успішною реалізацією приладу НК на основі смартфона є вихрострумовий дефектоскоп (ВД) із застосунком EddySmart, який успішно використано насамперед для навчання студентів [10, 11]. Але вже сьогодні амбіції цієї розробки виходять за рамки завдань, визначених на початковому етапі його створення. У [12] вона розглядається як паросток створення перспективних технологій в рамках концепції НК 4.0. Автори, зокрема, звертають увагу на можливість бездротового пересилання результатів контролю каналами мобільного зв'язку для подальшого аналізу та зберігання. ВД на основі смартфона із застосунком EddySmart ефективно використовувався нами для мобільної демонстрації можливостей нових вихрострумових технологій виявлення внутрішніх дефектів авіаційних і космічних конструкцій, що виключало необхідність використання громіздких класичних ВД.

Низькочастотні вихрострумові перетворювачі (ВСП) подвійного диференціювання знайшли широке застосування для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів конструкцій із немагнітних матеріалів [13]. Їх особливістю є висока чутливість до локальних дефектів порівняно з класичними ВСП. Тому ВСП подвійного диференціювання є перспективними для створення технологій виявлення дефектів зварних швів, особливо коли контроль складнішає через сигнали завад, створених неоднорідністю питомої електропровідності та зміною геометрії (валик підсилення, депланація кромки тощо) у зоні зварного шва. Тут необхідно використовувати методи інтерпретації сигналів із використанням комплексної площини дисплея ВД [14]. ВСП подвійного диференціювання вже знайшли своє застосування, у тому числі для виявлення непроварів і пор зварних швів [15, 16]. У повздовжніх зварних швах обичайок космічних конструкцій із алюмінієвого сплаву 1201, виконаних електронно-променевим зварюванням, успішно виявляли поверхневі дефекти типу несплавлення (злипання). Дефекти цього типу можуть утворюватися при відхиленні електронного променя від стику зварюваних частин. Через часткове дифузійне з'єднання (злипання) зварюваних крайок такий дефект є надзвичайно складним для виявлення традиційними методами НК. Інший приклад стосується проблеми виявлення зварювальних поверхневих і внутрішніх дефектів різного типу в зварних швах космічних конструкцій зі сплавів типу АМГ-5 і АМГ-6, виконаних дуговим зварюванням. Технології контролю на основі використання низькочастотних ВСП забезпечили виявлення не тільки поверхневих дефектів, а й підповерхневих дефектів типу пор, непроварів,

включень та оксидних плівок, незважаючи на завади, створені неоднорідністю геометрії зварного шва. Результати подальших досліджень показали можливість вдосконалення та оптимізації ВСП для контролю зварних швів з метою зменшення розмірів ВСП з відповідним покращенням роздільної здатності за одночасного збільшення глибини контролю, що дозволить виявляти протяжні та локальні дефекти на більшій глибині.

У даній роботі наведено особливості побудови та можливості ВД на базі смартфона та проведені з його допомогою дослідження вдосконалених низькочастотних ВСП подвійного диференціювання для виявлення внутрішніх дефектів зварних швів із алюмінієвих сплавів.

1. Побудова, основні функції та можливості вихрострумового дефектоскопа на основі смартфона. Розглянемо основні функції, які необхідно реалізувати для створення ВД на базі смартфона, за допомогою узагальненої функціональної схеми типового ВД (рис. 1). Створення первинного синусоїдального електромагнітного поля необхідної робочої частоти виконується керованим генератором 1 і підсилювачем потужності 2, які забезпечують необхідний рівень струму в генераторній обмотці ВСП 3, яка взаємодіє з об'єктом контролю (ОК) 4, індуючи в ньому вихрові струми. Результуюче електромагнітне поле ОК 4 створює сигнал у вимірювальній обмотці ВСП 3, яке несе компоненти, що обумовлені небалансом ВСП (сигнал вимірювальної обмотки при встановленні на бездефектну частину ОК) і впливом дефекту в ОК під час сканування його поверхні. Поява дефекту під час сканування змінює розподіл вихрових струмів, що впливає на вхідний сигнал ВСП, реалізуючи модуляцію вихідного сигналу ВСП на робочій частоті. Вихідний сигнал ВСП надходить на вхідний каскад 5, який забезпечує його покращення шляхом підсилення до необхідного рівня та ВЧ-фільтрації. Далі сигнал надходить на фазочутливі детектори 6 і 7, які реалізують операцію демодуляції сигналу ВСП, формуючи на виході сигнали на постійному струмі, що відповідають реальній і мнимій компонентам вихідного сигналу ВСП. Далі вихідні сигнали фазочутливих детекторів 6 і 7 через фільтри 8 надходять на суматори 9 компенсації небалансу ВСП, на інший вхід яких надходять необхідні для компенсації небалансу сигнали схеми 10 формування сигналу компенсації небалансу з кнопкою запуску 11. Для зменшення впливу завад використовують фільтри нижніх (НЧ) або верхніх частот (ВЧ) з можливістю регулювання частоти зрізу. При одночасному застосуванні обох фільтрів забезпечувався режим смугового фільтру. Для компенсації сигналу небалансу ВСП його встановлюють на

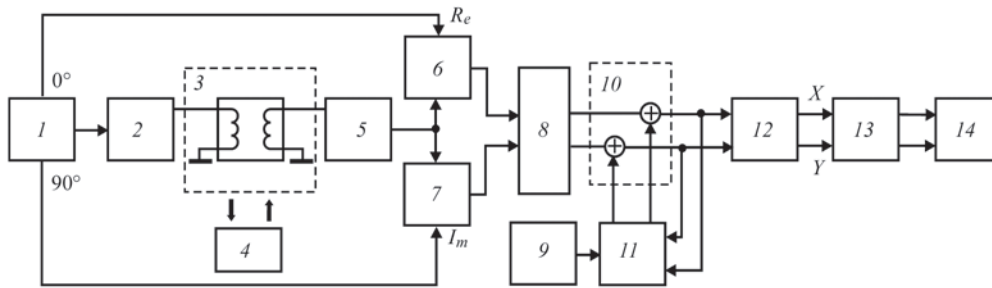


Рис. 1. Функціональна схема побудови типового ВД: 1 – генератор; 2 – підсилювач потужності; 3 – ВСП; 4 – ОК; 5 – вхідний каскад; 6 і 7 – фазочутливі випрямлячі; 8 – фільтри; 9 – суматор; 10 – схема формування сигналу компенсації небалансу з кнопкою запуску 11; 12 – фазообертач; 13 – підсилювач X і Y складових; 14 – дисплей

бездефектну частину зразка, після чого оператор запускає процес балансування натисканням кнопки 11. Таким чином, реальна (R_e) та уявна (I_m) компоненти сигналу позбуваються складових, що відповідають положенню ВСП на бездефектній частині зразка (ОК). Ця операція дозволяє виділити компоненти, які відповідають тільки впливу дефекту. Далі отримані компоненти надходять на фазообертач 12, який обертає комплексну площину ВД на кут $0...360^\circ$, що дозволяє маніпулювати годографами сигналів у комплексній площині ВД під час сканування поверхні ОК, скеровуючи корисний сигнал, наприклад, у вертикальному напрямку дисплея. З виходу фазообертача 12 через підсилювач 13 горизонтальна X і вертикальна Y компоненти надходять на дисплей ВД, який відображує зміни сигналу ВСП у комплексній площині (режим Y/X) або зміни реальної або уявної складових сигналу ВСП у режимі часової розгортки (режим Y/t або X/t).

Сучасний смартфон містить усі компоненти, необхідні для побудови вихрострумowego приладу з наведеними вище функціями (рис. 1). Його аудіоінтерфейс дозволяє одночасно передавати та приймати сигнали частотою до 20 кГц, що достатньо для роботи у низькочастотному діапазо-

ні вихрострумowego контролю. Таким чином, основна ідея розробки полягає у використанні для побудови вихрострумowego приладу звукової системи смартфона на відміну від ультразвукових систем на основі смартфона, коли необхідні для створення дефектоскопа вузли (зокрема генератори та елементи схеми обробки сигналів) виконано в окремому блоці [10, 11]. У цьому випадку ВСП підключають безпосередньо до аудіороз'єму смартфона, який забезпечує достатньо потужний для його роботи сигнал без необхідності використовувати додатковий підсилювач потужності. Якість 4-х-контактного аудіороз'єму відіграє важливу роль, тому необхідно вибирати варіант виконання з позолоченими контактами. Для такого підключення кабель ВСП оснащений електронною схемою, що імітує гарнітуру. Розроблений в Магдебургському університеті Отто фон Геріке (Otto von Guericke) дефектоскоп передбачає використання смартфона з операційною системою Android, зокрема серії Samsung Galaxy.

Узагальнену структуру програмного застосунку EddySmart наведено на рис. 2, де також показано відповідність індикації результатів контролю та операцій налаштування різним зонам сенсорного екрану смартфона. Звідси видно, що більшість

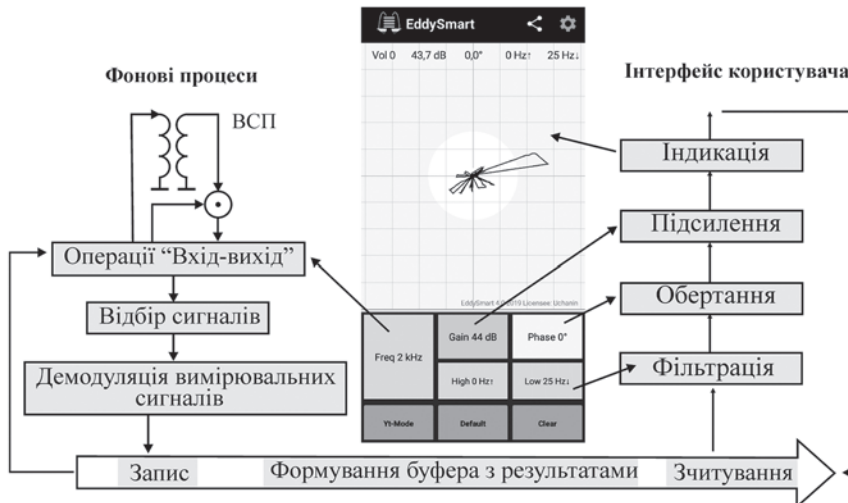


Рис. 2. Узагальнена структура та вигляд дисплея програмного застосунку EddySmart

функцій ВД, наведених на рис. 1, реалізовано програмним способом.

Фоновий процес одночасно обробляє буфери сигналів ВСП (вихідного збудження та вхідного вимірювання). Він заповнює двоканальний буфер синусоїдального сигналу збудження та спорожнює одноканальний буфер вхідного сигналу, який містить суміш сигналів збудження та вимірювання. Вимірювальний сигнал відокремлюється в отриманому сигналі та демодулюється відносно сигналу збудження ВСП. Цей процес реалізується без участі користувача (оператора-дефектоскопіста).

Інтерфейс користувача забезпечує індикацію результатів контролю, підсилення для збільшення отриманих годографів та їх обертання в комплексній площині, а також фільтрацію. Вибором цих параметрів керує оператор-дефектоскопіст за допомогою сенсорного екрану смартфона.

Верхній рядок дисплея смартфона показує рівень аудіосигналу, який регулюється відповідною кнопкою смартфона, а також рівень підсилення, кут повороту комплексної частоти та частоти зрізів НЧ і ВЧ фільтрів. Більша частина дисплея смартфона призначена для індикації результатів контролю, яка може відображати годографи сигналів від дефектів у комплексній площині або зміни сигналу від дефекту в режимі часової розгортки. Ця частина дисплея призначена також для регулювання підсилення та повороту комплексної площини шляхом легко засвоюваних оператором маніпуляцій [10, 11]. Нижня третина сенсорного дисплея призначена для вибору режимів і параметрів контролю відповідними кнопками, у тому числі: вибір робочої частоти (Freq – ліва верхня), перемикання на режим часової розгортки (Yt-mode – ліва нижня), вмикання підсилення (Gain dB – верхня в середньому ряду), вибір частоти

зрізу фільтра високих частот (High Hz – середня), операції відміни (Default – нижня в середньому ряду), вибору фази (Phase – верхня в правому ряду), вибір частоти зрізу фільтра низьких частот (Low Hz – середня в правому ряду) і вибір режиму запису або очищення екрану (Record або Clear – нижня в правому ряду).

Представлені можливості ВД на базі смартфона дозволяють використати його для вибору оптимальної робочої частоти та дослідження чутливості ВСП до підповерхневих дефектів різного типу.

2. Дослідження низькочастотних ВСП подвійного диференціювання для виявлення дефектів зварних швів конструкцій із алюмінієвих сплавів.

2.1. Досліджувані ВСП, зразки та методика досліджень.

Досліджували експериментальні зразки двох низькочастотних ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 0801 і МДФ 1001М з діаметрами робочої поверхні 8 і 10 мм відповідно (рис. 3), які розроблено для виявлення дефектів зварних швів із алюмінієвих сплавів. Особливістю ВСП типу МДФ 0801 є більша роздільна здатність, необхідна для виявлення не тільки видовжених дефектів типу тріщина, а й локальних дефектів достатньо малого діаметра типу пора або включення. Перевагою ВСП типу МДФ 1001М є збільшена глибина контролю за рахунок збільшення діаметра обмоток. Параметри експериментальних ВСП наведено в табл. 1, де: $D_{\text{ВСП}}$ – діаметр ВСП; $D_{\text{ф}}$ – діаметр феритового осердя, $w_{\text{ОЗ}}$ і $w_{\text{ВО}}$ – кількість витків обмотки збудження та вимірювальної обмотки відповідно; $L_{\text{ОЗ}}$ і $L_{\text{ВО}}$ – індуктивності обмотки збудження та вимірювальної обмотки відповідно.

Для дослідження впливу глибини залягання дефекту незалежно від його розміру викори-



Рис. 3. Досліджувані ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 0801 і МДФ 1001М

Таблиця. 1. Параметри досліджуваних ВСП

Тип ВСП	$D_{\text{ВСП}}$, мм	$D_{\text{ф}}$, мм	$w_{\text{ОЗ}}$	$w_{\text{ВО}}$	$L_{\text{ОЗ}}$, мкГн	$L_{\text{ВО}}$, мГн
МДФ 0801	8,0	1,85	215	416	940	3,7
МДФ 1001М	10,0	2,9	125	420	310	1,4

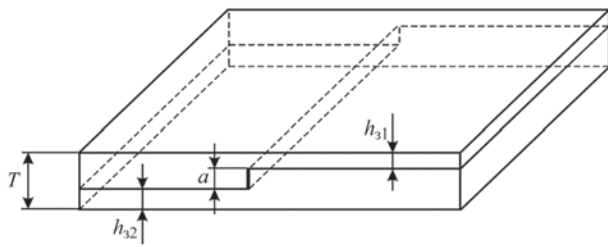


Рис. 4. Складений СЗ для відтворення двох дискретних значень глибини залягання дефекту

стано складені стандартні зразки (СЗ), кожний із яких дозволяє імітувати дефект однакової глибини для двох дискретних значень глибини залягання (рис. 4). Дві частини СЗ складаються таким чином, що після їх суміщення утворюється прямокутна пластина завтовшки T з перпендикулярним до поверхні СЗ стиком двох частин, який відтворює підповерхневий дефект завглибшки a . З різної поверхні СЗ глибини залягання дефекту h_{31} і h_{32} є різними відповідно до співвідношення $h_{31} + h_{32} + a = T$. Для досліджень використано два СЗ із алюмінієвого сплаву Д16 Т, параметри яких представлено в табл. 2.

Таким чином, представлені СЗ дозволяють отримати чотири дискретні значення (1,0; 2,0; 3,0 і 4,0 мм) глибини залягання дефекту.

Таблиця 2. Параметри СЗ для дослідження впливу глибини залягання дефекту

Тип СЗ	Товщина СЗ T , мм	Глибина дефекту a , мм	Глибина залягання, мм	
			h_{31}	h_{32}
СОП 7.2.2-3	7,0	2,0	2,0	3,0
СОП 7.2.1-4	7,0	2,0	1,0	4,0

4,0 мм) глибини залягання однакового за розмірами підповерхневого дефекту типу тріщина та дослідити вплив глибини залягання дефекту на сигнал ВСП незалежно від розмірів дефекту.

2.2. Порівняльний аналіз сигналів ВСП від підповерхневих дефектів. На рис. 5 наведено сигнали ВСП типу МДФ 0801 від дефектів СЗ з різною глибиною залягання в комплексній площині на робочій частоті 2 кГц, яка для цих дефектів виявилась оптимальною.

На рис. 6 наведено сигнали ВСП типу МДФ 1001М від дефектів СЗ з різною глибиною залягання в комплексній площині на робочій частоті 2 кГц.

