

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.)

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;

В.М. Учанін (заст. гол. ред.)

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

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

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар)

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.Л. Казакевич

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

О.М. Карпаш, П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

Й. Мірчев

Інститут механіки, Софія, Болгарія

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський,

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

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

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХП», м. Харків;

М.Г. Чаусов

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко, Міжнародна

Асоціація «Зварювання», м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

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

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

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.

Передплата 2024

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

УЧАНІН В.М., МІНАКОВ С.М., СОЛОМАХА Р.М. Дослідження залишкової намагніченості сталевих конструкцій після локального намагнічування приставним магнітним перетворювачем..... 3

МІЛЕНІН О.С., ВЕЛИКОІВАНЕНКО О.А., РОЗИНКА Г.П., ПІВТОРАК Н.І. Чисельний аналіз закономірностей впливу деградації трубної сталі на надійність кородованих магістральних газопроводів при транспортуванні газово-дневих сумішей 8

НИРКОВА Л.І., ОСАДЧУК С.О., ГОНЧАРЕНКО Л.В., КОСТИН В.А. Дослідження причин руйнування пластинчастого теплообмінника з нержавіючої сталі AISI 316L у водному середовищі 14

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

НЕДОСЄКА С.А., НЕДОСЄКА А.Я., ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А., ОБОДОВСЬКИЙ Б.М., ЕПОВ С.Г. Проведення акустико-емісійного контролю технологічного обладнання з обмеженим доступом 21

НОВОДРАНОВ А.С., ШАПОВАЛОВ Є.В. Автоматизовані системи візуального контролю поверхневих дефектів тонколистових матеріалів (Огляд) 32

ТРОЇЦЬКИЙ В.О., ГЛУХОВСЬКИЙ В.Ю., ЛИТВИНЕНКО В.А. Причинні фактори та похибки, що впливають на достовірність оцінки теплофізичних і геометричних параметрів дефектів промислових об'єктів та виробів 41

ІНФОРМАЦІЯ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона – сьогодні та погляд у майбутнє 45

Виставка «RAILWAY INTERCHANGE 2023» 50

Новини Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики 51

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

L.M. LOBANOV (Editor-in-Chief),

V.O. Troitskyi (Deputy Editor-in-Chief)

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv;

V.M. Uchanin (Deputy Editor-in-Chief),

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv;

Ie.O. Davydov, O.S. Milenin, S.A. Nedoseka, Yu.M. Posypaiko,

I.Yu. Romanova (execut. secretary)

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv;

Krzysztof Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland;

Janez Grum

University of Ljubljana, Slovenia;

M.L. Kazakevich

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of NAS

of Ukraine, Kyiv;

O.M. Karpash, P.M. Raiter

Ivano-Frankivsk NTU of Oil and Gas, Ukraine;

Yordan Mirchev

Institute of Mechanics, Sofia, Bulgaria

L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk, V.R. Skalskyi,

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;

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 Director – O.T. Zelnichenko, International

Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine,

International Association «Welding» (Publisher)

Address

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.

Certificate of state registration

of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2024

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

UCHANIN V.M., MINAKOV S.M., SOLOMAKHA R.M.
Research of the residual magnetization of steel structures
after local magnetization with an attachable magnetic transducer... 3

MILENIN O.S., VELYKOIVANENKO O.A., ROZYNKA G.P.,
PIVTORAK N.I. Numerical analysis of the regularities of
the influence of pipe steel degradation on the reliability
of corroded main gas pipelines used for transportation of
gas-hydrogen mixtures 8

NYRKOVA L.I., OSADCHUK S.O., HONCHARENKO L.V.,
KOSTIN V.A. Investigations of the causes for damage in a
plate heat exchanger from stainless steel AISI 316L in a food
industry enterprise 14

INDUSTRIAL

NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A.Ya., YAREMENKO M.A.,
OVSIENKO M.A., OBODOVSKYI B.M., EPOV S.G.
Conducting acoustic emission testing of technological equip-
ment with limited access..... 21

NOVODRANOV A.S., SHAPOVALOV E.V. Automated visual
control systems for surface defects in thin-sheet materials
(Review)..... 32

TROITSKYI V.O., GLUKHOVSKYI V.Yu., LITVYNENKO V.A.
Causal factors and errors affecting the reliability of
assessment of thermophysical and geometric parameters of
defects of industrial facilities and products 41

INFORMATION

The E.O. Paton Electric Welding Institute – the present and a
look into the future 45

«RAILWAY INTERCHANGE 2023» exhibition 50

News of the Ukrainian society for non-destructive testing 51

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»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ НАМАГНІЧЕНОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІСЛЯ ЛОКАЛЬНОГО НАМАГНІЧУВАННЯ ПРИСТАВНИМ МАГНІТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

В.М. Учанін¹, С.М. Мінаков², Р.М. Соломаха³

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5.

E-mail: vuchanin@gmail.com

²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37.

E-mail: minakovsergey61@gmail.com

³СМ DIAGNOSTICS sp. z o.o., ul. Przemiaraki 23, lokal 8, Krakow, Poland. E-mail: rsolomak@gmail.com

Висвітлено загальну проблему залишкової намагніченості сталевих виробів і характерний випадок її утворення після циклічного перемагнічування приставним магнітним перетворювачем в процесі магнітного структурного аналізу за параметрами петлі магнітного гістерезису. Наголошено важливість достовірного оцінювання залишкової намагніченості, у тому числі для контролю якості розмагнічування сталевих виробів. Представлено методику визначення залишкової намагніченості та оцінювання якості процедур розмагнічування сталевих виробів шляхом вимірювання залишкового магнітного поля. Досліджено залишкову намагніченість зразків зі сталі типу 09Г2С після проведення вимірювань параметрів петлі магнітного гістерезису за допомогою магнітного аналізатора типу КРМ-Ц-МА залежно від кількості циклів намагнічування та її розподіл у зоні прикладання приставного магнітного перетворювача. Показано, що за багатократного перемагнічування рівень залишкової індукції у виробах зі сталі типу 09Г2С не перевищує 0,75 мТл, що дозволяє проведення зварювальних робіт без додаткових операцій розмагнічування. Сформульовано задачі подальших дослідження щодо впливу залишкової намагніченості сталевих виробів із різних сталей на їх подальше використання та утворення додаткових заводів під час проведення вихрострумовевого контролю. Показано, що наявність залишкової намагніченості після багатократних вимірювань параметрів петлі магнітного гістерезису не впливає на точність їх повторного вимірювання, що підтвердило стійкість процедури вимірювань магнітним аналізатором типу КРМ-Ц-МА щодо створеної ним залишкової намагніченості. Бібліогр. 16, рис. 3.

Ключові слова: залишкова намагніченість, магнітний структурний аналіз, приставний магнітний перетворювач, параметри петлі магнітного гістерезису, розмагнічування

Вступ. Стан проблеми. Під час проведення магнітного та вихрострумовевого контролю конструкцій із феромагнітних матеріалів часто використовують намагнічування, у тому числі до стану технічного насичення. Після припинення дії зовнішнього магнітного поля матеріал зберігає певний стан намагніченості, який характеризують як залишкову намагніченість. У техніці іноді використовують термін «залишкова магнітна індукція», хоча за точнішого розгляду ці характеристики відрізняються на магнітну постійну. Залишкова намагніченість залежить як від магнітних властивостей матеріалу, так і від попереднього впливу на нього магнітного поля. Крім того, залишкова намагніченість виробів суттєво залежить від їх форми через дію розмагнічувального фактору, а також від дії механічних напружень і деформацій. Тому відповідні зміни залишкового магнітного поля на поверхні об'єкта контролю із феромагнітних сталей використовуються для їх діагностики [1].