Аналіз сигналів ВСП на рис 5, 6 показує, що ВСП типу МДФ 0801 і МДФ 1001М дозволяють виявляти усі дефекти СЗ з глибиною залягання до 4 мм, хоча для обох ВСП амплітуда сигналів від дефектів суттєво зменшується зі збільшенням глибини їх залягання. Одночасно зі збільшенням глибини залягання напрямок годографа від дефекту (фаза сигналу) в комплексній площині розгортається за годинниковою стрілкою, що в перспективі може бути використано для визначення глибини залягання дефекту. При цьому ВСП типу МДФ

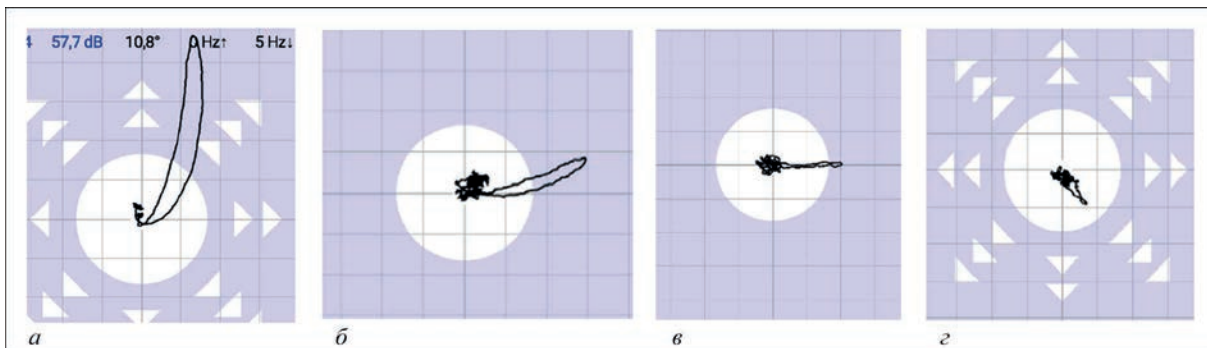


Рис. 5. Сигнали ВСП типу МДФ 0801 на робочій частоті 2 кГц від дефектів СЗ (рис. 2) з глибиною залягання, мм: 1 (а); 2 (б); 3 (в); 4 (з); коефіцієнт підсилення для дефектів з різною глибиною залягання, дБ: 58 (а); 64 (б); 70 (в, з)

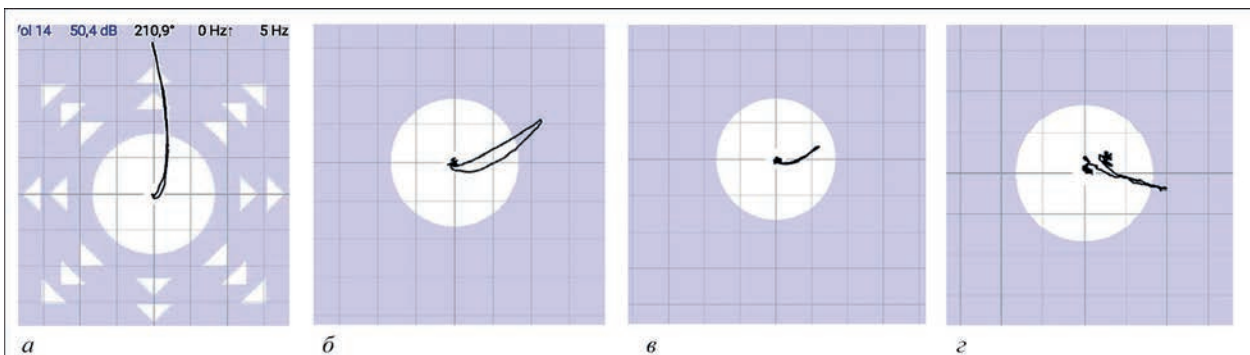


Рис. 6. Сигнали ВСП типу МДФ 1001М на робочій частоті 2 кГц від дефектів СЗ (рис. 2) з глибиною залягання, мм: 1 (а); 2 (б); 3 (в); 4 (з); коефіцієнт підсилення для дефектів з різною глибиною залягання, дБ: 50 (а); 56 (б-з)

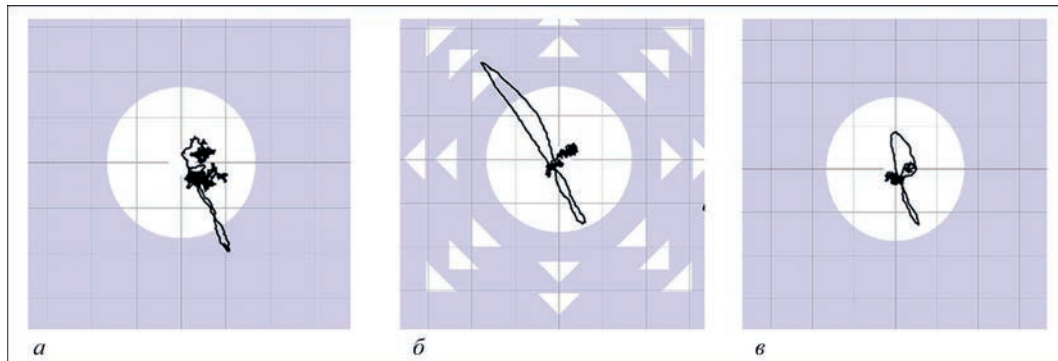


Рис. 7. Сигнали ВСП типу МДФ 0801 (а) і МДФ 1001М (б, в) на робочій частоті 2 кГц від підповерхневих локальних дефектів діаметром 1,0 мм з глибиною залягання 0,6 мм (а, б) і 1,0 мм (в); коефіцієнт підсилення для дефектів з різною глибиною залягання, дБ: 66 (а); 62 (б, в)

0801 вимагає більшого підсилення сигналу. Зокрема для виявлення дефекту з глибиною залягання 4 мм за допомогою ВСП типу МДФ 0801 необхідно підсилення 70 дБ і лише 56 дБ необхідно при використанні ВСП типу МДФ 1001М. Це свідчить про більші можливості ВСП типу МДФ 1001М за необхідності виявляти підповерхневі дефекти, оскільки зі збільшенням підсилення збільшується рівень завад, що видно з порівняння сигналів на рис 3 і 4. Але не слід забувати, що ВСП типу МДФ 0801 може мати потенційну перевагу щодо роздільної здатності та можливості виявляти локальні дефекти меншого розміру через суттєво менший діаметр використаних феритових осердь (див. табл. 1).

Для дослідження сигналів від підповерхневих локальних дефектів використано пластину із алюмінієвого сплаву Д16Т завтовшки 6 мм з двома плоскодонними отворами діаметром 1,0 мм на різну глибину, імітуючи підповерхневі локальні дефекти з глибиною залягання 0,6 і 1,0 мм. Відповідні сигнали для ВСП типу МДФ 0801 і МДФ 1001М на робочій частоті 2 кГц наведено на рис. 7.

Отримані сигнали (рис. 7) показують, що ВСП типу МДФ 0801 і МДФ 1001М забезпечують виявлення локального дефекту діаметром 1 мм. Але ВСП типу МДФ 0801 дозволяє ідентифікувати тільки дефект з глибиною залягання 0,6 мм (рис. 7, а). У той же час, тут сигнал від дефекту спотворено високим рівнем завад порівняно з сигналом ВСП типу МДФ 1001М від цього ж дефекту (рис. 7, а).

Підсумовуючи отримані на рис 6, 7 результати зазначимо, що за необхідності виявляти протяжні та локальні дефекти на більшій глибині перевагу слід надавати вдосконаленому ВСП типу МДФ 1001М, який забезпечує більший рівень сигналів, створених підповерхневими дефектами, та кращу завадостійкість.

Висновки

Розглянуто особливості побудови та можливості вихрострумового дефектоскопу на базі смартфона із застосунком EddySmart, який в перспективі може забезпечити дистанційний контроль з

бездротовим передаванням результатів контролю каналами мобільного зв'язку для подальшого аналізу та зберігання. Проведено аналіз перспектив використання вихрострумових перетворювачів подвійного диференціювання для контролю зварних швів конструкцій із алюмінієвих сплавів. Представлено характеристики та результати досліджень низькочастотних ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 0801 і МДФ 1001М з діаметрами робочої поверхні 8 і 10 мм відповідно, які розроблено для виявлення дефектів зварних швів із алюмінієвих сплавів. Показано, що для виявлення протяжних і локальних дефектів зварних швів конструкцій із алюмінієвих сплавів на більшій глибині перевагу слід надавати вдосконаленому ВСП типу МДФ 1001М, який забезпечує більший рівень сигналів та кращу завадостійкість.

Список літератури/References

1. Petryk, V., Protasov, A., Galagan, R. et al. (2020) Smartphone-based automated non-destructive testing devices. *Devices and Methods of Measurements*, **11**(4), 272–278. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-4-272-278>
2. Петрик В., Протасов А., Серий К., Повшенко О. (2019) Використання серійних мобільних пристроїв при проектуванні портативних дефектоскопів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, **30**(69), **6**(2), 12–16. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/03>
3. Petryk, V., Protasov, A., Syeryy, K., Povshenko, O. (2019) Use of serial mobile devices in design of portable flaw detectors. *Vcheni Zapysky TNU, Seriya: Tekhnichni Nauki*, **30**(69), **6** (2), 12–16. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/03> [in Ukrainian].
4. Petryk, V., Protasov, A., Syeryy, K., Ukrainec, S. (2017) Wireless data transmission in ultrasonic nondestructive testing. *Scientific proceedings of STUME, NDT days 2017, Sozopol*, **216**(1), 121–123. DOI: <https://www.lecoeur-electronique.net/us-web.html>
5. Zhang, D, Tian, J, Li, H. (2020) Design and validation of android smartphone based wireless structural vibration monitoring system. *Sensors*, **20**(17), 4799. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20174799>
6. Xie, B., Li, J., Zhao, X. (2019) Research on damage detection of a 3D steel frame model using smartphones. *Sensors*, **19**(3), 745–762. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19030745>
7. Yu, Y., Han, R., Zhao X. et al. (2015) Initial validation of mobile-structural health monitoring method using smartphones. *Intern. J. of Distributed Sensor Networks*, **11**(2), 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/274391>
8. Meiqin, Z., Weiguo, G., Zhenghao, L., Liu-yang, Z. (2007) Design of remote monitoring system for household appli-

- cances and home security based on smart phone. *Measurement and Control Technology*, **26**(8), 72–75.
9. Felice, M., Heng, I., Udell, C., Tsalicoglou, I. (2021) Improving the productivity of ultrasonic inspections with digital and mobile technologies. In: *Proc. conf. «NDE 2019»*, Dec 5–7, Bengaluru, India. <https://www.ndt.net/article/nde-india2019/papers/CP227>.
 10. Mook, G., Simonin, Y. (2018) Eddy current notebook and smartphone. In: *Apps. Proc. of 14th Intern. Conf. of the Slovenian Society for NDT*, Sep 4–6, 2017, Bernardin, Slovenia. <https://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2017/papers/135.pdf>
 11. Mook, G., Simonin, Y. (2018) Smartphone turns into eddy current instrument. In: *Proc. of 12th Europ. Conf. on NDT*, Gothenburg, Sweden, June 11–15. <https://www.ndt.net/article/ecndt2018/papers/ecndt-0079-2018.pdf>
 12. Udell, C., Maggioni, M., Mook, G., Meyendorf, N. (2022). Improving NDE 4.0 by networking, advanced sensors, smartphones, and tablets. In: *Meyendorf, N., Ida, N., Singh, R., Vrana, J. (eds) Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-73206-6_53
 13. Uchanin, V. (2023) Surface eddy current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems. *The Paton Welding J.*, **2**, 46–55. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.02.07>
 14. ДСТУ ISO 17643:2018 *Незрушувальний контроль сварних швов. Вихретоковий контроль сварних швов с анализом в комплексной плоскости*. DSTU ISO 17643:2015 *Non-destructive testing of welds. Eddy current testing of welds by complex-plane analysis*.
 15. Учанин В. (2008) Вихретоковий контроль сварних соединений. *Техн. діагност. и неразруш. контроль*, **4**, 71–80.
 16. Uchanin, V. (2008) Eddy current testing of welded joints. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 71–80 [in Russian]
 17. Uczanin, W. (2013) Badania nieniszczące złączy spawanych z wykorzystaniem metody prądów wirowych. *Przegląd spawalnictwa*, **85**(7), 25–33. [in Poland]

RESEARCH OF EDDY CURRENT PROBES FOR INSPECTION OF ALUMINUM ALLOY STRUCTURE WELDS USING SMARTPHONE-BASED FLAW DETECTOR

G. Mook¹, V. Uchanin², Ju. Lysenko³

¹Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Germany

²G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

³NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine

Features of the design and capabilities of the smartphone-based eddy current flaw detector with the EddySmart software application are presented, which in the future can provide remote control with wireless transmission of inspection results via mobile communication channels for further analysis and storage. The perspectives of application of eddy current probes of double differentiation type for inspection of welded joints of structures made of aluminum alloys are considered. The characteristics and results of studies of low-frequency double differentiation eddy current probes of MDF 0801 and MDF 1001M type with operational diameters of 8 and 10 mm, respectively, developed for detection of the defects in aluminum alloy welded joints are presented. It is shown that to detect defects of different type in aluminum alloy welded joints at a greater depth, preference should be given to the improved eddy current probe of MDF 1001M type with an operational diameter of 10 mm, which provides a higher level of signals and better noise resistance. 16 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: non-destructive testing, eddy current probe, smartphone based flaw detector, welded joints, aluminum alloy

Отримано 05.07.2024

Отримано у переглянутому вигляді 14.08.24

Прийнято 24.09.24

ЧОМУ НЕРЖАВКА СТАЛЬ НЕ ІРЖАВІЄ?

Іржа є постійною проблемою для заліза, яке легко окислюється при взаємодії з повітрям і водою. Навіть такий твердий сплав заліза та вуглецю, як сталь, легко іржавіє. Але нержавка сталь, схоже, не іржавіє. То в чому ж її секрет? Про це пише Live Science. Звичайна сталь іржавіє, коли залізо входить у хімічну реакцію з киснем з утворенням оксиду заліза. Хоча іржа зазвичай не шкідлива для людини, вона може сильно роз'їсти залізо, і сталь втратить свої важливі властивості. Сплав 99 % заліза і 0,2...1 % вуглецю є звичайною сталлю. Але нержавка сталь складається з заліза приблизно на 75 %, а також у цьому сплаві знаходиться приблизно 1 % вуглецю та понад 10 % хрому. До складу нержавкої сталі також входить трохи нікелю, що робить сплав не тільки міцнішим, але й легшим в обробці.

Чому нержавка сталь не іржавіє? За словами матеріалознавця Тіма Коллінза, саме завдяки хрому нержавка сталь стає стійкішою до іржі. Хром реагує з киснем і водою та створює шар оксиду хрому, що лежить на поверхні сплаву. Цей шар не дає кисню досягти заліза та запобігає реакції окислення, тобто сталь не може іржавіти. Захисний шар на нержавкій сталі має товщину всього кілька нанометрів і, таким чином, невидимий, каже Коллінз. Цей шар з оксиду хрому може відновлюватись, якщо він пошкоджений і не вступає в хімічну реакцію з іншими речовинами. Таким чином, нержавка сталь добре підходить для приготування продуктів харчування, а також для застосування в медицині та в ін. галузях.

За словами Коллінза, майже з 2 млрд. тонн сталі, яку використовують щороку в усьому світі, приблизно 4 % – це нержавка сталь. Але цей особливий метал складно та дорого виробляти. Вважається, що виробництво нержавкої сталі коштує приблизно у 3-5 разів дорожче, ніж звичайної сталі. Якщо ж до цього сплаву додають інші метали, наприклад молібден для використання під водою, то виробництво стає ще дорожчим. Тому часто використовують звичайну сталь, яку покривають спеціальними покриттями, щоб вона не так сильно іржавіла. Але нержавка сталь має багато застосувань, незважаючи на складність і коштовність створення.

За словами Канта Шелке з Університету Джонса Хопкінса, якщо йдеться про приготування продуктів харчування, то нержавка сталь має багато переваг. Вона стійка до корозії від харчових кислот і хімікатів, не забруднює жодні продукти, з якими стикається. Нержавка сталь також довговічна та дуже міцна.

Хто винайшов нержавку сталь? Винахідником нержавкої сталі вважається англійський металург Гаррі Бірлі, який створив цей сплав у 1912 р., коли вивчав сталеві сплави не предмет запобігання корозії у стволах зброї. Бірлі створив сплав із заліза, вуглецю, хрому та нікелю. Але цей сплав не підходив для стволів зброї, тому автор викинув його. За кілька тижнів металург зауважив, що блискучий сплав не заіржавів, тому він розробив новий матеріал і представив його світу у 1915 р.

https://www.ukr.net/news/details/science/106673379.html?utm_source=share&utm_medium=mobile



АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ З КОМПЛЕКСУВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Д.В. Сторожик, А.Г. Протасов

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

Пропонується система діагностики дорожнього покриття, в основі роботи якої лежить процес опрацювання зображень дефектів, які були отримані у видимому та інфрачервоному діапазонах спектру. До складу системи входять ходові лабораторії на автомобільному шасі, які збирають дані від камер, а також підсистеми обробки зображень і підтримки прийняття рішень. Підсистема обробки зображень забезпечує перетворення отриманих зображень у видимому та інфрачервоному спектрах до формату, придатному для їх комплексування (злиття). Для здійснення операції комплексування було обрано метод злиття зображень з адаптивним визначенням ваг, який реалізовується нейронною мережею. При побудові даної нейронної мережі було використано принцип мультимодальної обробки, де для зображення кожної модальності використовуються свої згорткові шари для виділення ознак, які оцінюються повнозв'язними шарами для визначення вагових коефіцієнтів. Після завершення процедури комплексування отримане зображення передається на підсистему підтримки прийняття рішень, яка класифікує дефекти та встановлює їх геометричні розміри. Для визначення розмірів використовується згорткова нейронна модель, що реалізує процедуру сегментації зображень. У механізмі логічного висновку на основі моделі подання знань, отриманих з бази знань, робиться висновок щодо рівня дефектності ділянки дороги. Кінцевим елементом підсистеми є програмне забезпечення з інтерфейсом користувача, на який виводиться добута інформація з минулих кроків, паспорт дороги, нормативні акти, інформація про минулі ремонтні роботи та дані про бюджетне забезпечення. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: автоматизовані системи діагностики, нейронні мережі, дорожнє покриття

Вступ. В умовах стрімкого розвитку транспортної інфраструктури та збільшення навантаження на дорожнє покриття автоматизовані системи діагностики набувають особливого значення. Ці системи дозволяють оперативно та точно оцінювати стан дорожнього покриття, значно підвищуючи безпеку дорожнього руху та ефективність управління дорожньою інфраструктурою.

Автоматизація діагностики дорожнього покриття також сприяє значному зниженню витрат. Традиційні методи діагностики часто вимагають значних трудових і фінансових ресурсів. Автоматизовані системи навпаки дозволяють здійснювати швидкий і точний аналіз великих ділянок дороги без потреби у великих командах інспекторів. Це не лише знижує прямі витрати на діагностику, але й підвищує ефективність планування ремонтних робіт, зменшуючи ризик виникнення несподіваних проблем та аварій на дорогах [1].

Враховуючи сучасні екологічні виклики, автоматизовані системи діагностики також відіграють роль у сталому розвитку. Швидке виявлення та усунення дефектів дорожнього покриття сприяє зменшенню вуглецевого сліду, оскільки покращення стану доріг знижує витрати пального та емісії від транспортних засобів.

Інтеграція автоматизованих систем діагностики з іншими смарт-технологіями, такими як інтелектуальні транспортні системи (ITS), відкриває нові

можливості для створення єдиної, ефективної інфраструктури. Це дозволяє не тільки керувати поточним станом доріг, але й прогнозувати майбутні потреби в обслуговуванні, оптимізувати трафік і підвищувати загальну ефективність транспортної системи.

У контексті автоматизованих систем діагностики дорожнього покриття основні виклики полягають у забезпеченні точності даних, ефективності обробки великих обсягів інформації та впливі зовнішніх умов на якість сенсорних вимірювань [2–4]. Точність даних є критичною для правильної оцінки стану доріг, уникнення недооцінки або переоцінки дефектів [5]. Обробка великих баз даних вимагає розробки складних алгоритмів, які можуть ефективно аналізувати та інтерпретувати складні дані. Змінні зовнішні умови, такі як освітлення та погода, можуть істотно впливати на роботу сенсорів, вимагаючи адаптивності системи до різних умов.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі розвитку обчислювальних чіпів та різноманіття архітектури нейромережевих моделей часто головним чинником, що впливає на загальну якість процесу, стає якість та інформативність даних [6]. Це обумовлює використання додаткових каналів взаємодії з об'єктом дослідження. Прикладом такого процесу є мультисенсорна діагностика [7, 8]. Доведено, що використання додаткових джерел інформації, отриманих у декількох

спектральних діапазонах, підвищує точність роботи нейронних мереж при обробці зображень [7, 9]. Використання мультисенсорних методів діагностики також дає можливість застосування сучасних методів машинного навчання для автоматизації обробки та оцифрування даних [10].

Сьогодні стало актуальним інтегроване використання камер в видимому та інфрачервоному спектрах [11, 12]. Таке поєднання має дати змогу ліквідувати негативні фактори кожного методу завдяки позитивним параметрам іншого. Так, для фото у видимому випромінюванні важливо мати хороше освітлення, важливу роль відіграє забруднення дорожнього покриття, тіні та засвічення об'єктиву. Для інфрачервоних камер неякісне освітлення і короткострокові тіні не впливають на якість зображення, а також ми отримуємо таку ранише не доступну характеристику, як температура об'єкта, що може посилити аналітичну базу. Однак коливання температури навколишнього середовища, неоднорідність коефіцієнта випромінювання та довгострокові тіні є негативними факторами при тепловій діагностиці [8, 9].

Додатковою проблемою використання мультисенсорних систем є необхідність обробляти кожен канал інформації окремо. Для того, щоб прибрати цей недолік, можна скористатися комплексуванням (злиттям) зображень – поєднанням двох або більше зображень одного об'єкта з метою покращення якості та інформативності результуючого зображення [13, 14]. Як видно з визначення, позитивним ефектом комплексування є підвищення інформативності фінального зображення навіть в умовах, коли інформативність кожного початкового зображення низька [15]. Методи комплексування зображень мають велике різноманіття, однак лідером є клас методів, заснованих на вейвлет-перетворенні [11, 12].

Метою роботи є дослідження можливостей реалізації методів злиття зображень, отриманих в різних спектральних діапазонах, в автоматизованій системі діагностики стану дорожнього покриття.

Виклад основного матеріалу. В основі запропонованої системи діагностики лежить процес опрацювання зображень дефектів, які були отримані у видимому та інфрачервоному діапазонах спектру.

Оцінка інформативності комплексованих зображень може бути оцінена завдяки ентропії Шенона:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2(x_i),$$

де $p(x_i)$ – імовірність кожного пікселя x_i ; n – кількість можливих значень пікселів.

Взаємна інформація визначається наступним чином:

$$MI(X, Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)},$$

де $p(x)$ – імовірність кожного значення пікселя зображення X ; $p(y)$ – імовірність кожного значення пікселя зображення Y ; $p(x, y)$ – взаємна ймовірність кожного пікселя зображень X і Y .

На рис. 1 показано результат злиття зображення дорожнього дефекту, отриманого у видимому та інфрачервоному діапазонах спектру.

Структуру системи діагностики дорожнього покриття, що пропонується, показано на рис. 2.

До складу системи входять ходові лабораторії на автомобільному шасі, які рухаються по поверхні дорожнього покриття та збирають дані від камер видимого та інфрачервоного спектру. На борту лабораторії також знаходяться GPS трекер і прилади для освітлення дорожньої поверхні. Отримані від камер дані потрапляють на бортовий комп'ютер (ПК) для локального зберігання та передачі інформації до централізованого хмарного сховища. Дані з хмарного сховища відбираються в підсистему обробки зображень для їх попередньої обробки та для реалізації алгоритму комплексування.

Процес попередньої обробки двоспектральних зображень показано на рис. 3.

При обробці теплових зображень послідовно виконуються такі операції: обрізання зображення для видалення неінформативних індикаторів по краях, фільтрація шуму адаптивним медіанним фільтром, збільшення контрасту, замальовування неінформативного індикатора по центру зображення, реєстрація (трансформація) інфрачервоного зображення відносно видимого шляхом використання методу градієнтного спуску та оцінки взаємної інформації. Для обробки зображення ви-

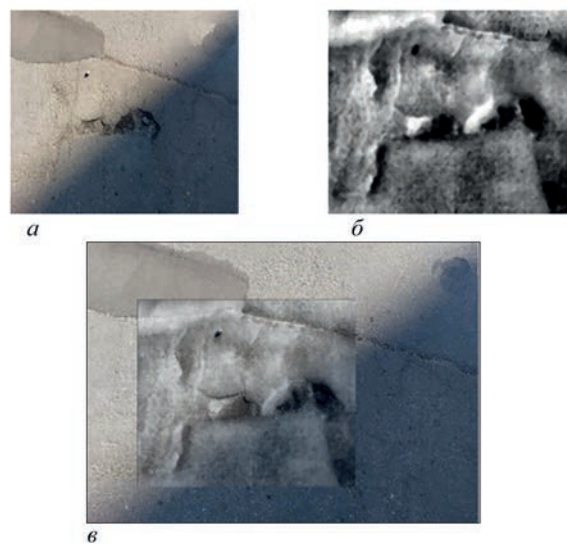


Рис. 1. Зображення дефекту дорожнього покриття: а – у видимому спектрі; б – у інфрачервоному спектрі; в – комплексоване зображення

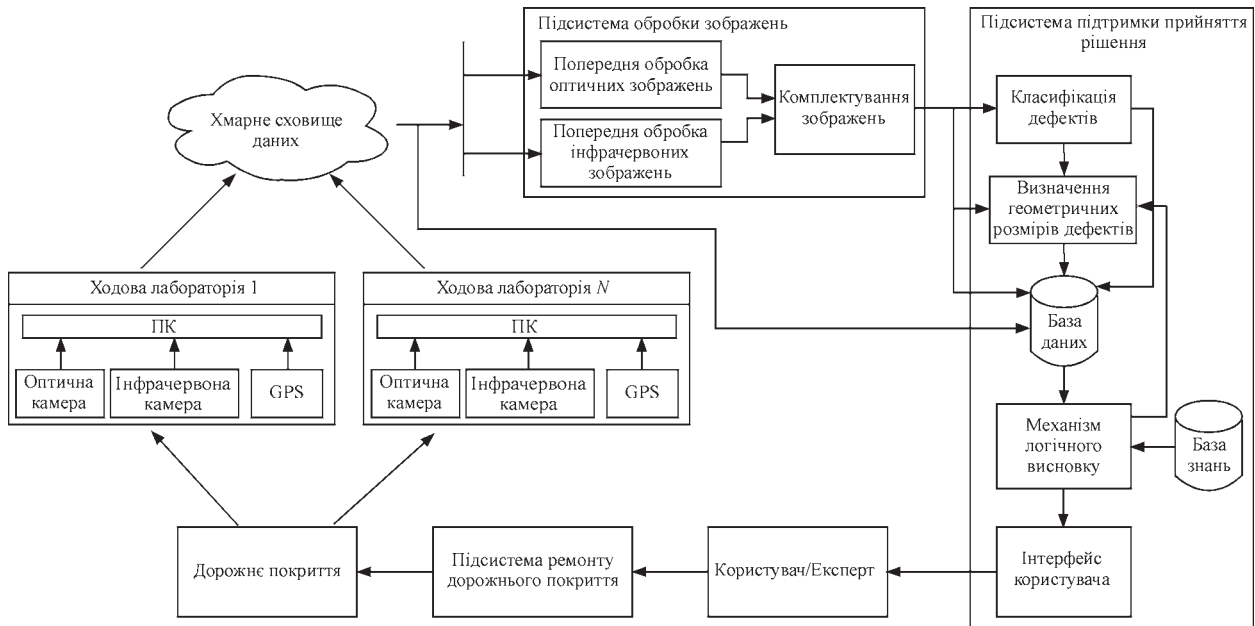


Рис. 2. Структура автоматизованої системи діагностики стану дорожнього покриття

димого спектра використано лише одну операцію – зменшення роздільної здатності.

Останнім перетворенням у підсистемі обробки зображень є комплексування зображень на базі вейвлет-перетворення, яке поєднує інформаційні характеристики зображень обох спектрів. Для здійснення операції комплексування було обрано метод злиття зображень з адаптивним визначенням ваг. Алгоритм реалізації методу полягає у наступному:

1. Реалізується вейвлет-перетворення для кожного зображення:

$$W_A = \text{wavelet}(A); W_B = \text{wavelet}(B),$$

де W_A і W_B – вейвлет-коефіцієнти для зображень A і B відповідно.

2. Для визначення вагових коефіцієнтів на основі вейвлет-коефіцієнтів використовується нейронна мережа NN :

$$\alpha, \beta = NN(W_A, W_B, \theta),$$

де α і β – вагові коефіцієнти для кожного вейвлет-коефіцієнта W_A і W_B відповідно, θ позначає

параметри нейронної мережі, які оптимізуються для максимізації інформативності результуючого зображення F .

Цільова функція для оптимізації інформації має вигляд:

$$\theta = \arg \max_{\theta} MI(F; A, B),$$

де $MI(F; A, B)$ – взаємна інформація між результуючим зображенням F і вхідними зображеннями A і B .

Ця функція вимірює ефективність зберігання інформації у злитому зображенні, отриманому від вхідних зображень.

3. Злиття зображень здійснюється з використанням вагових коефіцієнтів:

$$F(x, y) = \text{inverse_wavelet}(\alpha \cdot W_A + \beta \cdot W_B),$$

де «inverse_wavelet» – зворотнє вейвлет-перетворення, яке перетворює вейвлет-коефіцієнти назад у просторовий домен для формування результуючого зображення F .

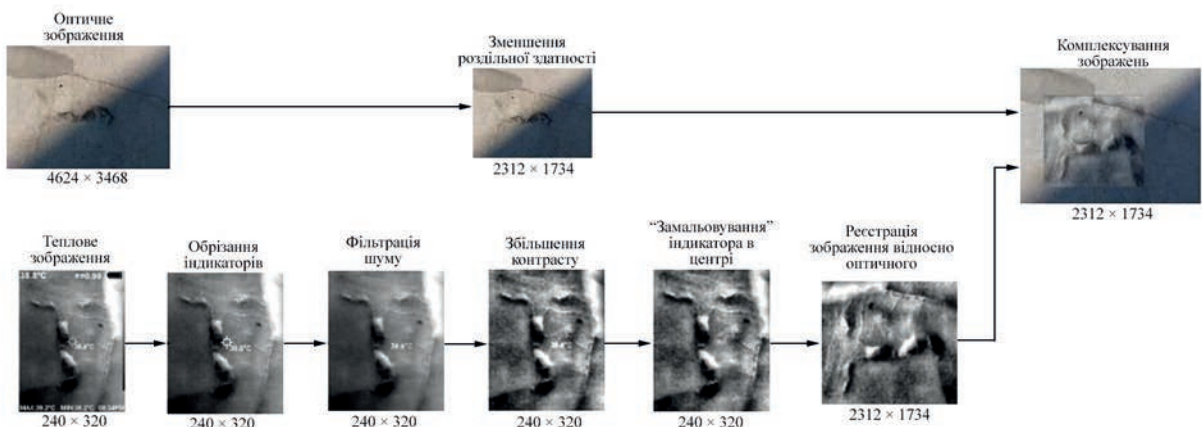


Рис. 3. Процес обробки зображень в підсистемі

Архітектуру нейронної мережі для методу злиття зображень з адаптивним визначенням ваг показано на рис. 4. Ця мережа складається з двох однакових блоків згорткових шарів для зображення кожного спектру.

Кожен блок має два згорткових шари. Перший шар містить 32 фільтри розміром 3×3 , другий — 64 розміром 3×3 , після кожного згорткового шару виконується максупулінг розміром 2×2 . Завершують мережу три повнозв'язні шари розмірами 128, 62 і 2 нейрони. При побудові даної нейронної мережі було використано принцип мультимодальної обробки, де для зображення кожної модальності використовуються свої згорткові шари для виділення ознак, після чого ознаки оцінюються повнозв'язними шарами для визначення вагових коефіцієнтів.

Після завершення процедури комплексування отримане зображення передається разом з координатами GPS на підсистему підтримки прийняття рішень, де зображення попередньо класифікують відповідно до типу дефекту (класифікацію виконує згорткова нейронна мережа), після чого

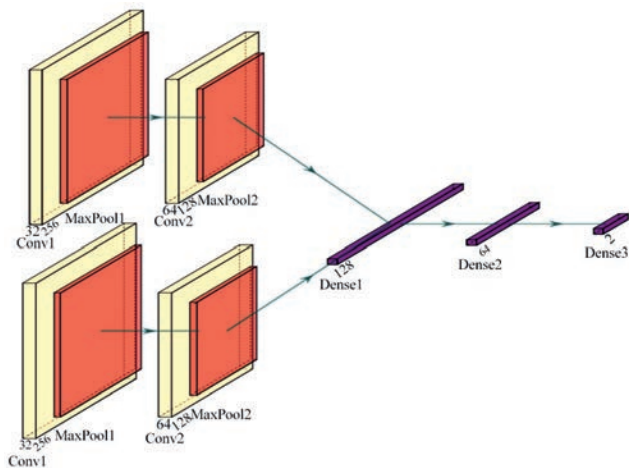


Рис. 4. Архітектура нейронної мережі для реалізації методу злиття зображень з адаптивним визначенням ваг

інформацію відправляють, залежно від класу, на відповідну нейронну модель для встановлення геометричних розмірів дефекту дороги. Для цього використовується згорткова нейронна модель, що реалізує процедуру сегментації зображень (рис. 5).

Цей нейромережевий класифікатор, побудований для обробки та класифікації зображень, використовує глибокі згорткові нейронні мережі (CNN). Його структура складається з кількох етапів обробки даних: попередньої обробки, кількох конволюційних блоків для витягування ознак, залишкових блоків для збереження градієнта під час навчання та повнозв'язних шарів для кінцевої класифікації. Вхідний шар зменшує розмір зображень до 256×256 пікселів для оптимізації обчислювальних ресурсів.

Основна робота нейромережі виконується в конволюційних блоках, де перші два блоки використовують фільтри 3×3 для витягування основних і детальних ознак, застосовуючи активацію ReLU і нормалізацію партій (Batch Normalization) для стабільності. Залишкові блоки з більшим числом фільтрів застосовують принцип залишкового зв'язку для покращення здатності до навчання. У результаті плоский шар перетворює виходи конволюційних шарів у вектор, який передається на повнозв'язні шари, що виконують кінцеву класифікацію. Завершується модель вихідним шаром з активацією Softmax для багатокласової класифікації, генеруючи ймовірності для кожного з шести класів.

Дані GPS, комплексоване зображення, клас дефекту, площа дефекту записуються в базу даних для зберігання. У механізмі логічного висновку на основі моделі подання знань, отриманих з бази знань, робиться висновок щодо рівня дефектності ділянки дороги. Фрагмент продукційної моделі подання знань для підсистеми підтримки прийняття рішень показано в таблиці.