Неприпустимо високий рівень залишкової намагніченості утворюється, зокрема, після про-

ведення магнітопорошкової дефектоскопії, що викликає необхідність проведення додаткових операцій розмагнічування [2, 3]. Необхідність розмагнічування є особливо актуальною для деталей і елементів конструкцій із легованих сталей, які характеризуються високим рівнем залишкової магнітної індукції. Через це усі інструкції з магнітопорошкового контролю передбачають проведення обов'язкових операцій розмагнічування деталей. Залишкова намагніченість локальної зони сталевих конструкцій може утворюватися також внаслідок циклічного перемагнічування до стану технічного насичення приставними магнітними перетворювачами (МП) у процесі проведення магнітного структурного аналізу на основі вимірювання параметрів петлі магнітного гістерезису (ПМГ) [4–8]. На це довгий час не звертали достатньої уваги та рівень залишкової намагніченості після магнітної структуроскопії не досліджували.

Високий рівень залишкової намагніченості негативно впливає, зокрема, на якість зварних конструкцій через порушення оптимальних умов

В.М. Учанін – <http://orcid.org/0000-0001-9664-2101>, С.М. Мінаков – <http://orcid.org/0000-0001-8607-4120>

© В.М. Учанін, С.М. Мінаков, Р.М. Соломаха, 2024

зварювання. Залишкова намагніченість сталевих конструкцій є причиною нестабільної зварювальної дуги та її відхилення, що може призвести до утворення пор і непроварів. Крім того, залишкова намагніченість сталевих виробів впливає на якість їх механічної обробки через налипання стружки. Відомо, що рівень магнітного поля на торцях труб після магнітної дефектоскопії досягає 25 мТл. Але цей рівень може суттєво (до 120 мТл) зростати після стикування торців труб для наступного зварювання. При цьому рівень залишкового магнітного поля у зварювальному зазорі, за якого можливе якісне зварювання, не може перевищувати 6...8 мТл. Але краще, коли магнітне поле на торцях труб не перевищує 1,5 мТл, що вимагає якісного та контрольованого розмагнічування [9]. Крім того, залишкова намагніченість впливає на якість механічної обробки через налипання стружки.

Залежно від форми та розмірів деталі, розмагнічування може здійснюватися такими найрозповсюдженішими способами: 1) шляхом просування деталі через соленоїд, що живиться змінним струмом, та віддалення її на відстань, що дорівнює п'яти діаметрам (діагоналям) соленоїда; 2) зменшенням до нуля змінного струму в соленоїді з введеним у нього виробом, що розмагнічується (довжина соленоїда при цьому повинна бути більше довжини деталі); 3) шляхом віддалення деталі від електромагніту, що живиться змінним струмом (або відводячи електромагніт від деталі); 4) зменшенням до нуля змінного струму в електромагніті, в міжполюсній зоні якого знаходиться ділянка деталі, що розмагнічується. Провідні компанії пропонують спеціальні пристрої для розмагнічування феромагнітних виробів. Зокрема, в пристрої розмагнічування прутків і труб типу EMAG M (виробник – Institut Dr. Foerster GmbH, Німеччина) використано прохідні котушки, які живляться змінним магнітним полем промислової частоти, що обмежує можливість розмагнічування виробів діаметром і товщиною стінки понад 30 і 5 мм відповідно [10]. Кращі характеристики має пристрій розмагнічування EMAG F, який забезпечує розмагнічування прутків діаметром понад 240 мм та труб з товщиною стінки понад 25 мм. У цьому пристрої використано соленоїд з двома котушками розмагнічування, частота змінного магнітного поля в яких регулюється у діапазоні 5...100 Гц [10]. Відома низка публікацій, що стосуються розробки вдосконалених методів розмагнічування феромагнітних вузлів і конструкцій [9, 11–14]. При цьому для контролю якості розмагнічування часто рекомендують малоінформативний спосіб з використанням дрібних феромагнітних деталей [3]. Достовірнішими є методики контролю якості розмагнічування, коли за допомогою приладів вимірювання магнітного поля проводять кількісний аналіз розподілу залишкового магнітного поля на поверхні конструкції [9, 11].

Метою роботи є аналіз впливу намагнічування під час проведення магнітного структурного аналізу приставним МП на залишкову намагніченість зразків і точність вимірювання магнітних параметрів.

Методика експерименту, зразки та дослідницька апаратура. Залишкову намагніченість у локальній зоні зразків створювали за допомогою П-подібної системи намагнічування приставного МП з комплекту магнітного аналізатора КРМ-Ц-МА (рис. 1, а), розробленого НВФ «Спеціальні наукові розробки» (Харків) [4–7]. Приставний МП з узагальненою схемою магнітного аналізатора подано на рис. 1, б, де: 1 – П-подібне осердя; 2 – обмотки перемагнічування; 3 – давач Холла для вимірювання магнітного потоку в магнітному колі; 4 – об'єкт контролю; 5 – схема керування, вимірювання та індикації; 6 – схема формування струмів обмотки приставного МП; 7 – схема вимірювання магнітного потоку.

Дослідницькі зразки розмірами 460,0×60,0×4,0 мм (рис. 1, а) виготовлено у вигляді пластин з низьковуглецевої сталі типу 09Г2С (німецькі аналоги – 13Mn6 або 9MnSi5), хімічний склад якої відповідно до ДСТУ 8541:2015 (%): ≤ 0,12 С; 0,5...0,8 Si; 1,3...1,7 Mn; ≤ 0,3 Ni; ≤ 0,04 S; ≤ 0,035 P; ≤ 0,3 Cr; ≤ 0,12 N; ≤ 0,12 Cu. Досліджувана сталь широко використовується, зокрема, для виготовлення труб для транспортування нафти та газу.

Вимірювання вертикальної складової залишкового магнітного поля на поверхні зразків проводили за допомогою універсального мілітесламетра типу МТУ-1 (НВФ «Спеціальні наукові розробки») з магніточутливим перетворювачем на основі давача Холла (рис. 1, в), який на межі виміру 20 мТл забезпечує вимірювання магнітного поля з похибкою 3 %.

Для створення залишкової намагніченості МП магнітного аналізатора встановлювали на поверхню зразка, після чого проводили послідовно 15 циклів вимірювання параметрів ПМГ. Оцінювання залишкової намагніченості зразків проводили шляхом вимірювання залишкового магнітного поля H_r на поверхні зразка після 1, 3, 6, 8, 12 і 15 циклів вимірювання в 5-х зонах зразка відносно полюсів П-подібної системи намагнічування приставного МП (рис. 2, а), де: центр МП і центри полюсів позначено літерами А, В і С відповідно, а бокові зони позначено літерами Е і D. Вимірювання розподілу вертикальної складової залишкового магнітного поля H_r на поверхні зразків проводили за схемою на рис. 2, б. Пунктирними лініями на рис. 2 позначено місця установки полюсів МП. Після 15-ти циклів вимірювання параметрів ПМГ проведено розмагнічування зразка шляхом повільного введення його в котушку розмагнічування та наступного виведення. Котушку розмагнічування виконано у вигляді 560-ти витків емаль-проводу діаметром 0,95 мм, з зовнішнім і внутрішнім діаметром 200 і 170 мм відповідно, та заввишки 46 мм. Опір котушки