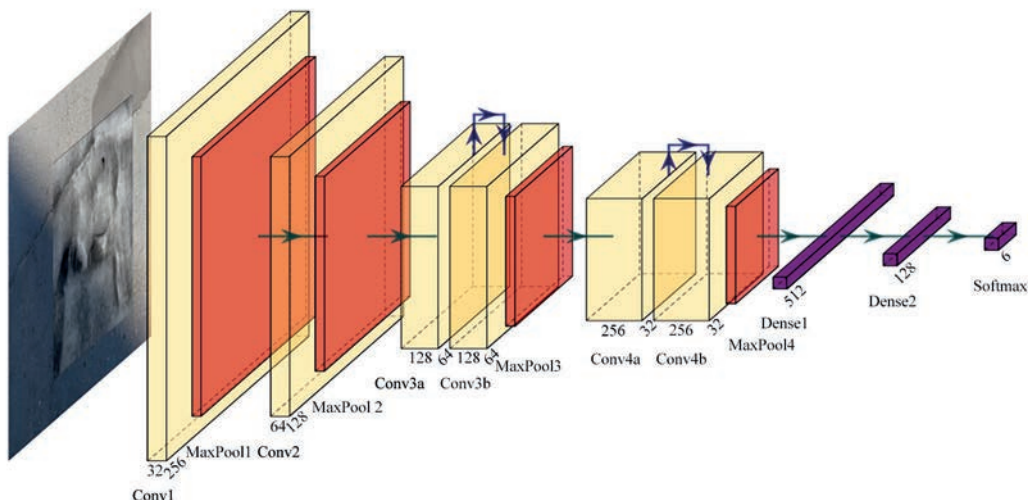


Рис. 5. Архітектура згорткової нейронної мережі для класифікації дефектів дорожнього покриття

Фрагмент продукційної моделі подання знань

Умова	Висновок
Тип дефекту = тріщина загальна поперечна	Характер дефекту = лінійний і коефіцієнт вагомості $K_v = 0,08$ і коефіцієнт приведення до площі $K_s = 0,15$
Тип дефекту = тріщина повздовжня	Характер дефекту = лінійний і коефіцієнт вагомості $K_v = 0,1$ і коефіцієнт приведення до площі $K_s = 0,1$
Дефектність дорожнього покриття > 50 %	Рівень дефектності = критичний

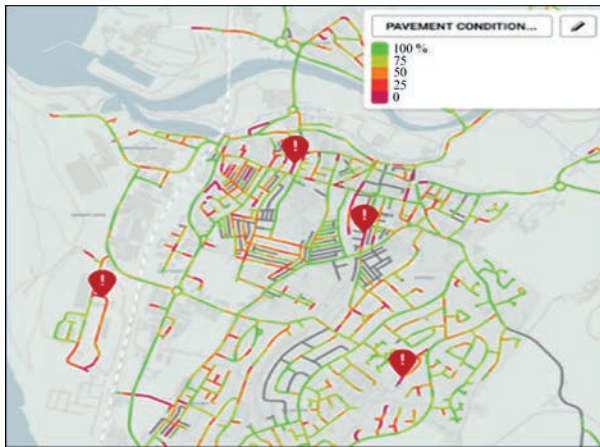


Рис. 6. Інтерфейс користувача

Кінцевим елементом підсистеми є програмне забезпечення з інтерфейсом для користувача (рис. 6). Інтерфейс забезпечує зручний аналіз і прийняття рішення щодо проведення ремонтних робіт. На нього виводиться добута інформація з минулих кроків, паспорт дороги, нормативні акти, інформація про минулі ремонтні роботи та дані про бюджетне забезпечення. Дані щодо бюджетного планування дозволять операторам враховувати фінансові обмеження при прийнятті рішень про ремонт.

Користувач на основі наявних даних приймає рішення щодо ремонтних робіт. Після чого, виходячи з графіку ремонтних робіт, відправляється бригада усунення дефектності (підсистема ремонту дорожнього покриття) і цикл повторюється.

Експериментальна перевірка роботи системи. Для перевірки ефективності роботи системи експериментально було зібрано 6000 реальних зображень дорожніх дефектів у двох спектральних діапазонах. При експерименті використовувалась тепловізійна камера Wintact WT3320, що

мала роздільну здатність детектора 320×240 і тепловою чутливістю 0,07 К, які дозволяли отримувати зображення при температурі повітря, вищій на 15 °С. На рис. 7 продемонстровані деякі з отриманих зображень.

Розроблена система отримала високі оцінки продуктивності обробки великих об’ємів даних, високу адаптивність до різних методів отримання даних за рахунок використання гнучких методів обробки та використанню нейронних мереж. Комбінація даних двох спектрів дозволила отримати високу точність класифікації дефектів дорожнього покриття (більше 95 %) в умовах наявності інформаційних завад. Такі результати дозволяють говорити про високу ефективність розробленої системи діагностики дорожнього покриття.

Висновки

Запропонована автоматизована система діагностики стану дорожнього покриття, яка базується на злитті зображень у двох спектральних діапазонах, дозволила отримати високу точність класифікації дефектів дорожнього покриття (більше 95 %) в умовах наявності інформаційних завад. Експериментальна перевірка системи була реалізована з використанням реальних даних у кількості 6000 зображень, отриманих в оптичному та інфрачервоному діапазонах і яка підтвердила високу продуктивність обробки великих об’ємів даних, а також високу адаптивність до різних методів отримання даних.

Для обробки та класифікації зображень було побудовано нейромережевий класифікатор, який використовує глибокі згорткові нейронні мережі. Висновок щодо рівня дефектності ділянки дороги генерується механізмом логічного висновку на ос-

	Вибійни	Сітка тріщин	Тріщини загальні поперечні	Тріщини повздовжні	Косі тріщини	Бездефектна поверхня
Оптичне зображення						
Теплове зображення						

Рис. 7. Зображення дорожніх дефектів, отриманих експериментально

нові моделі подання знань, отриманих із запропонованої бази знань.

За рахунок використання гнучких методів обробки інформації та застосування нейронних мереж було підвищено ефективність автоматизованого процесу діагностики стану дорожнього покриття.

Список літератури/References

1. Протасов А.Г., Сторожик Д.В. (2023) Технології автоматизації діагностики дорожнього покриття. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Том 34(73), 2, Ч.1, 219–227. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/35>
2. Protasov, A.G., Storozhyk, D.V. (2023) Technologies for automation of road surface diagnostics. *Vcheni Zapysky TNU*, Vol. 34(73), 2, Pt. 1, 219–227. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/35> [in Ukrainian].
3. Su, Y., Kang, S., Chang, J., Hsieh, S. (2010) Using dual lights for robotic pavement inspection. In: *Proceedings of SICE Annual Conference*, Vol. 1.
4. Bystrov, A., Hoart, E., Tran Thuy-Yung et al. (2018) Sensors for automotive remote road surface classification. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICVES.2018.8519499>
5. Elseicy, A., Alonso-Díaz, A., Solla, M. et al. (2022) Combined use of GPR and other NDTs for road pavement assessment: *An Overview Remote Sens.*, 14, 4336. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14174336>
6. Fangyu, L., Liu, J., Wang, L. (2022) Asphalt pavement crack detection based on convolutional neural network and infrared thermography. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
7. Sun, Z., Li, L., Liu, L. et al. (2022) On the importance of building high-quality training datasets for neural code search. *Proceedings of the 44th International Conference on Software Engineering*.
8. Rad, R. (2024) Vision transformer for multispectral satellite imagery: Advancing landcover classification. *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*.
9. Sham, J.F.C., Memon, S.A., Lo, T.Y. (2013) Application of continuous surface temperature monitoring technique for investigation of nocturnal sensible heat release characteristics by building fabrics in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 58, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.025>
10. Solla, M., Lagüela, S., Gonzales-Jorge, H. et al. (2014) Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. *NDT&E Int.*, 62, 55–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.11.006>
11. Сторожик Д.В., Протасов А.Г., Муравйов О.В. та ін. (2022) Автоматизація процесу теплового неруйнівного контролю шляхом застосування методу комплексування термограм. *Техн. діагност. та неруйнівн. контроль*, 2, 20–23. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.03>
12. Storozhik, D.V., Protasov, A.G., Muraviov, O.V., et al. (2022) Automation of thermal non-destructive testing process by applying the method of complexing thermographs. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 20–23. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.03> [in Ukrainian].
13. Zhang, Dengsheng (2019) Wavelet transform. *Fundamentals of image data mining: Analysis, Features, Classification and Retrieval*, 35–44.
14. Сторожик Д.В., Протасов А.Г. (2022) Технології опрацювання зображень на основі комплексування даних (Огляд). *Техн. діагност. та неруйнівн. контроль*, 4, 17–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.03>
15. Storozhyk, D.V., Protasov, A.G. (2022) Image processing technologies based on complexing data (Review). *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 4, 17–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.03> [in Ukrainian].
16. Eisler, K., Homma, C., Goldammer, M. et al. (2013) Fusion of visual and infrared thermography images for advanced assessment in non-destructive testing. *Review Science Instruments*, 84, 064902. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4808280>
17. Changqi Sun, Cong Zhang, Naixue Xiong (2020) Infrared and Visible Image Fusion Techniques Based on Deep Learning: A Review. *Electronics*, 9, 21–62. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9122162>
18. Линник М.О., Наконечний А.Й. (2023) Методи та алгоритми комплексування зображень і теплових сигналів. *Computer systems and networks*, 5(1), 60–71. DOI: <https://doi.org/10.23939/csn2023.01.060>
19. Linnyk, M.O., Nakonechnyi, A.Y. (2023) Methods and algorithms for complexing images and thermal signals. *Computer systems and networks*, 5(1), 60–71. DOI: <https://doi.org/10.23939/csn2023.01.060> [in Ukrainian].

AUTOMATED ROAD SURFACE DIAGNOSTIC SYSTEM WITH IMAGE COMPLEXING

D.V. Storozhyk, A.G. Protasov

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

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

The road surface diagnostic system is proposed. The basis of the system operation is processing images of defects that were obtained in the visible and infrared ranges of the spectrum. The system includes running laboratories on the car chassis that collect data from cameras, as well as image processing and decision support subsystems. The image processing subsystem provides conversion of the received images in the visible and infrared spectra to a format suitable for their complexation (fusion). The method of image fusion with adaptive determination of weights, which is implemented by a neural network, was chosen for the implementation of the complexing operation. When building this neural network, the principle of multimodal processing was applied, where each modality is represented using its own convolutional layers to highlight features that are evaluated by fully connected layers to determine weighting coefficients. After the completion of the complexing procedure, the obtained image is transferred to the decision support subsystem, which classifies the defects and establishes their geometric dimensions. To determine the dimensions, a convolutional neural model is used, which implements the image segmentation procedure. In the mechanism of logical conclusion, based on the model of presentation of knowledge obtained from the knowledge base, a conclusion is made regarding the level of defectiveness of the road section. The final element of the subsystem is software with a user interface that displays information obtained from past steps, a road passport, regulatory acts, information on past repair work, and data on budget support. 15 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: automated diagnostic systems, neural networks, road surface

Отримано 11.07.2024

Отримано у переглянутому вигляді 15.08.2024

Прийнято 24.09.2024

ВИКОРИСТАННЯ ВИПРОБУВАНЬ ЗВАРНИХ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ПРОГНОЗНИХ ЯКОСТЕЙ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

С.А. Недоска, А.Я. Недоска, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко, І.Г. Волошкевич

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

E-mail: st_private@hotmail.com, inpat59@ukr.net

Результати випробувань зразків показують високу чутливість методу акустичної емісії до якості зварного з'єднання. Цей факт може бути використаний для прогнозування руйнівного навантаження та границі міцності, яке автоматично виконується системами акустико-емісійної діагностики ЕМА. Показано, як за допомогою випробувань зварних зразків із заздалегідь невідомими показниками міцності можна перевірити прогноз руйнівного навантаження та границі міцності, який виконується за даними акустичної емісії. Отримані результати свідчать, що такий прогноз є успішним і не потребує додаткового коригування попередньо визначених налаштувань системи. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: зварний шов, акустична емісія, руйнування матеріалів, навантаження, границя міцності, прогноз

Вступ. Зварні з'єднання часто містять дефекти, які виникають як внаслідок порушення технології зварювання, так і завдяки дії залишкових напружень [1, 2]. Тому область зварного з'єднання потребує першочергового контролю при проведенні технічного діагностування. При випробуваннях зразків, які містять зварні з'єднання, спостерігається, як правило, значно більша кількість подій акустичної емісії (АЕ), ніж при випробуваннях зразків без зварних з'єднань [3]. Автори показали, що фактично картина виникнення та розподілу в часі та просторі подій АЕ пов'язана з розвитком пошкодженості матеріалу у відповідний період часу та на відповідних ділянках матеріалу [4]. Наразі визначення поточного стану матеріалу конструкцій (Structural health monitoring) знаходить у світі все більший розвиток. Але, незважаючи на активацію подібних досліджень [5–12], їх основним недоліком є відсутність чітко нормованої оцінки пошкодженості, прогнозу руйнування, точності та вірогідності отриманих результатів.

Мета роботи – перевірка якості алгоритмів прогнозування руйнування, закладених у програмне забезпечення систем типу ЕМА [1, 3, 4], на зварних зразках із різними типами з'єднань в умовах, коли реальне руйнівне навантаження і, відповідно, границі міцності зразка заздалегідь невідомі. Незважаючи на те, що розроблено спеціальні методики перевірки прогнозуючих АЕ систем, завдання, поставлене у роботі, – показати, що впевнитись у якості прогнозних характеристик систем типу ЕМА можна, тільки провівши серію простих випробувань зразків.

Об'єкт досліджень. Для вирішення поставлених завдань було проведено ряд випробувань

зразків з матеріалу труб зі сталі 17ГС (границя міцності 450...500 МПа) з поперечним розрізом, зварених по місцю розрізу, із заздалегідь невідомими характеристиками міцності металу шва. Зварні з'єднання виконано ручним дуговим зварюванням електродами УОНІ-13 діаметром 3 мм. Використовували стандартні зразки для АЕ випробувань (рис. 1, а) зі зменшеною до 0,8 см² площею перерізу в середній частині. Для руйнування зразків використовували розривну машину Р-20 з гідравлічним приводом (рис. 1, б).

Методика випробувань. При випробуваннях використовували АЕ систему ЕМА-3. Антену з чотирьох перетворювачів акустичної емісії (датчиків) розташовували на зразку за лінійною схемою (рис. 1). Обробку даних виконували з використанням сучасної програми ЕМА-3.92. Відстань між центрами датчиків становила 110 мм, контрольована зона – 140 мм (по 70 мм ліворуч і праворуч від центру зразка). Дані піддавали кластерному аналізу в процесі випробувань і при подальшій обробці. Події АЕ, що пройшли відбракування за координатною ознакою, об'єднували у кластери. Для коректного виконання прогнозу радіус кластера встановлювали рівним розміру контрольованої зони (140 мм), що дозволяло аналізувати дані АЕ зі встановленої зони як такі, що описують процес руйнування в цілому, а також відстежувати зсув центра локалізації АЕ по довжині зразка в межах цієї зони. Сигнали АЕ реєстрували в діапазоні 100...1000 кГц.

Результати дослідження. Найтипівіші результати випробувань представлені у вигляді діаграм випробувань (рис. 2–6) і показників індикаторів програми ЕМА-3.92 з результатами прогнозу руйнівного навантаження та границі міцності.

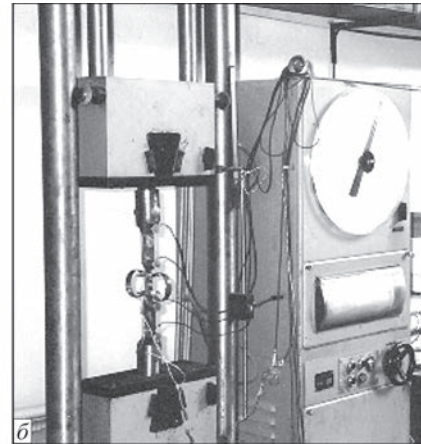
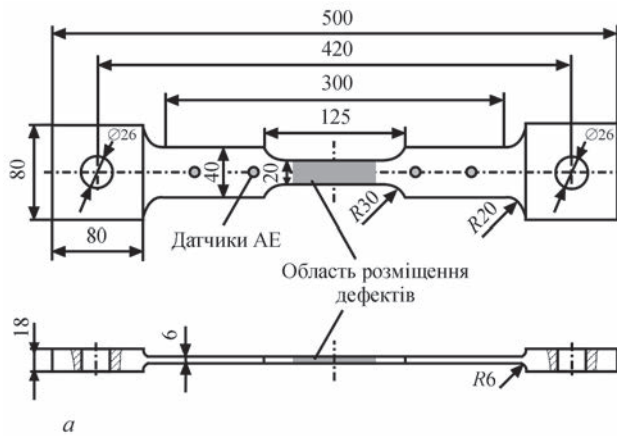


Рис. 1. Зразок і розривна машина для проведення випробувань із застосуванням АЕ технології: а – креслення; б – розташування зразка у захватах розривної машини Р-20

На діаграмах лініями синього кольору відображено стовпчастий графік амплітуд подій АЕ (A , дБ); червоного – лінійний графік навантаження на зразок (P , кг); зеленого – точковий графік параметру «Райс тайм» (Rt , мкс), який характеризує час наростання сигналу до максимуму; фіолетового – лінійний графік сумарного числа подій АЕ (N , безрозмірний). По осі абсцис відкладено час (t , с), що минув від початку випробування.

На рисунках наведено типові результати випробувань на прикладі чотирьох зразків (№ 1–4) зі зварним швом та одного (№ 5) зі зварною точкою. Результати кінцевого прогнозування руйнування для п'яти зразків, зробленого на момент надання АЕ системою попередження № 3 «Небезпека», наведено в табл. 1, а дані першого під час випробувань коректного прогнозу для всіх випробуваних зразків – у табл. 2.

Проведені раніше випробування зразків із різними типами зварних з'єднань, якість виконання зварювання яких чітко контролювалася [3], показали, що руйнівне навантаження коливалося у межах від

26 кН (2600 кг) до 95 кН (7000...9500 кг). У виконаній серії випробувань спостерігали значно менші руйнівні навантаження, що відповідають меншій границі міцності матеріалу зварного з'єднання, а також такі, що відповідають міцності даної марки матеріалу. Виняток складають зразок зі зварним швом № 2 і зразок зі зварною точкою № 3, для яких границя міцності відповідає значенням для сталі 17ГС.

Зазначимо, що сумарна кількість подій N для різних зразків відрізняється у кілька разів, максимальні амплітуди A , дБ – у 1,5 рази, час наростання сигналу АЕ до максимуму амплітуди Rt , мкс – більше ніж у 5 разів.

У табл. 2 наведено типові результати прогнозу руйнівного навантаження для зразків із з'єднаннями, що мають різні значення границі міцності. Номерами 1–4 позначені зразки зі зварним швом, номерами 5–8 – зразки зі зварною точкою. Відзначимо, що дані у табл. 2 не завжди відповідають наведеним у табл. 1 даним з індикаторів прогнозу програми ЕМА-3.92. Це пов'язано з тим, що для

Таблиця 1. Результати кінцевого прогнозування руйнування для зразків № 1–5

Номер зразка	Реальне руйнівне навантаження, кг	Прогнозне руйнівне навантаження, кг	Прогнозна границя міцності, МПа
1	1738	1573...1815	196,7...227,0
2	4620	3995...4935	499,7...617,3
3	1272	1222...1410	152,9...176,4
4	2025	1751...2163	219,0...270,6
5	1852	1750,3...2210	218,9...276,5

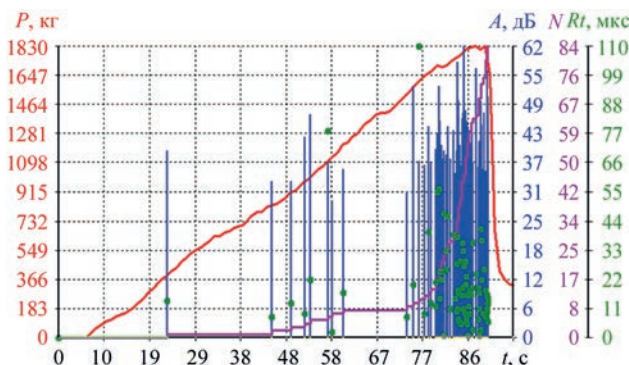


Рис. 2. Діаграми випробування зразка № 1 зі зварним швом

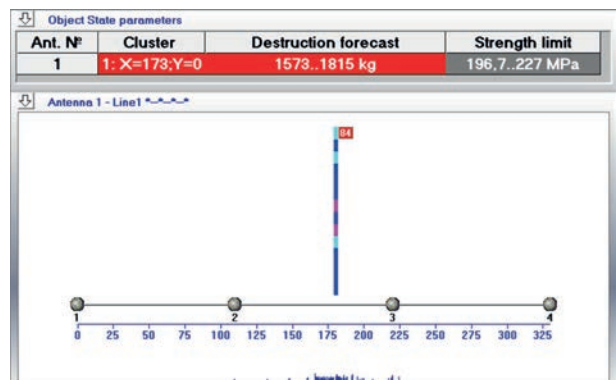


Рис. 3. Діаграми випробування зразка № 2 зі зварним швом

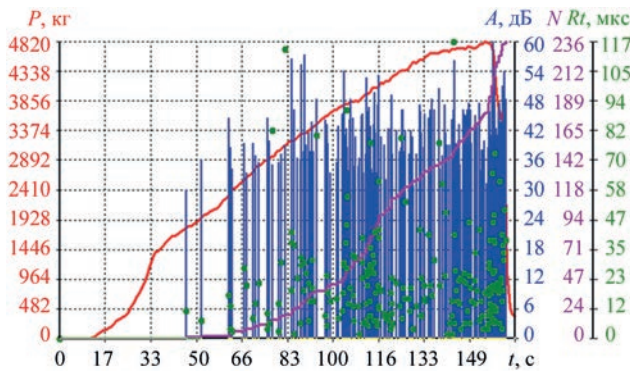


Рис. 4. Діаграми випробування зразка № 3 зі зварним швом

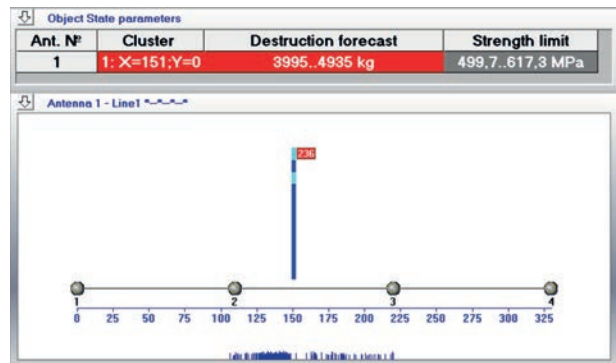


Рис. 5. Діаграми випробування зразка № 4 зі зварним швом

Таблиця 2. Детальні результати прогнозу руйнівного навантаження зварних зразків

Номер зразка	Час прогнозу руйнування, с	Час початку руйнування, с	Кількість подій АЕ, за якими виконано прогноз	Поточне навантаження, при якому надано прогноз, кг	Рівень попередження про небезпеку	Прогноз руйнування – нижня границя, кг	Прогноз руйнування – верхня границя, кг	Дійсне руйнівне навантаження, кг
1	57	91	7	1110	2	1587	2786	1738
2	68	155	8	2600	2	3718	6526	4620
3	59	64	8	900	2	1267	2259	1272
4	99	120	8	1260	2	1801	3162	2025
5	119	152	7	728	2	1041	1857	1852
6	119	183	7	2139	2	3058	5368	4091
7	143	155	147	4700	3	3995	4935	4820
8	112	148	19	1816	2	1841	2867	2751

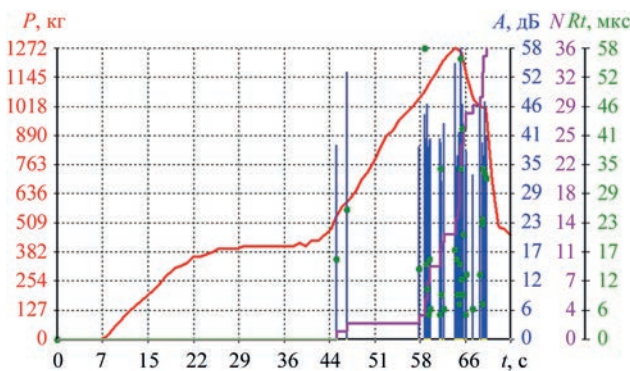


Рис. 6. Діаграми випробування зразка № 5 зі зварною точкою

більшості зразків коректний прогноз зроблено ще у момент генерації попередження № 2 «Підвищити увагу» і його результати не співпадають повністю з результатами кінцевого прогнозу, зробленого при попередженні № 3 «Небезпека». У відповідній колонці таблиці вказано, при якому саме рівні попередження зроблено прогноз.

З табл. 2 видно, що для випробуваних зразків реальне руйнівне навантаження попадає у діапазон прогнозування при генерації попередження № 3. Нижня та верхня границі прогнозу загалом вкладаються в допустиме для систем типу ЕМА відхилення $\pm 15\%$. Іноді, коли прогноз виконано при генерації попередження № 2, діапазон прогнозних значень виходить за рамки вказаних відсотків, але нижнє значення руйнівного навантаження є меншим, ніж реальне руйнівне, при цьому середнє значення руйнівного навантаження у даний діапазон вкладається. Дана похибка прогнозування не є кри-

тичною, оскільки попередження № 2 про небезпеку генерується програмою ЕМА-3.92 заздалегідь, задовго до досягнення границі міцності матеріалу, а при генерації попередження № 3 відповідний діапазон прогнозного руйнівного навантаження звужується до заданих границь відхилення $\pm 15\%$.

Зазначимо також, що найчастіше вірний прогноз руйнування можна отримати в момент, коли залишається достатньо часу до руйнування зразка – від 57 % загальної тривалості випробування у найкращому випадку та до 8 % – у найгіршому.

Таким чином, навіть без внесення коректив у налаштування прогнозу системи типу ЕМА можуть забезпечити своєчасне попередження про небезпеку руйнування зварних з'єднань, генерувати прогноз руйнівного навантаження та, відповідно, границі міцності із задовільною для практики точністю.

Висновки

1. Показано на зразках з невідомими характеристиками міцності, що прогноз, який виконується АЕ системами типу ЕМА, дає коректні результати.

2. Випробувано серію зразків зі зварними швами та зварними точками. Їхнє руйнівне навантаження і, відповідно, границі міцності, були заздалегідь невідомі та коливались у досить широких межах у залежності від якості зварного з'єднання.

3. Прогноз руйнівного навантаження для випробуваних зразків дав задовільні показники. Розкид прогнозних значень для руйнівного навантаження, отриманий на момент попередження № 2, є, як правило, більшим, ніж під час попередження № 3, і не завжди вкладається у допустимі границі

відхилення $\pm 15\%$, але відповідає реальним показникам руйнування матеріалу. Розкид прогнозних значень під час попередження № 3 вкладається в допустимі межі відхилення.

4. Отримані результати свідчать, що перевірка прогнозних властивостей АЕ систем може бути виконана за спрощеною схемою, аналогічною тій, що використана у даній роботі.

Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: Учебное пособие. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
2. Щербинский В.Г., Феоктистов В.А., Полевик В.А. и др. (1987) *Методы дефектоскопии сварных соединений*. Москва, Машиностроение.
3. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А. та ін. (2021) Метод акустичної емісії при оцінюванні стану зварних швів та їх службових властивостей. Частина 1. Вплив типу зварного з'єднання на акустичну емісію. *Автоматичне зварювання*, **2**, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.09>
4. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2021) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: Учебное пособие. Глава 7. Более сложные вопросы теории. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
5. Скальський В.Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Техн. діагност. і неразруш. контроль*, **4**, 29–36.
6. Huang, W., Yang, S., Lin, D., Kovacevic, R. (2009) Real-time monitoring of the weld penetration state in laser welding of high-strength steels by airborne acoustic signal. ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Vol. 4: Cycle Innovations; Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine. June 8–12, 2009, Orlando, Florida, USA. 799–805. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2009-59274>
7. ASTM E749/E749M-17 (2017) *Standard practice for acoustic emission monitoring during continuous welding*. ASTM International, West Conshohocken.
8. Putti Srinivasa Rao, Ch. Ratnam (2012) Health monitoring of welded structures using statistical process control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **27**, 683–695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.09.023>
9. (2017) *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довід. посіб. Т.8 : Методи оцінювання залишкової міцності та довговічності елементів конструкцій за даними неруйнівного контролю*. (Назарчук З.Т. ред.). Львів, Простір-М.
10. Droubi, Mohamad G., Faisal, Nadimul H., Orr, Fraser, Steel, John A., El-Shaib, Mohamed (2017) Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *J. of Constructional Steel Research*, **134**, 28–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.03.012>
11. Aboali, Abdalla, El-Shaib, Mohamed, Sharara, Ashraf, Shehadeh, Mohamed (2014) Screening for welding defects using acoustic emission technique. *Advanced Materials Research*, **1025–1026**, 7–12. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026.7>

12. Савченко С.В., Тимчик Г.С. (2017) Метод контроля сварных соединений баллистических сталей посредством акустической эмиссии. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси*. Т. 20, 7–10.

References

1. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*: Tutorial. 5th Ed., Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
2. Shcherbinsky, V.G., Feoktistov, V.A., Polevyk, V.A. et al. (1987) *Methods of flaw detection of welded joints*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A. et al. (2021) Acoustic emission method at evaluation of the state of welds and their service properties. Pt 1. Effect of welded joint type on acoustic emission. *The Patent Welding J.*, **2**, 46–52. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwg2021.02.09>
4. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2021) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*: Tutorial. Chapt. 7. More complex questions of the theory. 5th Ed., Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
5. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solids, based in acoustic emission signals. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 29–36 [in Ukrainian].
6. Huang, W., Yang, S., Lin, D., Kovacevic, R. (2009) *Real-time monitoring of the weld penetration state in laser welding of high-strength steels by airborne acoustic signal*. ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Vol. 4: Cycle Innovations; Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine. June 8–12, 2009, Orlando, Florida, USA. 799–805. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2009-59274>
7. ASTM E749/E749M-17 (2017) *Standard practice for acoustic emission monitoring during continuous welding*. ASTM International, West Conshohocken.
8. Putti Srinivasa Rao, Ch. Ratnam (2012) Health monitoring of welded structures using statistical process control. *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. **27**, 683–695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.09.023>
9. (2017) *Technical diagnostics of materials and structures: Conclusion. Vol. 8: Methods for assessing the excess value and durability of structural elements based on non-destructive testing data*. (Ed. by Z.T. Nazarchuk). Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
10. Droubi, Mohamad G., Faisal, Nadimul H., Orr, Fraser, Steel, John A., El-Shaib, Mohamed, Mohamed (2017) Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *J. of Constructional Steel Research*, **134**, 28–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.03.012>
11. Aboali, Abdalla, El-Shaib, Mohamed, Sharara, Ashraf, Shehadeh, Mohamed (2014) Screening for welding defects using acoustic emission technique. *Advanced Materials Research*, Vol. **1025–1026**, 7–12. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026.7>
12. Savchenko, S.V., Tymchyk, G.S. (2017) Method for inspection of ballistic steel welded joints using acoustic emission. *Bulletin of the NTU KhPI. Series: Mechanical and Technological Systems and Complexes*, Vol. **20**, 7–10 [in Russian]

USE OF WELDED SPECIMENS TESTING FOR ASSESSMENT OF ACOUSTIC EMISSION EQUIPMENT PREDICTIVE PROPERTIES

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, O.I. Boychuk, M.A. Ovsienko, I.G. Voloshkevich

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

E-mail: st_private@hotmail.com, inpat59@ukr.net

The results of specimen tests show a high sensitivity of the acoustic emission method to the quality of the welded joint. This fact can be used for prediction of the destructive loading and strength limit, which is automatically performed by EMA acoustic-emission diagnostic systems. It is shown how testing of the welded specimens with previously unknown strength parameters can be applied to check the prediction of the destructive loading and the strength limit, which is performed using acoustic emission data. The obtained results indicate that such a prediction is successful and does not require additional adjustment of the predefined system settings. 12 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: weld, acoustic emission (AE), destruction of materials, loading, strength limit, prediction

Отримано 04.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 08.05.2024

Прийнято 11.07.2024

ОСОБЛИВОСТІ РЕМОНТУ ТА ДІАГНОСТИКИ ГАЛТЕЛЬНИХ ПЕРЕХОДІВ АГРЕГАТА ПЛ15/3251-ГК-600 КИЇВСЬКОЇ ГЕС

В.Ю. Глуховський, В.А. Литвиненко, Ю.М. Каховський, М.Ю. Каховський

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

Розглянуто питання вибору методів ремонту, контролю та діагностики технічного стану галтельних переходів агрегата ПЛ15/3251-ГК-600 Київської ГЕС методами неруйнівного контролю. Описано особливості інструментального обстеження пошкоджень і ремонту колон статора турбіни гідроагрегата ст. № 6 Київської ГЕС для філії «Каскад Київських ГЕС і ГАЕС» ПрАТ «Укргідроенерго». Представлено алгоритм обстеження колон статора турбіни гідроагрегата ст. № 6 типу ПЛ15/3251-ГК-600. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: Київська ГЕС, галтельні переходи, неруйнівний контроль, зварювання, наплавлення, ремонт, візуальний, капілярний, ультразвуковий, магнітопорошковий, гідроагрегат, гідротурбіна

Вступ. Технічний прогрес обумовлює постійне зростання вимог до машин і конструкцій та, в першу чергу, до підвищення їх надійності та довговічності. Промисловість більшості індустріально розвинених країн зазнає значних втрат внаслідок недостатньої надійності та довговічності машин і конструкцій.

Зварювання широко застосовується в багатьох технологічних процесах ремонту різноманітних деталей машин і конструкцій. Обсяги ремонтних робіт із застосуванням зварювання в промисловості, будівництві, сільському господарстві та інших галузях економіки, продуктивність і ефективність ремонтного зварювання постійно зростають і ця тенденція чітко спостерігається в усіх розвинених країнах.

Складний економічний стан України, пов'язане з цим зниження обсягів випуску та впровадження нової техніки надає проблемі ремонту та відновлення машин і конструкцій одне з пріоритетних значень. Ремонтне виробництво має багато загальних рис з машинобудуванням і водночас суттєво відрізняється. У ремонті часто застосовуються специфічні технологічні процеси [1].

Технологія ремонту являє собою сукупність процесів – мийки, очищення, зварювання, наплавлення, нанесення покриттів, багаточисельних методів механічної, термічної, хіміко-термічної та ін. видів обробки, а також контролю якості.

Методика обстеження та ремонту агрегатів Київської ГЕС. Доцільність ремонту зварюванням визначається збитками від зупинки та простою виробництва або перервами в роботі виробничого обладнання, що вийшло з ладу, які, в свою чергу, значно перевищують витрати на зварювальні матеріали та ремонт.

До такого роду обладнання відносяться вузли й агрегати гідроелектростанцій (ГЕС), наприклад, горизонтальні капсульні агрегати з поворотно-лопатевими гідротурбінами з горизонтальними синхронними генераторами (рис. 1).

Так, на Київській ГЕС при плановому обстеженні колон статора турбіни гідроагрегата ст. № 6 типу ПЛ15/3251-ГК-600 (рис. 1) були виявлені чисельні пошкодження, які мали бути усунені методом ремонтного зварювання.

Перед початком ремонтних робіт були сформовані основні етапи інструментального обстеження пошкоджень колон статора турбіни гідроагрегата ст. № 6 типу ПЛ15/3251-ГК-600 (рис. 2).