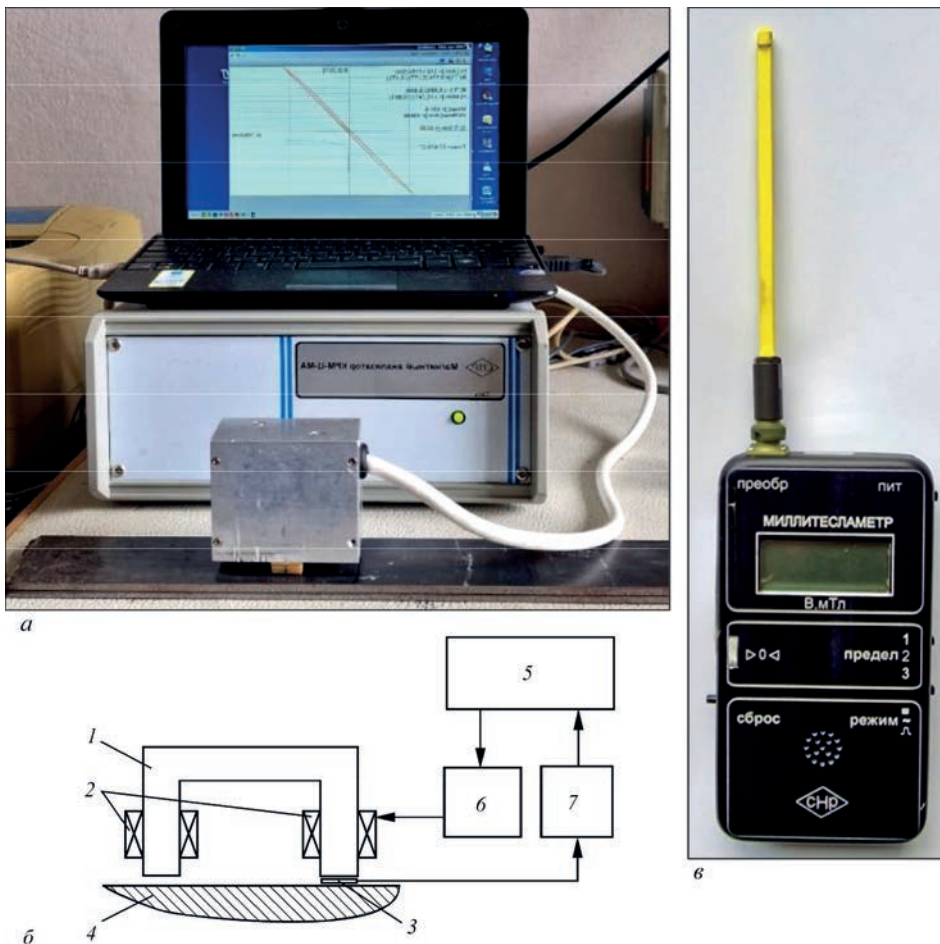


Рис. 1. Магнітний аналізатор типу КРМ-Ц-МА з приставним МП на досліджуваному зразку (а), конструкція приставного МП з узагальноною схемою магнітного аналізатора (б), універсальний мілітесламетр типу МТУ-1 (в)

розмагнічування на постійному струмі складає 9 Ом. Котушку розмагнічування підключали до стандартної мережі 220 В, що створювало в її центрі змінне електромагнітне поле розмагнічування величиною 34,5 мТл частотою 50 Гц.

Крім того, для визначення впливу залишкової намагніченості на точність вимірювання проводили також вимірювання параметрів ПМГ після циклів вимірювання без зміщення положення МП на зразку. Отримані значення порівнювали зі значеннями коерцитивної сили зразків у стані постачання та після розмагнічування.

Аналіз результатів. Залежність залишкового магнітного поля H_r на поверхні зразка у зонах А (×), В (●), С(○), D (▲) і E(▼) прикладання МП

(рис. 2, а) від кількості циклів вимірювання N наведено на рис. 3, а. Видно, що залишкове магнітне поле H_r на поверхні зразка в центральній і бічних зонах накладання МП близьке до нуля, що очікувалось, враховуючи нульове значення вертикальної складової первинного магнітного поля у цих зонах. Значення вертикальної складової залишкової магнітної індукції H_r зразка по центрам розташування полюсів МП (зони В і С) мають різний знак і поступово зростають зі збільшенням кількості циклів вимірювання N . Але вже після 6-ти циклів вимірювання залишкове магнітне поле H_r на поверхні зразка наближається до максимального значення і далі зі збільшенням кількості циклів вимірювання ($N > 9$) практично не змінюється.

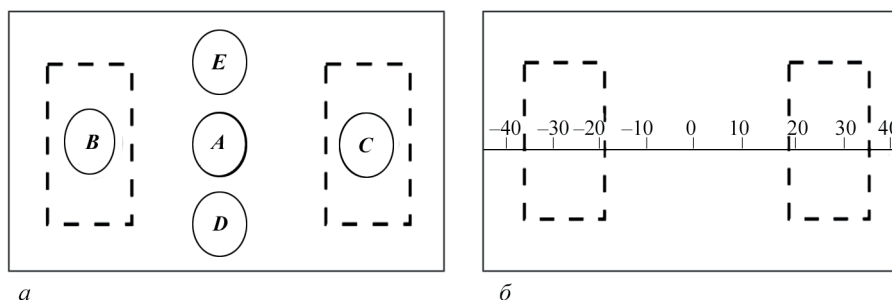


Рис. 2. Зони вимірювання залишкової магнітної індукції в зоні дії МП (а) та схема вимірювання розподілу залишкової магнітної індукції (б)

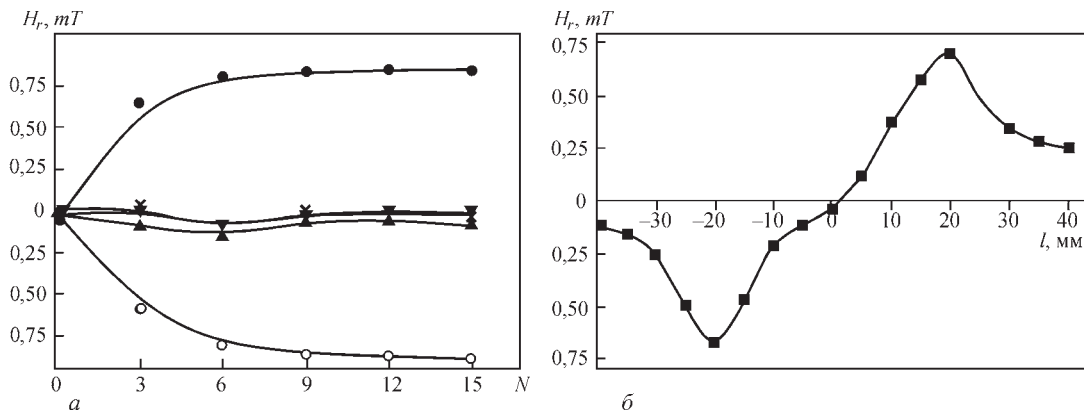


Рис. 3. Зміни вертикальної складової залишкової магнітного поля H_r в зоні дії МП від кількості циклів намагнічування зонах А (×), В (●), С (○), D (▲) і Е (▼) (а) та її розподіл в зоні дії МП після 3-х циклів вимірювання (б)

Розподіл вертикальної складової залишкового магнітного поля H_r зразка після 3-х циклів вимірювання (рис. 3, б) показує наявність двох максимумів різного знаку, що відповідають центрам розташування магнітних полюсів МП. При цьому, навіть за багатократного намагнічування, рівень залишкового магнітного поля H_r у зразках зі сталі типу 09Г2С не перевищує 0,75 мТл, що дозволяє проведення зварювання конструкцій із цієї сталі без проведення додаткових операцій розмагнічування, коли оптимальним вважається рівень залишкового магнітного поля менше 1,5 мТл [9]. Але це не означає, що подібний висновок можна зробити щодо інших сталей, особливо тих, що характеризуються більшими значеннями коерцитивної сили. Крім того, це не означає, що навіть такий незначний рівень залишкового магнітного поля не буде впливати на подальшу роботу сталевих виробів, наприклад, через налипання металевої стружки, або не буде створювати суттєві завади, які часто обмежують можливість вихрострумової дефектоскопії феромагнітних сталей без стабілізаційного підмагнічування [15]. Тож додаткові дослідження у цих напрямках також доречні.