З рис. 2, а видно, що капсула ГА-6 складається з восьми опорних колон, кожна з яких утворює по чотири галтельні переходи, які у випадку колон №№ 3, 6, 7 ремонтувались і контролювались (на рис. 2, а позначено цифрами від I до IV). На рис. 2, б наведено окрему колону з напрямками контр-



Рис. 1. Зовнішній вигляд капсульного агрегата ГА-6

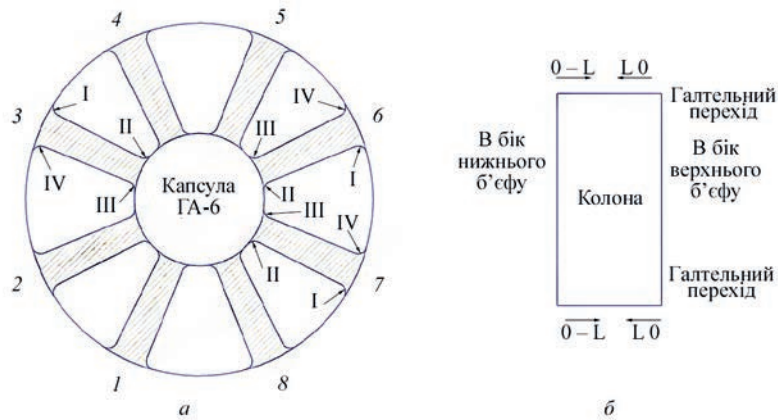


Рис. 2. Графічне зображення капсули ГА-6 з місцями ремонтних робіт (а) і система координат окремої колони (б)



Рис. 3. Зовнішній вигляд галтельного переходу агрегату ГА-6 олю. Зовнішній вигляд галтельного переходу наведено на рис. 3.

Лабораторією неруйнівного контролю, яка входить до підрозділу Київської ГЕС, було проведено огляд поверхні статора турбіни гідроагрегата ст. № 6 на наявність дефектів. За результатами обстеження капілярним методом галтельних переходів колон №№ 3, 6, 7 виявлено неприпустимі лінійні індикації, які дали змогу точно визначити місця майбутнього ремонту зварюванням і наплавленням.

Технологія ремонту полягала в повній ліквідації тріщин, формуванні крайок під зварювання, ремонтно-відновлювальному зварюванню (наплавленні) і подальшому неруйнівному контролю відновлених ділянок.

Виявлені візуальним оглядом тріщини повністю видалялись абразивним інструментом до непошкодженого металу з подальшою зачисткою прилеглого металу до металевому блиску. У про-

цесі видалення тріщин формувались V-подібні крайки з кутами розкриття в межах 30...40°. Повнота видалення тріщин у металі контролювалась методом кольорової дефектоскопії. Ремонтне зварювання виконувалось методом ручного дугового зварювання із використанням покритих електродів марки FOX EV50 (тип E42542H5). У певних випадках зварювання виконувалось з попереднім підігрівом у зоні зварювання до температури 130...150 °С. Для зменшення залишкових напружень і деформацій забезпечувалось уповільнене охолодження наплавленого металу, а в окремих випадках – обробка простукуванням зварних швів пневматичним інструментом після накладання кожного шару. Посилення шва видалялося абразивним інструментом із шліфуванням поверхні до необхідних геометричних розмірів згідно з кресленнями.

За регламентом робіт всі відремонтовані ділянки галтельних переходів потребували інструментального обстеження методами неруйнівного контролю, до яких входили візуально-вимірювальний, ультразвуковий і магнітний.

За результатами візуально-вимірювального контролю всі відремонтовані ділянки не мали видимих дефектів, метал шва та пришовна зона відповідали вимогам ДСТУ ISO 11971-2016 [2]. Ультразвуковий контроль із використанням дефектоскопу УД2-50 згідно з ДСТУ EN 12680-1-2015 [3] не виявив інформативні сигнали від внутрішніх неоднорідностей, які б перевищували рівень приймання.

Для виявлення можливих поверхневих і підповерхневих неоднорідностей був застосований магнітопорошковий метод із залученням, поруч із класичним МАГЕКС 1П, експериментального магнітного дефектоскопа ТВА-5, особливістю якого є побудова з окремих шарнірно з'єднаних рухомих елементів.

Порівняльна характеристика П-подібних НП на постійних магнітах

Номер	Тип НП	Технічні характеристики			
		Габаритні розміри, мм	Максимальна міжполюсна відстань, мм	Маса, кг	Сила відриву, Н
1	МАГЕКС-1П	Ø35×135×690	340	1,1	274,4
2	ТВА-5	Ø30×295	200	1,8	294

Закінчення таблиці

Номер	Тип НП	Технічні характеристики			
		Полюсна магнітна індукція B_p , мТл	Центральна тангенціальна складова H_t , кА/м	Пошукове магнітне поле в зазорі* $H_{вп}$, кА/м	Вид ярма
1	МАГЕКС-1П	120	16	30,4	трос
2	ТВА-5	72	11,2	44,8	шарнір

Примітка. *Зазор завширшки 3 мм між пластинами 500×250×12 мм на глибині 6 мм.

Як МАКЕС, так і ТВА – це П-подібні намагнічувальні пристрої (НП) з постійними магнітами, розроблені ІЕЗ ім. Є.О. Патона, проте конструкція першого характеризується наявністю гнучкого з’єднання полюсів сталевим феромагнітним тросом. Технічні характеристики даних НП наведено в таблиці.

З таблиці випливає, що значення пошукових магнітних полів у середині об’єкта для НП з шарнірними ярмами в 1,5 рази більше, ніж для НП з тросом. Відмова від вертикальності напрямку вектора намагнічування дозволяє зменшити силу тягіння магнітів приблизно в 2 рази (120/72) [4].

Конструкції наведених типів НП представлені на рис. 4.

Наведені на рис. 4 НП призначені для локального намагнічування визначеної ділянки металоконструкції. Для намагнічування наступної ділянки НП необхідно відірвати від поверхні з зусиллям 274,4...294 Н та пересунути на нову позицію. Таке пересування виконується з кроком, кратним ширині полюса вздовж всього зварювального шва, а НП мають встановлюватись під різними кутами до осі зварного з’єднання [5, 6].

Магнітний опір встановлених на контрольовану поверхню феромагнітного виробу зазначених НП описується виразом:

$$R_m = F/\Phi = l/\mu S,$$

де l та S – довжина та переріз ділянки магнітного ланцюга; μ – магнітна проникність.

Спираючись на твердження авторів [4], при віддаленні магнітних полюсів один від одного в діапазоні 60...100 мм магнітне поле ТВА-5 малозмінне, на відміну від НП з тросом, для якого воно змінюється від 70 до 60 мТл. Це свідчить про ширшу зону контролю НП з ярмом шарнірного типу та більшу доцільність у контролі великих площин.

За результатами магнітного контролю відремонтованих галтельних переходів колон №№ 3, 6, 7 намагнічуючим пристроєм ТВА-5 були виявлені неприпустимі лінійні індикації (рис. 5) згідно з наведеними нормами якості [8]. Наявність виявлених лінійних індикацій спонукало до повторних ремонтних процедур визначених ділянок.

За результатами кінцевого неруйнівного контролю відремонтованих ділянок галтельних переходів колон №№ 3, 6, 7 статора турбіни гідроагрегата ст. № 6 типу ПЛ15/3251-ГК-600 дефекти, які б не відповідали рівням приймання, виявлені не були.

Таким чином, оперативно проведений комплекс робіт з відновлення спрацьованих галтельних переходів агрегата типу ПЛ15/3251-ГК-600

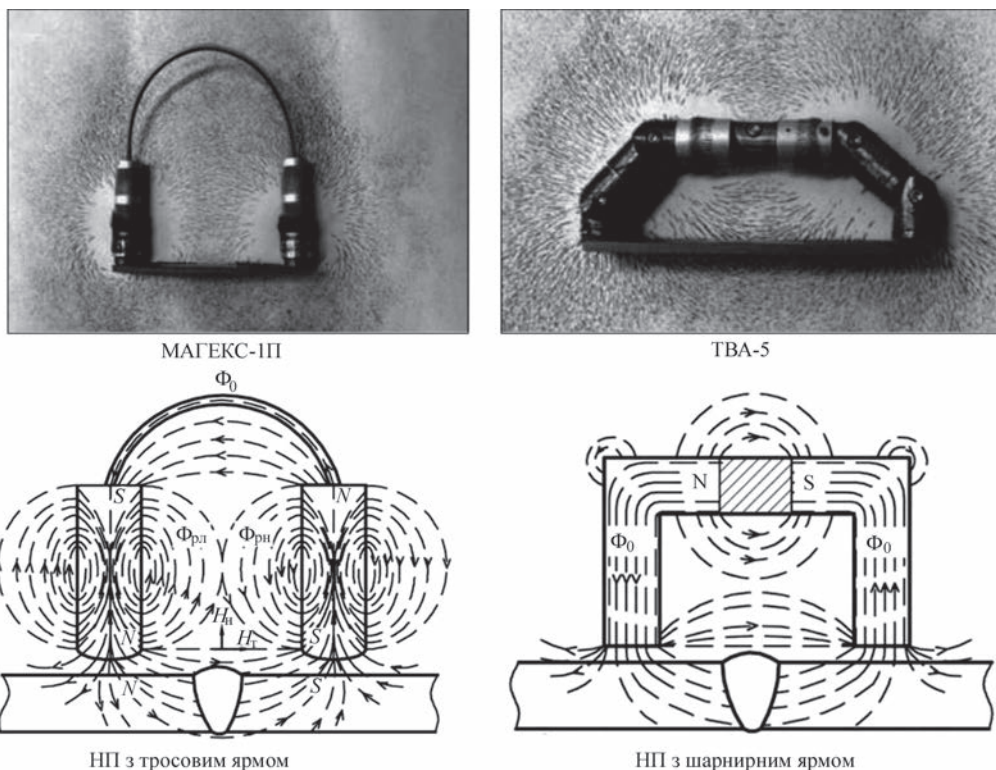


Рис. 4. Загальний вигляд П-подібних НП на постійних магнітах і розподілення їх магнітних полів

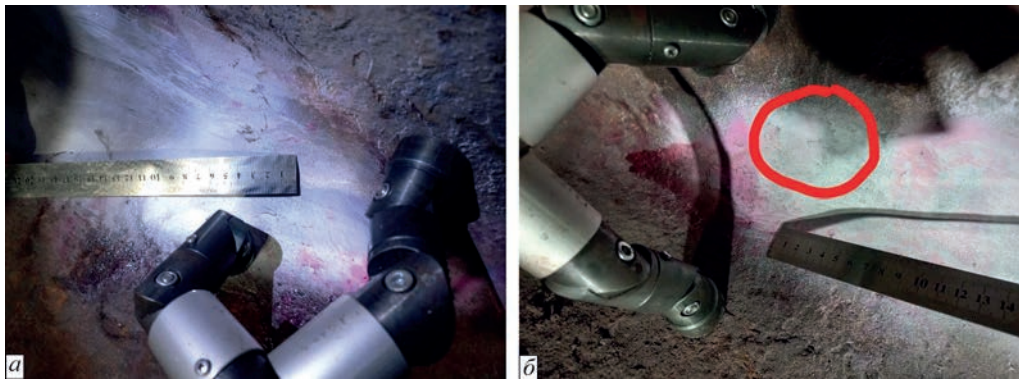


Рис. 5. Приклади дефектів галтельних переходів колон, виявлені магнітопорошковим контролем: а – колона № 6–4; б – колона № 7–2

Київської ГЕС забезпечив вчасне введення в експлуатацію агрегата № 6, що дозволило відновити роботу ГЕС у повному обсязі, а систематичний огляд галтельних переходів агрегата типу ПЛ15/3251-ГК-600 на Київській ГЕС виявився надзвичайно важливим для забезпечення безперервного функціонування ГЕС.

Висновки

1. Доцільність ремонту зварюванням визначається збитками від зупинки та простою виробництва або перервами в роботі виробничого обладнання, що вийшло з ладу.

2. Невід’ємною частиною ремонтних робіт відновлених ділянок є контроль їх якості неруйнівними методами (візуальний, УЗК, магнітний та ін.).

3. При необхідності виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів слід використовувати магнітопорошковий контроль. При контролі масивних товстостінних конструкцій можна використовувати НП на постійних магнітах з полюсною магнітною індукцією $\geq 60 B_n$, мТл.

4. Віддалення магнітних полюсів один від одного в діапазоні 60...100 мм не впливає на величину магнітного поля НП з шарнірним ярмом і свідчить про ширшу зону контролю на відміну від НП з ярмом-гросом та більшу можливість при контролі виробів великих площин з масивними стінками.

Список літератури

1. Гетманець С.М., Степанов Д.В. (2012) *Методичні вказівки з напрямку підготовки 6.050504 «Зварювання»*. Київ, НТУУ «КПІ».
2. ДСТУ ISO 11971-2016 *Сталеве і чавунне литво. Візуальне контролювання якості поверхні*.
3. ДСТУ EN 12680-1-2015. *Литво. Ультразвуковий контроль. Ч. 1. Відливки зі сталі загального призначення*.
4. Троицкий В.А., Горбик В.М., Бородай О.С. (2017) Сравнение различных систем намагничивающих устройств с постоянными магнитами для магнитопорошкового метода контроля. *Техн. диагностика и неразруш. контроль*, **4**, 32–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.04.05>
5. ДСТУ EN ISO 17638:2018 *Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль (EN ISO 17638:2016, IDT; ISO 17638:2016, IDT)*.
6. ISO 9934-1:2016 *Non-destructive testing – Magnetic particle testing. Part 1, 2, 3*.
7. ДСТУ ISO 4986-2015 *Сталеві відливки. Магнітопорошковий контроль (ISO 4986:2010, IDT)*.

References

1. Hetmanets, S.M., Stepanov, D.V. (2012) *Methodical guidelines for preparation 6.050504 «Welding»*. Kyiv, KPI [in Ukrainian].
2. DSTU ISO 11971-2016 *Steel and iron castings – Visual examination of surface quality* [in Ukrainian].
3. DSTU EN 12680-1-2015 *Founding – Ultrasonic examination – Pt 1: Steel castings for general purposes* [in Ukrainian].
4. Troitskii, V.A., Gorbik, V.M., Borodai, O.S. (2017) Comparison of different systems of magnetizing devices with constant magnets for magnetic particle testing. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 32–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.04.05> [in Russian].
5. DSTU EN ISO 17638:2018 *Non-destructive testing of welds – Magnetic particle testing (EN ISO 17638:2016, IDT; ISO 17638:2016, IDT)* [in Ukrainian].
6. ISO 9934-1:2016 *Non-destructive testing – Magnetic particle testing. Pt 1, 2, 3*.
7. DSTU ISO 4986-2015 *Steel castings – Magnetic particle inspection. (ISO 4986:2010, IDT)* [in Ukrainian].

FEATURES OF REPAIR AND DIAGNOSTICS OF PL15/3251-GK-600 UNIT OF KYIV HPP

V.Yu. Glukhovskiy, V.A. Lytvynenko, Yu.M. Kakhovskiy, M.Yu. Kakhovskiy

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevich str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: glukhovskyy@gmail.com

The question of selection of the methods of repair, control and diagnostics of the technical condition of fillet transitions in the unit of PL15/3251-GK-600 type of the Kyiv HPP by non-destructive testing techniques was considered. Features of instrumental examination of damage and repair of stator columns in the turbine of the hydraulic unit No. 6 of Kyiv HPP for PrJSC «Ukrhydroenergo» «Cascade of Kyiv HPPs and PSPPs» branch are described. The algorithm of examination of the stator columns of the turbine of hydro unit No. 6 of PL15/3251-GK-600 type is presented. Ref. 7, 1 Tabl., Fig. 5.

Keywords: Kyiv HPP, fillet transitions, non-destructive testing, welding, surfacing, repair, visual, capillary, ultrasonic, magnetic method, hydro unit, hydro turbine

Отримано 26.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 15.05.2024

Прийнято 10.09.2024



НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

члена Європейської Федерації з неруйнівного контролю
члена Міжнародного комітету з неруйнівного контролю



Вітаємо нових індивідуальних членів Українського товариства НКТД

- **Кривокульську Ольгу Олексіївну**
молодшу наукову співробітницю Національного авіаційного університету, м. Київ

Підтвердили членство в УТ НКТД на новий термін:

- **Богдан Галина Анатоліївна**
к.т.н., доцентка кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Владіміров Сергій Альбертович**
директор ТОВ «Науково-технічний центр «Січ Серт», м. Запоріжжя
- **Галаган Роман Віталійович**
к.т.н., доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Голишев Андрій Леонідович**
начальник відділу вібродіагностики ПрАТ «АК «Київводоканал» (технічний департамент)
- **Куц Юрій Васильович**
д.т.н., професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Лисенко Юлія Юріївна**
к.т.н., доцентка кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

- **Момот Андрій Сергійович**
PhD, старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Павловський Олексій Михайлович**
к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Паздрій Ольга Ярославівна**
Ph.D., асистентка кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Паренюк Дмитро Володимирович**
PhD, асистент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Повшенко Олександр Анатолійович**
Ph.D., асистент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Протасов Анатолій Георгійович**
д.п.н., професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



ПІДСУМКИ 20-ї ВСЕСВІТНЬОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ



З 27 по 31 травня 2024 р. у місті Інчхон, яке називають «воротами корейської столиці» і розглядають як частину Великого Сеула, з успіхом відбулася 20-а Всесвітня конференція з неруйнівного контролю (20th WCNDT).

У цій довгоочікуваній події (внаслідок COVID-пандемії конференція була перенесена з 2020 р.) взяли участь понад 3000 спеціалістів, було зроблено понад 1000 наукових презентацій. У рамках конференції проведено дві Генеральні асамблеї Міжнародного комітету з НК (ICNDT), на яких Українське товариство НКТД представляла членкиня Правління УТ НКТД Тетяна Луценко; «Науковий день» Міжнародної Академії неруйнівного контролю (ANDTI); засідання технічного комітету з НК і підкомітетів Міжнародної організації зі стандартизації (ISO). Було вручено

нагороди за визначні досягнення в галузі НК і визначено країну-господаря 22-ї Всесвітньої конференції з НК. Її прийматиме в 2032 р. Сінгапур (у 2028 р. 21-а WCNDT відбудеться в Буенос-Айресі, Аргентина).

Справжній успіх мала виставка засобів НК, на якій було представлено понад 200 компаній-виробників, дистриб'юторів, постачальників послуг, науково-дослідних інститутів і національних товариств з НК. Україна була представлена двома компаніями: **OKondt GROUP** (Київ) і **NOVOTEST** (Дніпро).

Нижче подано дві оглядові статті, присвячені конференції і фотодобірка з офіційного сайту конференції.

Матеріали конференції: <https://20thwcndt.com/02/0204.html>
Фотогалерея: <https://www.flickr.com/photos/20thwcndt/albums/>
Відеоогляд: <https://www.youtube.com/watch?v=yDkcEk9W-pw>



УЧАСТЬ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИКА ЗАСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ У 20-й ВСЕСВІТНІЙ КОНФЕРЕНЦІЇ ТА ВИСТАВЦІ (20th WCNDT)

27–31 травня 2024 року в місті Інчхон (Південна Корея) в Міжнародному конференц-центрі Songdo Convensia відбулася довгоочікувана 20-а Всесвітня конференція та виставка з неруйнівного контролю. Її організаторами були Кореїнське товариство з НК (KSNT) і Міжнародний комітет з НК (ICNDT). Конференція стала місцем обміну ідеями та інтеграції колег-професіоналів з усього світу, що працюють у галузі НК.

У виставці засобів для НК, площа якої складала понад 12000 м² свої стенди мали 211 ком-

паній-експонентів із 29 країн, а також 25 національних товариств неруйнівного контролю.

У цьому масштабному всесвітньому заході взяв участь **OKOndt GROUP** – український розробник і виробник засобів НК для авіації, нафтогазової, залізничної, аерокосмічної, машинобудівної, хімічної, теплової енергетики та інших галузей промисловості. З огляду на існуючі в Україні умови роботи бізнесу, підприємств та організацій, компанію представив жіночий склад фахівців.

Тематика конференції:

- Акустична емісія
- Акустичні методи
- Адитивне виробництво
- Аерокосмічна промисловість і оборона
- Мистецтво та культурна спадщина
- Біомедичні технології
- Сертифікація та кваліфікація
- Цивільна інфраструктура
- Композиційні матеріали
- Залишкові напруження
- Цифрова та комп'ютерна радіографія
- Томографія
- Вихрові струми та електромагнетизм
- Електронні деталі
- Харчування і сільське господарство
- Зелені та екотехнології
- Інфрачервона термографія
- Характеристики матеріалів
- Мікро- та нанотехнології
- Індустрія 4.0 і NDE 4.0
- Надійність НК
- Нафта і газ
- Оптика та системи зору
- Електростанції
- Громадська безпека та безпека людини
- Сенсори та матеріали
- Структурний моніторинг
- Прогнозування та управління
- Терагерц
- Транспорт (автомобільний, морський, залізничний)
- Ультразвук
- Моніторинг вібрації та стану

Основні доповідачі :

- Leonard J. Bond (Iowa State University, US)
- Fu-Kuo Chang (Stanford University, US)
- Zhenmao Chen (Xi'an Jiaotong University, CN)
- Jean Dumoulin (University Gustave Eiffel, FR)
- Manabu Enoki (University of Tokyo, JP)
- Uwe Ewert (BAM, DE)
- Xiaorong Gao (Southwest Jiaotong University, CN)
- Vitalyi Gusev (Le Mans Université, FR)
- Sohichi Hirose (Tokyo Institute of Technology, JP)
- Ken Loh (University of California San Diego, US)
- Xavier Maldague (Université Laval, CA)
- Giuseppe Nardoni (Academia NDT Int., IT)
- John S. Popovics (UIUC, US)
- Takahide Sakagami (Kobe University, JP)
- Gongtian Shen (ChSNDT, CN)
- Tomoki Shiotani (Kyoto University, JP)
- Igor Solodov (University of Stuttgart, DE)
- Henry Stephens (ASME, US)
- Pavel Trtik (Paul Scherrer Institute, CH)
- Michael Turnbow (ASME, US)
- Lalita Udpa (Michigan State University, US)
- B. Venkatraman (IGCAR, IN)



Стенд OKOndt GROUP



OKOndt GROUP була представлена жіночим складом фахівців



Т.М. Луценко з президентом ICNDT Sajeesh Babu



Стенд OKOndt GROUP відвідали представники різних міжнародних компаній



На Генеральній асамблеї Міжнародного комітету з НК

На стенді **OKOndt GROUP** були представлені:

- автоматизована система вихрострумовео контролю авіаційних коліс SMARTSCAN FA;
- швидкісна ультразвукова система контролю залізничних рейок OKOSCAN 73HS
- дворейковий вихрострумівий дефектоскоп ETS 2-73;
- однорейковий ультразвуковий дефектоскоп UDS 2-77;
- портативні вихроструміві дефектоскопи Eddycon C/CL;
- портативний ультразвуковий дефектоскоп Sonocon BL;
- вихроструміві та ультразвукові датчики;
- калібрувальні зразки.

Крім офіційної програми, Корейське товариство НК організувало для делегатів конференції вітальний прийом, культурний вечір і святкову вечерю, щоб вони могли дізнатися про корейську культуру та чудово прове-

сти час після насичених днів. Зокрема, гості мали можливість скуштувати корейську вуличну їжу, взяти участь у корейських традиційних іграх, а також насолодитися чудовим виступом корейських поп-артистів, народних танцюристів, духового оркестру та демонстрацією бойових мистецтв корейської збірної з тхеквондо.

20-а Всесвітня конференція з НК стала успішною платформою для налагодження зв'язків і натхненням для нових технічних ідей.

Країною проведення чергової всесвітньої конференції з НК (21th WCNDT) у 2028 р. стане Аргентина. Аргентинське товариство НК запросило всіх учасників до Буенос-Айреса, де і відбудеться цей міжнародний захід.

Ольга Мережа
OKOndt GROUP



20-а ВСЕСВІТНЯ КОНФЕРЕНЦІЯ З НК ВИЗНАНА ЯК ВЕЛИКИЙ УСПІХ



Через глобальний вплив, спровокований пандемією COVID-19, Корейське товариство неруйнівного контролю (KSNT) було змушене перенести 20-у Всесвітню конференцію з неруйнівного контролю (20th WCNDT) з 2020 на 2024 р. Місцем проведення 20th WCNDT, яка відбулась з 27 по 31 травня став Виставковий центр Songdo Convensia в місті Інчхон (Корея). Успіху цього заходу сприяли самовіддана праця членів оргкомітету та всіх пов'язаних сторін, які були мотивовані подарувати учасникам найнезабутніші спогади, оскільки всі, напевно, так довго чекали на цю подію.

Церемонія відкриття відбулася 27 травня 2024 р. Голова оргкомітету доктор Dong-Jin Yoon офіційно оголосив про відкриття конференції, а президент Корейського товариства з НК (KSNT) професор Kyung-Young Jhang привітав усіх присутніх від імені KSNT. Голова Міжнародного комітету з НК (ICNDT) доктор Sajeesh K. Vabu щиро подякував усім за внесок в успіх Всесвітньої конференції і привітав переможців нагород ICNDT 2024 р. Кожному було вручено відзнаку про їхній

внесок в НК у кожній із відповідних сфер діяльності.

Загальна кількість учасників склала 3145 з 64 країн, у тому числі 1422 з Кореї. Понад 900 доповідачів і понад 250 експонентів виконали свою роль протягом п'ятиденного періоду Всесвітньої конференції. Науково-програмний комітет у складі 18 вчених реалізував чудову наукову програму конференції. На наукові сесії було подано 936 тез, з яких 764 усні та 174 стендові. Для подальшого збагачення змісту Всесвітньої конференції було запрошено 22 основних доповідачів і 27 запрошених на додаток до трьох видатних доповідачів на пленарному засіданні.

Перший доповідач на пленарному засіданні – професор Tai Sik Lee – представив аудиторії свою презентацію «НК: першопрохідник на останньому рубежі». Друга пленарна доповідь «Когнітивні датчики та системи даних для NDE матеріалів і для використання в циркулярній економіці» була проведена професором доктором Bernd Valeske. Професор Такааки Kajita, лауреат Нобелівської премії з фізики



2015 р., представив третю пленарну доповідь під назвою «Нейтрини – ключові частинки для нашого розуміння найменших частинок і найбільшого Всесвіту» у рамках програми наукового дня Міжнародної Академії з НК (ANDTI).

На величезній виставці, яка охопила значну площу у великій залі поруч із конференц-залою, було представлено близько 236 компаній-експонентів з усього світу та 25 товариств НК з усіх регіонів світу.

Діяльність ICNDT охоплювала різні засідання комітетів і семінари під час Конференції, включаючи два засідання Генеральної асамблеї ICNDT, засідання робочих груп, засідання керівників ICNDT і SIG. Після закінчення роботи конференції (1–2 червня 2024 р.) відбулися засідання технічного комітету з НК Міжнародної організації із стандартизації (ISO).

Що стосується соціальної функції Конференції, протягом тижня було заплановано

кілька соціальних заходів для делегатів, щоб дати їм змогу насолодитися поєднанням академічних та ділових справ і відпочити. «Гала-вечеря» в середу відбулася під звуки Кореї, а метою «Культурної ночі» було надання учасникам конференції можливості відчувати різні особливості корейської культури в невимушеній атмосфері, зустріти нових друзів і поспілкуватися із старими.

Церемонія закриття конференції забезпечила огляд заходів тижня шляхом перегляду масивів фотографій, що залишило незабутнє враження про цю блискучу подію. Далі відбулися презентації відповідних товариств для просування майбутніх регіональних конференцій, після чого учасники попрощалися до наступної 21-ї WCNDT, що відбудеться у Буенос-Айресі (Аргентина) у 2028 р.

*Текст: Корейське товариство з НК
Переклад: А.Л. Шекеро, УТ НКТД*

Новини в сфері стандартизації

Технічний комітет стандартизації ТК-78 підготував актуалізований перелік діючих в Україні національних стандартів з неруйнівного контролю і дотичних до цієї галузі. Загалом до нього входить 226 стандартів. Продовжуємо публікувати витяги з цього ка-

талогу. Нижче наведено діючі стандарти з радіаційних методів контролю.

Повний каталог стандартів з НК в електронному вигляді доступний за запитом на e-mail: usndt@ukr.net для членів УТ НКТД, що протягом останнього річного періоду сплатили членський внесок.

	Позначення НД	Назва НД	Метод прийняття
1	ДСТУ EN 12543-1:2016 (EN 12543-1:1999, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристики фокусних плям у промислових рентгенівських системах, які використовують у неруйнівному контролі. Частина 1. Метод сканування	Підтвердження
2	ДСТУ EN 12543-2:2022 (EN 12543-2:2021, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристики фокусних плям у промислових рентгенівських системах, які використовують у неруйнівному контролі. Частина 2. Метод радіографії із застосуванням мікроканальної камери	Підтвердження
3	ДСТУ EN 12543-3:2016 (EN 12543-3:1999, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристики фокусних плям у промислових рентгенівських системах, які використовують у неруйнівному контролі. Частина 3. Метод радіографії із застосуванням щілинної камери	Підтвердження
4	ДСТУ EN 12543-4:2016 (EN 12543-4:1999, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристики фокусних плям у промислових рентгенівських системах, які використовують у неруйнівному контролі. Частина 4. Крайовий метод	Підтвердження
5	ДСТУ EN 12543-5:2016 (EN 12543-5:1999, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристики фокусних плям у промислових рентгенівських системах, які використовують у неруйнівному контролі. Частина 5. Вимірювання ефективної плями міні- і мікрофокусних рентгенівських трубок	Підтвердження
6	ДСТУ EN 12544-1:2016 (EN 12544-1:1999, IDT)	Неруйнівний контроль. Вимірювання та оцінка напруги рентгенівської трубки. Частина 1. Метод розділення напруги	Підтвердження

7	ДСТУ EN 12544-2:2016 (EN 12544-2:2000, IDT)	Неруйнівний контроль. Вимірювання та оцінка напруги рентгенівської трубки. Частина 2. Контролювання стабільності методом товстого фільтра	Підтвердження
8	ДСТУ EN 12544-3:2016 (EN 12544-3:1999, IDT)	Неруйнівний контроль. Вимірювання та оцінка напруги рентгенівської трубки. Частина 3. Спектротричний метод	Підтвердження
9	ДСТУ EN 12679:2019 (EN 12679:2018, IDT)	Неруйнівний контроль. Визначення розміру промислових радіографічних джерел випромінювання. Радіографічний метод	Підтвердження
10	ДСТУ EN 12681:2005	Литво. Контроль радіографічний	Переклад
11	ДСТУ EN 12681-1:2022 (EN 12681-1:2017, IDT)	Литво. Радіографічний контроль. Частина 1. Плівкові методи	Підтвердження
12	ДСТУ EN 12681-2:2022 (EN 12681-2:2017, IDT)	Литво. Радіографічний контроль. Частина 2. Методи із застосуванням цифрових детекторів	Підтвердження
13	ДСТУ EN 13068-1:2007	Неруйнівний контроль. Радіоскопічний контроль. Частина 1. Кількісне вимірювання властивостей зображення	Переклад
14	ДСТУ EN 13068-2:2008	Неруйнівний контроль. Контроль радіоскопічний. Частина 2. Контролювання довгострокової стабільності пристроїв і формування зображення	Переклад
15	ДСТУ EN 13068-3:2016 (EN 13068-3:2001, IDT)	Неруйнівний контроль. Радіоскопічний контроль. Частина 3. Загальні принципи радіоскопічного контролю металевих матеріалів рентгенівським і гамма-випромінюванням	Підтвердження
16	ДСТУ EN 13100-2:2022 (EN 13100-2:2019, IDT)	Неруйнівний контроль зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 2. Рентгенівський радіографічний контроль	
17	ДСТУ EN 1330-11:2022 (EN 1330-11:2007, IDT)	Неруйнівний контроль. Термінологія. Терміни, що використовуються в рентгенівській дифракції від полікристалічних і аморфних матеріалів.	
18	ДСТУ EN 1330-3:2008	Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 3. Терміни стосовно промислового радіаційного контролю	Переклад
19	ДСТУ EN 13925-1:2022 (EN 13925-1:2003, IDT)	Неруйнівний контроль. Дифракція рентгенівського випромінювання на полікристалічному та аморфному матеріалі. Частина 1. Загальні принципи.	
20	ДСТУ EN 13925-2:2022 (EN 13925-2:2003, IDT)	Неруйнівний контроль. Дифракція рентгенівського випромінювання на полікристалічному та аморфному матеріалі. Частина 2: Процедури.	
21	ДСТУ EN 13925-3:2022 (EN 13925-3:2005, IDT)	Неруйнівний контроль. Дифракція рентгенівського випромінювання на полікристалічному та аморфному матеріалі. Частина 3: Інструменти.	
22	ДСТУ EN 14784-1:2008	Неруйнівний контроль. Радіографія промислова комп'ютерна із зображенням на фосфорних пластинах. Частина 1. Класифікація систем	Переклад
23	ДСТУ EN 15305:2022 (EN 15305:2008, IDT)	Неруйнівний контроль – метод аналізу залишкової напруги за допомогою рентгенівської дифракції.	
24	ДСТУ EN 25580:2006	Неруйнівний контроль. Промислові радіографічні негативоскопи. Мінімальні вимоги	Переклад
25	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	Підтвердження
26	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	Підтвердження
27	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	Підтвердження
28	ДСТУ EN ISO 10893-7:2022 (EN ISO 10893-7:201, IDT; ISO 10893-7:2019, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 7. Цифровий радіографічний контроль зварного шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів	Підтвердження
29	ДСТУ EN ISO 11699-1:2016 (EN ISO 11699-1:2011, IDT, ISO 11699-1:2008, IDT)	Неруйнівний контроль. Рентгенівські плівки для промислової радіографії. Частина 1. Класифікація плівкових систем для промислової радіографії	Підтвердження