Результати повторних вимірювань параметрів ПМГ зразків з різною залишковою намагніченістю показали, що вона не впливала на точність вимірювання, що підтвердило стійкість процедури вимірювань магнітним аналізатором типу КРМ-Ц-МА. У той же час слід зазначити, що створений рівень залишкової намагніченості може суттєвіше впливати на покази вимірювань параметрів динамічної МПГ локальним МП, де використано суттєво менші значення первинного магнітного поля [16].

За необхідності зменшення залишкової намагніченості після проведення магнітного структурного аналізу нами запропоновано ввести в цикл вимірювання параметрів ПМГ додаткову операцію розмагнічування за допомогою серії імпульсів різнополярного змінного магнітного поля, амплітуда яких загасає до нульового значення (Учанін В.М., Соломаха Р.М. Спосіб визначення магнітних та механічних характеристик феромагнітних матеріалів та моніторингу технічного стану конструкцій. Патент

України № 154135. Опубл. 11.10.2023, Бюл. 41). Для зменшення похибки вимірювань параметрів ПМГ також пропонується на зону контролю діяти імпульсами змінного магнітного поля до проведення вимірювального циклу намагнічування. Імпульси різнополярного змінного магнітного поля, амплітуда якого загасає до нуля, можна створювати обмотками електромагніту П-подібного МП, якими реалізують цикл вимірювання параметрів ПМГ.

Висновки

1. Висвітлено загальну проблему залишкової намагніченості сталевих виробів і характерний випадок її утворення після циклічного перемагнічування приставним МП в процесі магнітного структурного аналізу за параметрами ПМГ. Наголошено важливість достовірного оцінювання залишкової намагніченості, у тому числі для контролю якості розмагнічування сталевих виробів. Представлено методику визначення залишкової намагніченості та оцінювання якості процедур розмагнічування сталевих виробів шляхом вимірювання залишкового магнітного поля.

2. Досліджено залишкову намагніченість зразків зі сталі типу 09Г2С після проведення вимірювань параметрів ПМГ за допомогою магнітного аналізатора типу КРМ-Ц-МА залежно від кількості циклів намагнічування та її розподіл у зоні прикладання приставного МП. Показано, що за багатократного перемагнічування, рівень залишкової індукції у виробках зі сталі типу 09Г2С не перевищує 0,75 мТл, що дозволяє проведення зварювальних робіт без проведення додаткових операцій розмагнічування.

3. Сформульовано задачі подальших досліджень щодо впливу залишкової намагніченості сталевих виробів із різних сталей на їх подальше використання та утворення додаткових завад під час проведення вихрострумового контролю.

4. Показано, що наявність залишкової намагніченості після багатократних вимірювань параметрів ПМГ не впливає на точність їх повторного вимірювання, що підтвердило стійкість процедури вимірювань магнітним аналізатором типу КРМ-Ц-МА щодо створеної ним залишкової намагніченості.

Список літератури/References

- Roskosz, M, Bieniek, M. (2012) Evaluation of residual stress in ferromagnetic steels based on residual magnetic field measurements. *NDT& E International*, 45(1), 55–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.09.007>
- Осташ О.П., Федірко В.М. (2007) *Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідниковий посібник*, Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій. Львів, Сполом.
- Ostash, O.P., Fedirko, V.M. (2007) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. Book*, Vol. 9: *Strength and service life of aircraft materials and structure elements*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
- Куп Ю., Протасов А., Шапенко В. та ін. (2012) *Магнітний неруйнівний контроль*. Київ, НТУУ «КПІ».
- Kuts, Yu., Protasov, A., Tsapenko, V. et al. (2012) *Magnetic non-destructive testing*. Kyiv, NTUU KhPI [in Ukrainian].
- Безлюдько Г. (2003) Эксплуатационный контроль установочного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом. *Техн. диагн. и неразр. контроль*, 2, 20–26.
- Bezlyudko, G. (2003) Operational control of fatigue condition and residual life of metal structures by nondestructive (coercimetric) method. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 20–26 [in Russian].
- Лобанов Л.М., Бондаренко А.Ю., Бондаренко Ю.К. (2004) Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитиметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса. *Техн. диагн. и неразруш. контроль*, 1, 3–8.
- Lobanov, L.M., Bondarenko, A.Yu., Bondarenko, Yu.K. (2004) Evaluation of welded joints of structures by magnetic (coercimetric) for forecasting individual residual life. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 3–8 [in Russian].
- Безлюдько Г.Я. (2004) Практика оценки состояния сварных швов по измерениям магнитной характеристики коэрцитивной силы металла. *Техн. диагн. и неразруш. контроль*, 1, 20–22.
- Bezlyudko, G.Ya. (2004) Practical evaluation of the condition of welds by measuring the magnetic characteristic – coercive force of the metal. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 20–22 [in Russian].
- Uchanin, V., Ostash, O., Nardoni, G., Solomakha, R. (2020) *Coercive Force Measurements for Structural Health Monitoring. The Fundamentals of Structural Integrity and Failure* (Ed. R.M. Wilcox), Nova Science Publishers, New York, USA, 163–192.
- Рибачук В.Г., Учанін В.М. (2021) Коерцитивна сила двохшарових ферромагнітних матеріалів. *Відбір і обробка інформації*, 49(125), 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2021.49.003>
- Rybachuk, V.G., Uchanin, V.M. (2021) Coercive force of two-layer ferromagnetic materials. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, 49(125), 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2021.49.003> [in Ukrainian].
- Добродеев П.Н. (2014) Исследование методов размагничивания торцов труб при ремонтах магистральных трубопроводов. *Электротехника и электромеханика*, 3, 50–54.
- Dobrodeev, P.N. (2014) Study of methods of demagnetization of pipe ends in repair of main pipelines. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 3, 50–54 [in Russian].
- <https://www.foerstergroup.com/en/usa/products/emag/>
- Розов В., Пилюгина О., Лупиков В. и др. (2006) Введение в демагнетизацию технических объектов. *Электротехника и электромеханика*, 4, 55–59.
- Rozov, V., Pilyugina, O., Lupikov, V. et al. (2006) Introduction into demagnetization of technical objects. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 4, 55–59 [in Russian].
- Волохов С.А., Добродеев П.Н., Мамин Г.И. (2012) Комплексная демагнетизация труб при электродуговой сварке. *Технічна електродинаміка*, 4, 19–24.
- Volokhov, S.A., Dobrodeyev, P.N., Mamin, G.I. (2012) Integrated demagnetization of pipes in electric arc welding. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 4, 19–24 [in Russian].
- Oxley, P. (2009) Apparatus for magnetization and efficient demagnetization of soft magnetic materials. *IEEE Transactions on magnetics*, 45(9), 3274–3283.
- Shelikhov, G.S. (2010) Experience in the demagnetization of large objects. *Rus. J. of Nondestr. Testing*, 46(5), 315–323.
- Deng, Z., Yu, Z., Yuan, Z. et al. (2022) Mechanism of Magnetic Permeability Perturbation in Magnetizing-Based Eddy Current Nondestructive Testing. *Sensors*, 22, 2503. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22072503>
- Мінаков С.М., Учанін В.М., Мінаков А.М. та ін. (2023) Визначення параметрів динамічної петлі магнітного гістерезису конструкційних матеріалів приставними первинними перетворювачами. *Відбір і обробка інформації*, 51(127), 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2023.51.012>
- Minakov, S.M., Uchanin, V.M., Minakov, A.M. et al. (2023) Determining the parameters of the dynamic magnetic hysteresis loop of the structural materials by attachable primary transducers. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, 51(127), 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2023.51.012>

RESEARCH OF THE RESIDUAL MAGNETIZATION OF STEEL STRUCTURES AFTER LOCAL MAGNETIZATION WITH AN ATTACHABLE MAGNETIC TRANSDUCER

V.M. Uchanin¹, S.M. Minakov², R.M. Solomakha³

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

²NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: minakovsergey61@gmail.com

³CM DIAGNOSTICS sp. z.o.o., ul. Przemiarcki 23, lokal 8, Krakow, Poland. E-mail: rsolomak@gmail.com

The general problem of residual magnetization of steel products and a typical case of its formation after cyclic magnetization by an attachable type magnetic transducer in the process of magnetic structural analysis by hysteresis loop parameters determination is highlighted. The importance of reliable assessment of residual magnetization, including for quality control of demagnetization of steel products, is emphasized. The method of determining the residual magnetization and evaluating the quality of the demagnetization procedures of steel products by measuring the residual magnetic field is presented. Residual magnetization of 09G2C type steel specimen after hysteresis loop parameters measuring using a magnetic analyzer of the KRM-Ts-MA type depending on the number of magnetization cycles and its distribution in the area of application of the attachable type magnetic transducer was investigated. It is shown that after multiple magnetization, the level of residual induction in 09G2C type steel products does not exceed 0,75 mT, which allows welding without additional demagnetization operations. The tasks of further research on the influence of residual magnetization of steel products made of different steels on their further use and the formation of additional noise during eddy current testing are formulated. It was shown that the presence of residual magnetization after multiple measurements of hysteresis loop parameters does not affect the accuracy of their repeated measurement, which confirmed the stability of the measurement procedure with a KRM-Ts-MA type magnetic analyzer with respect to the residual magnetization created by it. 16 Ref., 3 Fig.

Keywords: residual magnetization, magnetic structural analysis, attachable magnetic transducer, parameters of the magnetic hysteresis loop, demagnetization

Отримано 03.01.2024

Отримано у переглянутому вигляді 14.01.2024

Прийнято 12.03.2024

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ ДЕГРАДАЦІЇ ТРУБНОЇ СТАЛІ НА НАДІЙНІСТЬ КОРОДОВАНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

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

Одним із перспективних шляхів використання вітчизняної газотранспортної системи в умовах стрімкого переходу до економіки сталого розвитку є транспортування нею сумішей природного газу та зеленого водню. Для безпечного використання існуючих магістральних газопроводів при транспортуванні газоводневих сумішей різного складу необхідно врахувати негативний вплив водню на механічні властивості металу труб, зокрема при оцінці їх технічного стану за результатами дефектоскопії. У рамках даної роботи досліджено закономірності безпеки експлуатації трубопроводів з виявленими дефектами локальної корозійної втрати металу. Для цього розроблено чисельну методологію оцінки крихкої міцності на основі скінченно-елементного моделювання напруженого стану та критеріїв крихко-в'язкого руйнування. Показано, що в умовах статичного навантаження деградація опірності крихкому руйнуванню металу трубопроводу з виявленим дефектом локальної втрати металу відносно невелика та може бути компенсована зміною експлуатаційного навантаження. В умовах циклічного навантаження внутрішнім тиском продемонстровано закономірності зниження несучої здатності кородованого трубопроводу в залежності від фактичної опірності крихкому руйнуванню трубною сталі. Бібліогр. 18, рис. 6.

Ключові слова: газоводнева суміш, магістральний газопровід, локальна корозійна втрата металу, воднева деградація, технічний стан, крихке руйнування, циклічне навантаження

Вступ. Одним з найбільш інтенсивно зростаючих секторів сучасної енергетики є виробництво та застосування зеленого водню як екологічної альтернативи викопним вуглеводням. Зокрема це відображено у Водневій стратегії Європейського Союзу, а також в аналогічних документах інших країн, де планується максимальне впровадження водню для промислових, транспортних чи побутових потреб, що є складовою трансформації світової економіки згідно з принципами сталого розвитку [1–3]. Тут важливо підкреслити, що водень виступає не як власне паливо, але як енергоносіє від відновлювальних джерел енергії (сонячних, вітрових чи гідроелектростанцій, геотермальних джерел тощо) або як сировина (для хімічної промисловості). Тому однією з ключових задач при реалізації подібних підходів для зеленої енергетики є транспортування газоподібного водню. Побудова нової системи трубопроводів для цих потреб є масштабним і коштовним інфраструктурним проектом. Тому раціональним є використання існуючих газотранспортних систем (ГТС). Проте відомо про негативний вплив дифузійного водню на експлуатаційні властивості конструкцій з трубних сталей, що викликано водневою деградацією металу [4, 5]. Тому безпосереднє використання магістральних і розподільчих трубопроводів для транспортування чистого водню об'єктивно ускладнене.

В якості одного з практично можливих шляхів використання існуючої газотранспортної мережі для потреб водневої енергетики розглядається та поступово впроваджується транспортування сумішей природного газу та зеленого водню [6]. У залежності від складу суміші, тобто від парціального тиску водню, передбачається різний рівень необхідних додаткових технологічних заходів для підтримки роботоздатності окремих компонентів ГТС. Перш за все, це стосується вибору припустимих режимів експлуатації, порядку планування заходів з контролю технічного стану та експертної оцінки надійності. Однією з типових задач є оцінка припустимості експлуатаційних аномалій геометрії трубопроводу, що виявляються засобами неруйнівного контролю в процесі періодичної дефектоскопії. При суттєвому наводненні металу дефектного трубопроводу застосування стандартизованих методик оцінки статичної міцності може бути обмеженим, зокрема, в результаті зміни превалюючих механізмів мікроскопічного та макроскопічного руйнування, які визначають умови граничного стану конструкції. Так, при аналізі припустимості тріщиноподібних дефектів трубопроводів (чи аномалій, що формально схематизуються як тріщини, наприклад неметалеві включення, риси, канавки, непровари зварних швів тощо) граничний стан конструкцій під

дією експлуатаційного навантаження визначається опірністю матеріалу крихкому руйнуванню [7]. Тому при оцінці технічного стану трубопроводів з тріщиноподібними аномаліями необхідно враховувати зміну значень в'язкості руйнування матеріалу K_{lc} і характеристики міцності, що входять до відповідних критеріїв граничного стану. У разі аналізу припустимості тривимірних несучільностей матеріалу, серед яких найпоширенішими є локальні корозійні втрати металу, граничний стан трубопроводу прийнято визначати за критеріями в'язкого руйнування [8]. Але при суттєвому окрихчуванні металу механізми зародження та розвитку руйнування металу в області аномалії може змінитися на крихко-в'язкий чи крихкий. Тому в залежності від складу транспортованої газоводневої суміші (та відповідної насиченості металу трубопроводу дифузійним воднем) стандартні критерії граничного стану можуть бути обмежено застосовними.

Метою даної роботи є визначення закономірностей впливу ступеня водневої деградації трубної сталі (зміни в'язкості руйнування та опірності втомному руйнуванню) на граничний стан магістрального газопроводу з виявленою геометричною аномалією локальної поверхневої корозійної втрати металу за крихко-в'язкого механізму руйнування. Для цього запропоновано чисельну методику оцінки напружено-деформованого та граничного станів кородованих трубопроводів на основі методу постульованих дефектів.