30	ДСТУ EN ISO 11699-2:2019 (EN ISO 11699-2:2018, IDT; ISO 11699-2:2018, IDT)	Неруйнівний контроль. Рентгенографічні плівки технічної призначеності. Частина 2. Контролювання оброблення плівок у відповідності до еталонних значень	Підтвердження
31	ДСТУ EN ISO 14096-1:2022 (EN ISO 14096-1:2020, IDT; ISO 14096-1:2005, IDT)	Неруйнівний контроль. Атестація систем оцифрування радіографічної плівки. Частина 1. Визначення, кількісні вимірювання параметрів якості зображення, стандартна еталонна плівка та контроль якості	
32	ДСТУ EN ISO 14096-2:2022 (EN ISO 14096-2:2020, IDT; ISO 14096-2:2005, IDT)	Неруйнівний контроль. Атестація систем оцифрування радіографічної плівки. Частина 2. Мінімальні вимоги	
33	ДСТУ EN ISO 15708-1:2019 (EN ISO 15708-1:2019, IDT; ISO 15708-1:2017, IDT)	Неруйнівний контроль. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 1. Термінологія	Підтвердження
34	ДСТУ EN ISO 15708-2:2019 (EN ISO 15708-2:2019, IDT; ISO 15708-2:2017, IDT)	Неруйнівний контроль. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 2. Принципи, обладнання та зразки	Підтвердження
35	ДСТУ EN ISO 15708-3:2019 (EN ISO 15708-3:2019, IDT; ISO 15708-3:2017, IDT)	Неруйнівний контроль. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 3. Порядок роботи та інтерпретація результатів	Підтвердження
	ДСТУ EN ISO 15708-4:2019 (EN ISO 15708-4:2019, IDT; ISO 15708-4:2017, IDT)	Неруйнівний контроль. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 4. Кваліфікація роботи системи	Підтвердження
36	ДСТУ EN ISO 16371-2:2019 (EN ISO 16371-2:2017, IDT; ISO 16371-2:2017, Corrected version 2018-05, IDT)	Неруйнівний контроль. Промислова комп'ютерна радіографія із застосуванням запам'ятовуючих фосфорних радіографічних пластин. Частина 2. Загальні принципи контролювання металевих матеріалів з використанням рентгенівського та гамма випромінювання	Підтвердження
37	ДСТУ EN ISO 16526-1:2022 (EN ISO 16526-1:2020, IDT; ISO 16526-1:2011, IDT)	Неруйнівний контроль. Вимірювання та оцінка напруги рентгенівської трубки. Частина 1. Метод дільника напруги	
38	ДСТУ EN ISO 16526-2:2022 (EN ISO 16526-2:2020, IDT; ISO 16526-2:2011, IDT)	Неруйнівний контроль. Вимірювання та оцінка напруги рентгенівської трубки. Частина 2. Перевірка сталості методом товстого фільтра	
39	ДСТУ EN ISO 16526-3:2022 (EN ISO 16526-3:2020, IDT; ISO 16526-3:2011, IDT)	Неруйнівний контроль. Вимірювання та оцінка напруги рентгенівської трубки. Частина 3. Спектрометричний метод	
40	ДСТУ EN ISO 17636-1:2014	Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 1. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням плівок	Підтвердження
41	ДСТУ EN ISO 17636-2:2014	Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 2. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням цифрових детекторів	Підтвердження
42	ДСТУ EN ISO 19232-1:2016 (EN ISO 19232-1:2013, IDT, ISO 19232-1:2013, IDT)	Неруйнівний контроль. Якість зображення радіографічних знімків. Частина 1. Визначення показника якості зображення за допомогою індикатора якості зображення дрогового типу	Підтвердження
43	ДСТУ EN ISO 19232-2:2016 (EN ISO 19232-2:2013, IDT, ISO 19232-2:2013, IDT)	Неруйнівний контроль. Якість зображення радіографічних знімків. Частина 2. Визначення показника якості зображення за допомогою індикатора якості зображення типу ступінь – отвір	Підтвердження
44	ДСТУ EN ISO 19232-3:2015 (EN ISO 19232-3:2013, IDT; ISO 19232-3:2013, IDT)	Контроль неруйнівний. Якість зображення на рентгенівських знімках. Частина 3. Класи якості зображення	Підтвердження
45	ДСТУ EN ISO 19232-4:2016 (EN ISO 19232-4:2013, IDT, ISO 19232-4:2013, IDT)	Контроль неруйнівний. Якість зображення на рентгенівських знімках. Частина 4. Експериментальне оцінювання значень і таблиць якості зображення	Підтвердження
46	ДСТУ EN ISO 19232-5:2019 (EN ISO 19232-5:2018, IDT; ISO 19232-5:2018, IDT)	Неруйнівний контроль. Якість зображення на рентгенівських знімках. Частина 5. Визначення нерізкості зображення з використанням індикаторів дуплексного типу	Підтвердження
47	ДСТУ EN ISO 20769-1:2019 (EN ISO 20769-1:2018, IDT; ISO 20769-1:2018, IDT)	Неруйнівний контроль. Радіографічне інспектування наявності корозії та відкладень у трубах рентгенівським та гамма-випромінюванням. Частина 1. Тангенціальний спосіб просвічування	Підтвердження

48	ДСТУ EN ISO 20769-2:2019 (EN ISO 20769-2:2018, IDT; ISO 20769-2:2018, IDT)	Неруйнівний контроль. Радіографічне інспектування на наявність корозії та відкладень у трубах рентгенівським та гамма-випромінюванням. Частина 2. Радіографічний контроль подвійної стінки	Підтвердження
49	ДСТУ EN ISO 21432:2022 (EN ISO 21432:2020, IDT; ISO 21432:2019, IDT)	Неруйнівне випробування. Стандартний метод випробування для визначення залишкових напруг методом дифракції нейтронів	
50	ДСТУ EN ISO 5579:2014	Неруйнівний контроль. Радіографічний контроль металевих матеріалів із застосуванням плівки та рентген- і гамма-випромінювання. Основні правила	Підтвердження
51	ДСТУ ISO 4993:2018 (ISO 4993:2015, IDT)	Сталеве та чавунне литво. Радіографічний контроль	Підтвердження
52	ДСТУ ISO 5576:2016 (ISO 5576:1997, IDT)	Контроль неруйнівний. Промислова радіологія з використанням рентгенівського і гамма-випромінювання. Словник термінів	Підтвердження

РОЗ'ЯСНЕННЯ МІНІСТЕРСТВА ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ ЩОДО ОBOB'ЯЗКОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ ОФІЦІЙНИХ ТЕКСТІВ НАЦІОНАЛЬНИХ, МІЖНАРОДНИХ ЧИ ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТАНДАРТІВ

Згідно з розпорядженням Кабінету Міністрів України від 26.11.2014 № 1163-р «Про визначення державного підприємства, яке виконує функції національного органу стандартизації» функції національного органу стандартизації виконує державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (далі – ДП «УкрНДНЦ»). ДП «УкрНДНЦ» також уповноважено представляти інтереси України в Міжнародній організації зі стандартизації (ISO).

Відповідно до ч. 2 ст. 11 Закону України «Про стандартизацію» (далі – Закон про стандартизацію) до повноважень національного органу стандартизації належить, зокрема, прийняття, скасування та відновлення дії національних стандартів. Ч. 1 ст. 24 Закону про стандартизацію передбачає, що національні стандарти, кодекси усталеної практики, зміни до них і розроблені національним органом стандартизації каталоги видаються, відтворюються та розповсюджуються національним органом стандартизації.

Отже, в Україні повноваження на видання, відтворення та розповсюдження національних стандартів надано ДП «УкрНДНЦ».

Видання, відтворення та розповсюдження міжнародних стандартів регулюється ч. 2 ст.

24 Закону про стандартизацію. Видання, відтворення та розповсюдження документів міжнародних і регіональних організацій стандартизації, членом яких є національний орган стандартизації, здійснюються зазначеним органом відповідно до правил таких організацій.

Такими правилами є ISO PCOSA 2017 «Політики розповсюдження, продажу та копіювання публікацій та захист авторського права ISO», схвалені Резолюцією Ради ISO 08/2017 (далі – ISO PCOSA 2017), що визначають умови стосовно відтворення та розповсюдження публікацій ISO і пов'язані з ними метадані щодо публікацій ISO. Відповідно до п. 4.4. ISO PCOSA 2017 кожен член ISO повинен сумлінно вживати всіх економічно доцільних заходів, дозволених законодавством, застосованим на їхній національній території, щоб запобігти, зокрема, несанкціонованому використанню вмісту будь-якої публікації ISO. П. 5.1 ISO PCOSA 2017 встановлено, що на одній національній території є лише один член ISO. При цьому відповідно до п. 6.2 ISO PCOSA 2017 члени ISO несуть основну відповідальність за продаж і розповсюдження публікацій ISO, національних стандартів на своїх національних територіях. Члени ISO можуть продавати публікації ISO у різних мовних версіях.

Продаж оригінальних публікацій ISO підлягає сплаті роялті.

Ч. 1 ст. 25 Закону про стандартизацію встановлено, що право власності на національні стандарти, кодекси ustalеної практики та розроблені національним органом стандартизації каталоги належить державі. Ч. 3 ст. 25 Закону про стандартизацію забороняється повністю чи частково видавати, відтворювати з метою розповсюдження та розповсюджувати як офіційні видання будь-які національні стандарти або їх частини на будь-яких носіях інформації без дозволу національного органу стандартизації чи уповноваженої ним особи.

Відповідно до абзацу 2 ст. 1 Закону України «Про акредитацію органів з оцінки відповідності» акредитація органів з оцінки відповідності (далі – ООВ) – засвідчення національним органом України з акредитації того, що орган з оцінки відповідності відповідає вимогам національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, або вимогам міжнародних чи європейських стандартів, та у разі необхідності будь-яким додатковим вимогам щодо акредитації у відповідних сферах для провадження визначеної діяльності з оцінки відповідності.

Відповідно до ст. 1 Закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» орган з оцінки відповідності – орган (підприємство, установа, організація чи їх структурний підрозділ), що здійснює діяльність з оцінки відповідності, включаючи калібрування, випробування, сертифікацію та інспектування, а оцінка відповідності – процес доведення того, що задані вимоги, які стосуються продукції, процесу, послуги, системи, особи чи органу, були виконані.

Отже, з урахуванням ст. 25 Закону про стандартизацію, Національне агентство з акредитації України (НААУ) для засвідчення відповідності ООВ вимогам національних стандартів, а ООВ в рамках діяльності з оцінки відповідності вимогам національних стандартів повинні використовувати офіційні тексти відповідних національних стандартів.

Крім того, фізичні або юридичні особи, що застосовують у своїй діяльності національні

стандарти, повинні використовувати їх офіційні тексти.

Відповідно до чч. 4, 5 ст. 25 Закону про стандартизацію у разі видання, відтворення чи розповсюдження національного стандарту або його частини без дозволу національного органу стандартизації (ДП «УкрНДНЦ») зазначений орган не несе відповідальності за невідповідність тексту розповсюдженого документа його офіційному тексту чи за наслідки, спричинені застосуванням розповсюдженого документа.

Національний орган стандартизації (ДП «УкрНДНЦ») має право на відшкодування збитків, завданих йому недозволенним виданням, відтворенням та розповсюдженням національного стандарту або його частини, відповідно до закону (ч. 5 ст. 25 Закону про стандартизацію).

Таким чином, відповідно до законодавства видання, відтворення та розповсюдження офіційних текстів національних стандартів, а також стандартів відповідних міжнародних і регіональних організацій стандартизації, членом яких є національний орган стандартизації чи з якими він співпрацює відповідно до положень таких організацій або відповідних договорів, інших інформаційних і довідкових видань з питань стандартизації, а також шляхом їх розповсюдження інформаційними мережами в порядку ініціативи та на замовлення належить до повноважень ДП «УкрНДНЦ» як національного органу стандартизації.

З огляду на викладене, звертаємо увагу на дотримання вимог законодавства стосовно використання виключно офіційних текстів національних стандартів під час здійснення повноважень органами з оцінки відповідності, Національним агентством з акредитації України та іншими суб'єктами у сфері стандартизації.

ДП «УкрНДНЦ» забезпечує перевірку, підтвердження текстів національних, міжнародних чи європейських стандартів щодо їх офіційного статусу, а також видання, відтворення та розповсюдження офіційних текстів національних стандартів.

ГОЛОВНІ НАУКОВІ МЕТРИКИ. ЩО ПОТРІБНО ЗНАТИ?

(журнал «Наука і метрика», 11.07.2024, <https://nim.media/>)

Наукові метрики відображають не тільки рівень популярності, авторитету та впливу авторів. Зазвичай рейтинг науковця визначається на основі його показників у найбільших наукометричних базах даних та платформах, таких як *Scopus*, *Web of Science* і *Google Scholar*. Сьогодні ми розглянемо основні наукові метрики.

Види наукових метрик. Існує декілька видів наукових метрик, які використовуються для вимірювання різних аспектів академічної діяльності, серед яких: журнальні метрики, метрики для науковців, метрики наукових публікацій.

1. Журнальні наукові метрики. Одним з видів наукометричних показників є журнальні метрики – важливі наукометричні показники, які використовуються для оцінки впливу та визначення рейтингу наукових журналів. Основні журнальні метрики:

1.1. CiteScore. *CiteScore* є надійним методом для кількісної оцінки впливу наукових журналів, що базується на даних бази *Scopus*. Ця метрика розраховує середню кількість цитувань за чотири роки для рецензованих документів п'яти типів, таких як дослідницькі статті, оглядові статті, матеріали конференцій, інформаційні статті та розділи книг, що були опубліковані у журналі протягом цього періоду. Рік випуску визначається за датою на обкладинці журналу. *CiteScore* надає чіткі показники, які дозволяють розробити обґрунтовану видавничу стратегію, управляти бібліотечною колекцією та порівнювати продуктивність журналу.

1.2. Impact Factor. *Impact Factor*, або Коефіцієнт впливовості є одним з найвідоміших показників, який був розроблений ще у 1960 р. Головна мета створення цього коефіцієнту полягала в допомозі бібліотекарям у виборі журналів для передплати. Цей показник визначається як співвідношення кількості цитувань статей, опублікованих у певному

журналі за два попередні роки, до загальної кількості статей та оглядів, опублікованих у цьому журналі за той самий період. Коефіцієнт впливовості відображається у профілі журналу в базі даних *Journal Citation Reports* і є показником впливовості та цитованості журналу в науковій спільноті. Важливо відзначити, що цей показник розраховується лише для журналів, які індексуються у базах *Web of Science*, таких як *Science Citation Index Expanded* і *Social Sciences Citation Index*. Для журналів, які індексуються у базі *Scopus*, *Impact Factor* не розраховується, якщо вони не індексуються паралельно у *Web of Science*.

1.3. SJR Scimago Journal Rank. *Scimago Journal Rank (SJR)* – це індикатор впливу наукових журналів, що розраховується, беручи за основу число цитувань статей у цих журналах, а також впливовості журналів, які цитують ці публікації. Формула *SJR* враховує авторитет самого видання, а також авторів, які в ньому публікуються, впливовість журналів, що цитують статті, та тематичну близькість публікацій. *SJR* розраховується тільки для журналів, які вже присутні у базі *Scopus* протягом мінімум 1–2 років.

1.4. Source Normalized Impact per Paper (SNIP). Наступним наукометричним показником є *Source Normalized Impact per Paper (SNIP)*, який використовується для проведення оцінки впливу наукових видань. Цей показник був розроблений у 2010 р. *SNIP* допомагає вирівняти різницю у можливостях цитування та безпосередньо порівнювати журнали різної тематики, враховуючи частоту цитування і швидкість зростання впливу цитат, а також ступінь відображення літератури у базі даних. *SNIP* враховує посилання, зроблені в поточному році, на статті, опубліковані за останні три роки. Цей показник часто використовується для розв'язання питань щодо фінансової підтримки наукових досліджень.

2. Основні наукові метрики для науковців. *Індекс Гірша*, також відомий як h-index, є одним з ключових наукометричних показників у науковій сфері, числове значення якого відображає взаємозв'язок між цитатами та науковими публікаціями автора. *Індекс Гірша*, запропонований у 2005 р., призначений для вимірювання продуктивності та цитувань результатів досліджень конкретного автора, дослідницької групи або журналу. Показник *Індексу Гірша* визначається за кількістю наукових робіт автора та кількістю цитувань цих робіт. *Індекс Гірша* можна обчислити, використовуючи безкоштовні наукометричні бази даних в мережі Інтернет, наприклад *Google Scholar*, або комерційні, що доступні за передплатою, такі як *Scopus* або *Web of Science*. Платні бази даних часто надають різні значення *Індексу Гірша* для тих самих науковців, які відображені у вільному доступі. Варто відзначити, що значення *Індексу Гірша* може змінюватися залежно від покриття конкретної бази даних. Також існує можливість урахування або ігнорування самоцитувань при розрахунку цього показника.

3. Основні метрики наукових публікацій. *Altmetric Attention Score* відстежує інтернет-згадки про опубліковані результати нау-

кових досліджень, доповнюючи традиційні метрики на основі цитувань. Цей індикатор враховує наступні типи «згадок»:

- перегляди (перегляд HTML і завантаження PDF);
- обговорення (коментарі в журналах, наукових блогах, Twitter, Facebook та ін. соціальних мережах);
- збереження (збереження в Mendeley, CiteULike та ін. соціальних закладках);
- цитування (цитування в науковій літературі, що відстежуються *Web of Science*, *Scopus*, *Crossref* та ін. базами даних);
- рекомендації (використання на платформах, наприклад F1000Prime).

Однією з переваг *Altmetric Attention Score* є швидкий зворотний зв'язок. Автор може отримати відгук на свою роботу майже миттєво після публікації.

Наукометричні показники впливають не тільки на кар'єру науковців. Завдяки науковим метрикам формуються рейтинги закладів освіти країн, а також науковий і дослідницький імідж країни. Наукові метрики допомагають вченим і дослідникам визначити, які журнали є впливовими у конкретних наукових галузях і підвищити шанси для успішної публікації своїх досліджень.

КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ І ВИСТАВОК З НКТД

15–18 жовтня 2024	Китай, Пекін	The 3 rd World Congress on Condition Monitoring - WCCM 2023 (3-й Всесвітній конгрес з моніторингу технічного стану)	Chinese Society for NDT and China SEI Institute
15–17 жовтня 2024	Беяни Вроцлавські, Польща	50 th National Conference on NDT (50-а Національна конференція з неруйнівного контролю)	Polish Society for NDT&TD
21–24 жовтня 2024	США, Лас Вегас	ASNT 2024 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
12–14 листопада 2024	Чехія, Бороун	Defectoscopy 2024 (Щорічна конференція Чеського товариства з НК)	Czech Society for NDT
12–14 грудня 2024	Індія, Ченнай	NDE 2024 – 34 th Annual Conference & Exhibition on NDE (Щорічна конференція і виставка з неруйнівної оцінки)	Indian Society for NDT
03–06 березня 2025	Бангалор, Індія	3 rd International Conference on NDE 4.0 (3-я Міжнародна конференція з NDE 4.0)	Indian Society for NDT
9–12 червня 2025	Канада, Онтаріо	Pan-American Conference for Nondestructive Testing (VIII PANNDT) (Панамериканська конференція з неруйнівного контролю)	Canadian Institute for NDE
06–09 жовтня 2025	США, Орlando	ASNT 2025 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
11–14 травня 2026	США, Гаваї	17 th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (17-а Азіатсько-Тихоокеанська конференція з неруйнівного контролю)	American Society for NDT
15–19 червня 2026	Італія, Верона	The 14 th European Conference on Non-Destructive Testing (14 th ECNDT) (14-а Європейська конференція з НК)	Italian Society for NDT



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

ЗАПРОШУЮТЬ СПЕЦІАЛІСТІВ

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

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