Як вже зазначалося вище, одним із найпоширеніших видів експлуатаційного пошкодження підземних магістральних трубопроводів є локальні корозійні втрати металу в області порушення захисної ізоляції. Подібні геометричні аномалії прийнято схематизувати як напівеліптичні поверхневі стоншення стінки труби (рис. 1). Наявність геометричної аномалії зумовлює локальну неоднорідність напружень у перерізі труби під дією внутрішнього тиску та відповідну неоднорідність схильності матеріалу до зародження руйнування. Згідно з загальними уяв-

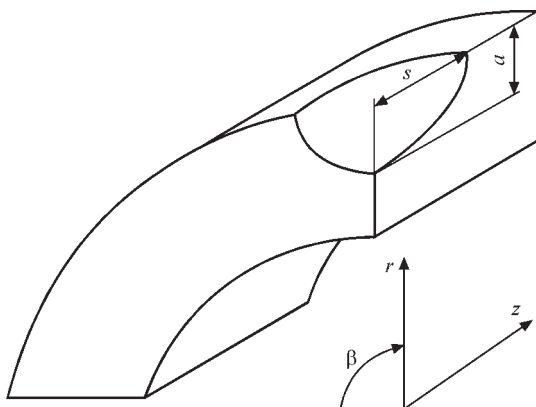


Рис. 1. Схема трубопроводу з поверхневим дефектом корозійного стоншення стінки

леннями, граничний стан посудин тиску з тривимірними дефектами несучільності металу визначається в'язким механізмом руйнування, який полягає в зародженні та розвитку мікроскопічної пористості при пластичному деформуванні матеріалу під дією зовнішнього навантаження [9]. Проте в разі значного наводнення матеріалу трубопроводу при транспортуванні газоводневих сумішей суттєвішим є крихкий механізм руйнування, особливо при наявності зародків тріщин у металі.

Для визначення закономірностей впливу ступеня водневої деградації трубної сталі на крихку міцність труби в неоднорідному полі механічних напружень раціональним є використання методів чисельного моделювання поряд із відповідними критеріями граничного стану. Так, у рамках цієї роботи чисельний аналіз проводився на основі скінченно-елементної моделі пружно-пластичного суцільного середовища шляхом постановки та розв'язання відповідної крайової задачі за допомогою програмного комплексу WeldPrediction [10]. Приріст компонентів тензора деформації розглядався як сума приростів $d\epsilon_{ij}^e$ пружних і пластичних $d\epsilon_{ij}^p$ складових, $i, j = r, \beta, z$ (рис. 1):

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p. \quad (1)$$

Подальший аналіз напружено-деформованого стану дефектного трубопроводу при збільшенні внутрішнього тиску проводився шляхом простеження накопичення та перерозподілу деформації при поступовому збільшенні навантаження. Під час кожного кроку простеження зв'язок між компонентами тензорів напружень (σ_{ij}) і деформацій (ϵ_{ij}) визначався за допомогою узагальненого закону Гука та асоційованого закону пластичної течії [11]:

$$\Delta\epsilon_{ij} = \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m) + \delta_{ij}K\sigma_m - \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m)^* + (K\sigma_m)^*, \quad (2)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера, $K = (1-2\nu)/E$, $G = 0,5E/(1+\nu)$; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; індекс «*» відносить змінну до попереднього кроку простежування за кроком навантаження; Ψ – функція стану металу, яка визначається ітераційно, виходячи з поточної форми поверхні текучості в залежності від інтенсивності напружень σ_i і границі текучості σ_T [11]:

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_T;$$

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_T; \quad (3)$$

стан $\sigma_i > \sigma_T$ неприпустимий.

На кожному кроці простежування умови (3) реалізуються, враховуючи історію пластичного деформування, зокрема деформаційне зміцнення.

Одночасно під час кожної ітерації на Ψ розраховується поле напружень σ_{ij} :

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left(\Delta \varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\Psi - K}{K} \Delta \varepsilon \right) + J_{ij}, \quad (4)$$

де $J_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left[(b_{ij} - \delta_{ij} b) + \delta_{ij} K \sigma^* \right]$, $\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{ii} / 3$, $b = b_{ii} / 3$.

Компоненти тензора напружень задовольняють рівнянню статки для внутрішніх скінченних елементів (СЕ) і граничним умовам для поверхневих СЕ. Для формування системи лінійних алгебраїчних рівнянь для вектора приростів переміщень у вузлах СЕ на кожному кроці простежування та ітерацій по Ψ мінімізується наступний функціонал [11]:

$$L_I = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta \varepsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{\Theta} F_i \Delta U_i \Delta S_P^{m,n,r}, \quad (5)$$

де \sum_V – оператор суми за внутрішніми СЕ; \sum_{Θ} – оператор суми за СЕ по поверхні S_p , на якій задано компоненти силового вектора F_i . Детальний опис рівнянь (1)–(5) та програмну реалізацію їх розв’язання наведено в [12].

Оцінка фактичної надійності трубопроводу в умовах різного ступеня водневого окрихчування матеріалу за неоднорідного поля напружень, викликаного внутрішнім тиском і локальною геометричною аномалією, проводилася методом постульованих дефектів. Цей метод передбачає припущення про наявність невеликих тріщиноподібних дефектів і подальшу оцінку їх допустимості. Для оцінки крихкої міцності кородованих трубопроводів із урахуванням водневої деградації металу для кожного постульованого дефекту коефіцієнт запасу міцності n розраховується на основі відповідного критерію граничного стану для тіла з тріщиною. Зазвичай використовуваним критерієм є процедура R6 [13], яка базується на двопараметричній діаграмі крихко-в’язкого руйнування (рис. 2) і може бути математично описана як:

$$nK_r(L_r) = \begin{cases} \left[1 - 0,14(nL_r)^2 \right] \left\{ 0,3 + 0,7 \exp \left[-0,65(nL_r)^6 \right] \right\}, & \text{при } nL_r \leq L_{r\max} \\ 0, & \text{при } nL_r > L_{r\max}. \end{cases}, \quad (6)$$

де $K_r = K_I / K_{Ic}$, $L_r = \sigma_{\text{ref}} / \sigma_T$; K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень; K_{Ic} – в’язкість руйнування; σ_{ref} – довідкові напруження. Розрахунок K_I і σ_{ref} виконується за алгоритмами, наведеними в [14].

Оцінка коефіцієнта запасу міцності n базувалася на двопараметричній діаграмі (рис. 2) та складалася з розрахунку співвідношення довжин відрізків від початку координат до фактичної точки (K_r, L_r) та її продовження до перетину граничної кривої.

Використання розробленого чисельного підходу при оцінці впливу експлуатаційного наванта-

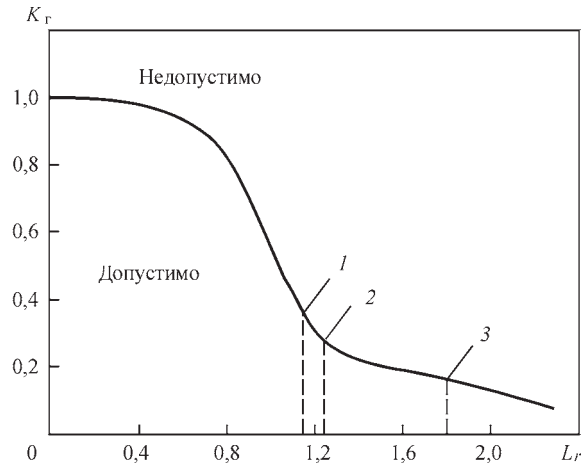


Рис. 2. Двопараметрична діаграма крихко-в’язкого руйнування конструкції з тріщиною [13]: 1 – 1,15 (типові низьколеговані сталі та зварні з’єднання); 2 – 1,25 (типові низьковуглецеві сталі та аустенітні зварні з’єднання); 3 – 1,8 (типові аустенітні сталі)

ження на кородований елемент магістрального газопроводу дозволяє не тільки оцінювати статичну міцність конструкції за різного ступеня водневої деградації, але й враховувати вплив циклічного навантаження внутрішнім тиском у межах припустимих проектних значень. Для цього розраховувалася швидкість втомного зростання постульованих тріщин згідно з законом Паріса. Якщо навантаження характеризується асиметрією циклу з коефіцієнтом R , то закон збільшення розмірів тріщини в залежності від кількості циклів навантаження N може бути сформульований як [15]:

$$\frac{dc}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K_I)^m}{(1-R) - \frac{\Delta K_I}{K_{Ic}}}, \quad (7)$$

де C, m – коефіцієнти Паріса.

Таким чином, втомне збільшення постульованих тріщин в умовах циклічного навантаження трубопроводу з локальним корозійним стоншенням стінки та певним ступенем водневої деградації властивостей металу може бути кількісно оцінено зміною коефіцієнта запасу крихкої міцності n .

Як приклад використання запропонованого підходу в цій роботі розглянуто типову прямолінійну ділянку трубопроводу діаметром $D = 1420$ мм і товщиною стінки $t = 20$ мм, матеріал труби – трубна сталь X80. Було проаналізовано два види експлуатаційного навантаження, а саме: статичний внутрішній тиск газоводневої суміші (максимальне значення $P = 7,5$ МПа) і циклічну зміну внутрішнього тиску в діапазоні 5,5...7,5 МПа, кількістю до 1000 циклів. Фактичні механічні властивості металу трубопроводу залежать від концентрації водню у транспортованій суміші та відповідного рівня деградації. Згідно з наявними даними [16], водень має найсуттєвіший негатив-

ний вплив на стійкість трубної сталі до крихкого руйнування (тобто зміна K_{Ic}) і втомного руйнування (яка кількісно описується змінами коефіцієнтів Паріса C і m). При цьому за об'ємної концентрації водню в суміші до 50 % зміни величини границь міцності та текучості не спостерігається. Для трубних сталей при концентраціях водню в транспортованій суміші 5...20 % коефіцієнти Паріса складають приблизно $C = 2,98 \cdot 10^7$, $m = 2,580$ [17].

Як зазначалося вище, розмір постульованої тріщини є важливим параметром кількісного розрахунку труб на статичну чи втомну міцність. Для розглянутого випадку попередній розрахунок показав, що при розмірі під поверхневої еліптичної тріщини $2,5 \times 0,4$ мм запас міцності труби становить приблизно 1,92. Це консервативно відповідає проектним вимогам для трубопроводу (1,94). Для точного врахування тривимірного напружено-деформованого стану при розрахунку крихкої міцності розглядалися тріщини різної орієнтації відносно осі труби (поздовжні, окружні) і обирався мінімальний запас міцності n в перерізі конструкції.

Розроблений чисельний підхід для визначення запасу крихкої міцності продемонстровано на прикладі характерного дефекту локального корозійного стоншення стінки напівеліптичної форми ($2s = 200$ мм, $a = 4...12$ мм). Проведено порівняння зі стандартизованими алгоритмами оцінки припустимості таких аномалій згідно з вітчизняним стандартом ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 [18]. Цей стандарт базується на аналізі залишкового коефіцієнта запасу міцності трубопроводів із локальною корозійною втратою металу, що робить доцільним порівняння із запропонованими розрахунками. Як показано на рис. 3, кореляція між розробленою методикою та нормативними вимогами є задовільною.

Результати чисельного аналізу впливу ступеня корозійного пошкодження (глибини локаль-

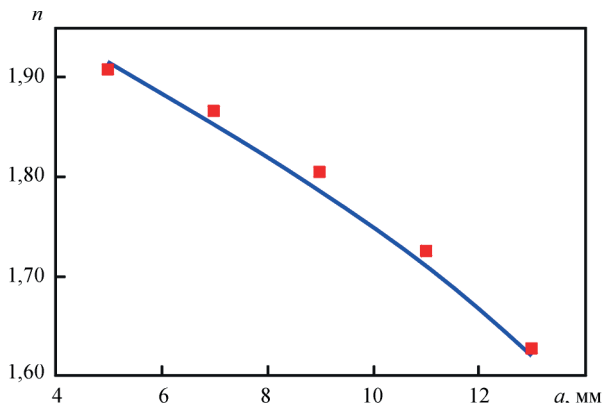


Рис. 3. Порівняння залежності коефіцієнта запасу крихкої міцності n трубопроводу (1420×20 мм) з дефектом локального стоншення стінки ($2s = 100$ мм) від глибини дефекту a за розрахунком методом постульованих тріщин і за [18]: ■ – згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008

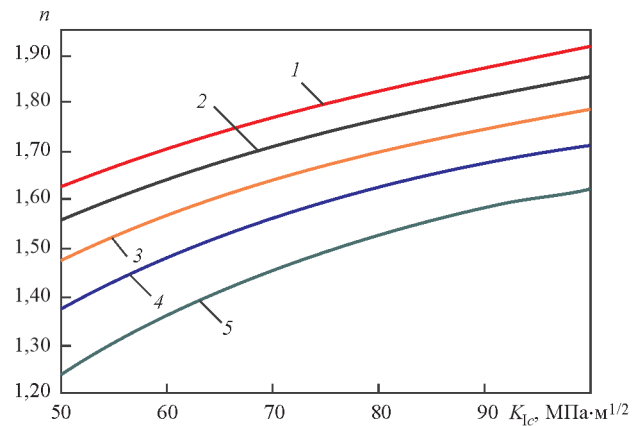


Рис. 4. Залежності крихкої міцності трубопроводу n (1420×20 мм) з локальним стоншенням стінки ($2s = 200$ мм) при тиску $P = 7,5$ МПа від величини в'язкості руйнування K_{Ic} матеріалу та глибини дефекту a , мм: 1 – 4; 2 – 6; 3 – 8; 4 – 10; 5 – 12

ного стоншення стінки) трубопроводу на його надійність за статичного навантаження внутрішнім тиском і при різних значеннях K_{Ic} наведено на рис. 4. З цих даних можна зробити висновок про чутливість запасу крихкої міцності кородованого трубопроводу до фактичної в'язкості руйнування матеріалу за різної глибини дефекту корозійної втрати металу, що необхідно враховувати при аналізі його роботоздатності.

На рис. 5 наведено розрахункові залежності величини опірності крихкому руйнуванню від глибини локального стоншення стінки a для різних значень робочого тиску P у трубопроводі, проектний припустимий запас міцності $n = 1,617$. Ці результати демонструють значний запас міцності кородованих газопроводів при транспортуванні газоводневих сумішей за статичного навантаження: в типових діапазонах робочого тиску $5,5...7,5$ МПа суттєве зниження в'язкості руйнування залишається прийнятним. Таким чином, надійність і безпеку експлуатації кородованого магістрального газопроводу з певним рівнем водневої деградації властивостей матеріалу можна гаранту-

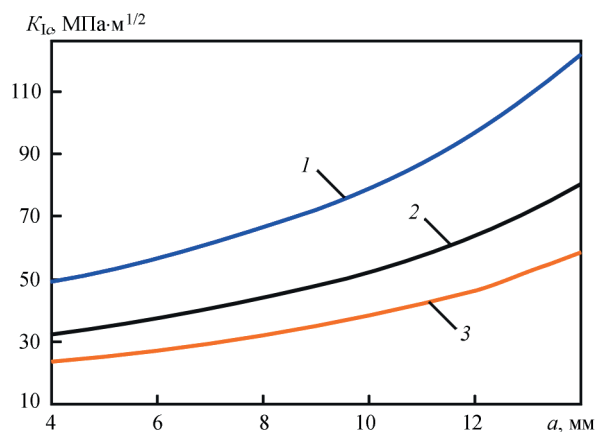


Рис. 5. Залежності гранично допустимої деградації матеріалу трубопроводу (зміни K_{Ic}) від глибини виявленого локального стоншення стінки a і при різних робочих тисках P , МПа: 1 – 7,5; 2 – 6,5; 3 – 5,5

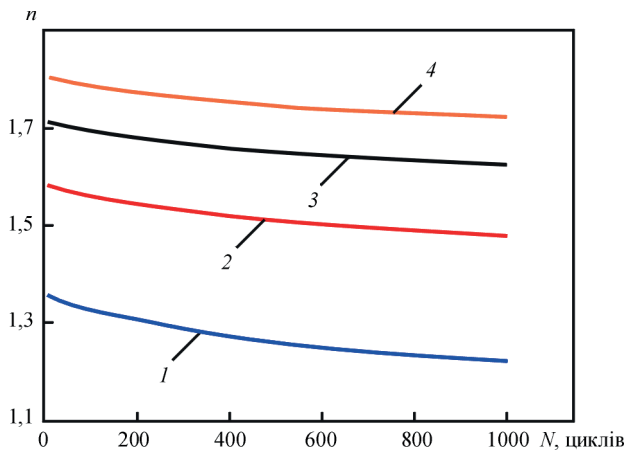


Рис. 6. Залежності коефіцієнта запасу крихкої міцності трубопроводу n (1420×20 мм) з виявленим дефектом локального стоншення стінки ($2s \times a = 200 \times 10$ мм) від кількості циклів зміни внутрішнього тиску з 5,5 до 7,5 МПа та величини в'язкості руйнування K_{Ic} металу труби, МПа·м^{1/2}: 1 – 50; 2 – 75; 3 – 100; 4 – 125

вати шляхом внесення відповідних коригувань до експлуатаційних режимів.

Для випадку циклічного навантаження змінним внутрішнім тиском (у межах проектного діапазону 5,5...7,5 МПа) необхідно додатково враховувати втомне збільшення розміру постульованих тріщин. Як показано на рис. 6, у межах 1000 циклів навантаження зниження мінімального коефіцієнта запасу міцності в перерізі дефектного трубопроводу ($2s \times a = 200 \times 10$ мм) не перевищує 0,2 у залежності від величини в'язкості руйнування K_{Ic} . Тому, в разі якщо конкретний трубопровід має надлишкову проектну міцність, вплив втомного механізму накопичення пошкодження можна не враховувати при оцінці припустимості локальних втрат металу корозійного типу.

Висновки

1. Для прогнозування надійності елементів магістральних трубопроводів з геометричними аномаліями локального корозійного стоншення стінки напівеліптичної форми з урахуванням водневої деградації механічних властивостей матеріалу запропоновано чисельну методологію визначення запасу крихкої міцності. В основу цієї методології покладено скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану трубопроводу та розрахунок коефіцієнта запасу крихкої міцності, який базується на методі постульованих тріщин і двопараметричному критерію крихко-в'язкого руйнування. Проведено порівняння зі стандартизованими алгоритмами оцінки припустимості таких аномалій згідно з вітчизняним стандартом ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008, показано задовільну кореляцію між розробленою методикою та нормативними вимогами.

2. Продемонстровано значний запас міцності кородованих газопроводів при транспортуванні газодовневих сумішей за статичного навантаження: у типових діапазонах робочого тиску 5,5...7,5 МПа зниження в'язкості руйнування K_{Ic} залишається прийнятним. Таким чином, надійність і безпеку експлуатації кородованого магістрального газопроводу з певним рівнем водневої деградації властивостей матеріалу можна гарантувати шляхом внесення відповідних коригувань до експлуатаційних режимів.

3. Для випадку циклічного навантаження змінним внутрішнім тиском у межах експлуатаційного діапазону 5,5...7,5 МПа додатково враховано втомне збільшення розміру постульованих тріщин за законом Паріса. Показано, що в межах 1000 циклів навантаження зниження мінімального коефіцієнта запасу міцності в перерізі дефектного трубопроводу (розмір дефекту стоншення 200×10 мм) не перевищує 0,2 у залежності від фактичної величини в'язкості руйнування K_{Ic} . Тому, в разі якщо конкретний трубопровід має надлишкову проектну міцність, вплив втомного механізму накопичення пошкодження можна не враховувати при оцінці припустимості локальних втрат металу корозійного типу.

Список літератури/References

- Aravindan, M., Praveen Kuma, G. (2023) Hydrogen towards sustainable transition: A review of production, economic, environmental impact and scaling factors. *Results in Engineering*, **20**, 101456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101456>
- Agrawal, D., Mahajan, N., Singh, S.A., Sreedhar, I. (2024) Green hydrogen production pathways for sustainable future with net zero emissions. *Fuel*, **359**, 130131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130131>
- Falcone, P.M., Hiete, M., Sapio, A. (2021) Hydrogen economy and sustainable development goals: Review and policy insights. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, **31**, 100506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100506>
- Zvirko, O. (2022) Anisotropy of hydrogen embrittlement in ferrite-pearlitic steel considering operational degradation. *Procedia Structural Integrity*, **42**, 522–528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.066>
- Huakun, W., Tongyao, W., Sheng, Y. et al. (2024) Ductile burst behavior of high pressure X100 steel pipe considering hydrogen damage. *Int. J. of Hydrogen Energy*, **58**, 362–379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.106>
- Cakir Erdener, B., Sergi, B., Guerra, O.J. et al. (2023) A review of technical and regulatory limits for hydrogen blending in natural gas pipelines. *Int. J. of Hydrogen Energy*, **48**, 5595–5617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.254>
- Makhnenko, V.I., Pochinok, V.E. (2006) *Strength Calculation of Welded Joints with Crack-Like Imperfections*. E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.
- Zengtao, C., Butcher, C. (2013) *Micromechanics Modelling of Ductile Fracture*. Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2016) Моделирование процессов зарождения и развития докритической поврежденности металла сварных трубопроводных элементов при малоцикловом нагружении. *Техн. диагностика и неразруш. контроль*, **4**, 14–20.

Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Rozyuka, G.F., Pivtorak, N.I. (2016) Simulation of processes of initiation and propagation of subcritical damage of metal in welded pipeline elements at low-cycle loading. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 14–20 [in Russian].

10. Velikoivanenko, E., Milenin, A., Popov, A. et al. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, **55**, **1**, 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>

11. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
Makhnenko, V.I. (2006) *Safe service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

12. Makhnenko, V.I., Milenin, A.S., Semyonov, A.P. (2007) Mathematical modelling of thermal-deformation processes in braze-welding of butt joints of the titanium-aluminium type. *The Paton Welding J.*, **11**, 5–9.

13. (2013) BS 7910:2013. *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. BSI Standards Publication.

14. (2016) API 579-1/ASME FFS-1. *Fitness-For-Service 2016*. Washington, American Petroleum Institute, American Society of Mechanical Engineers.

15. Zhao, X.-L., Packer, J.A. (2000) Recommended fatigue design procedure for welded hollow section joints. *IIW doc. XIII-1772-99/XV-1021-99*. Abington Publ., Abington Cambridge UK.

16. Сміян О.Д. (2018) *Водень і руйнування металу об'єктів тривалої експлуатації*. Київ, Наукова думка.
Smiyan, O.D. (2018) *Hydrogen and metal fracture of long-term operation objects*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].

17. Meng, B., Gu, C.H., Zhang, L. et al. (2017) Hydrogen effects on X80 pipeline steel in high-pressure natural gas/hydrogen mixtures. *Int. J. of Hydrogen Energy*, **42**, **11**, 7404–7412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.145>

18. (2008) ДСТУ Н Б В.2.3-21:2008. *Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами*. Київ, Мінрегіонбуд України.
(2008) DSTU N B.2.3-21:2008. *Directive. Determination of residual strength of main pipelines with defects*. Kyiv, Minregionbud Ukrainy [in Ukrainian].

NUMERICAL ANALYSIS OF THE REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF PIPE STEEL DEGRADATION ON THE RELIABILITY OF CORRODED MAIN GAS PIPELINES USED FOR TRANSPORTATION OF GAS-HYDROGEN MIXTURES

O.S. Milenin, O.A. Velykoivanenko, G.P. Rozyuka, N.I. Pivtorak

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: asmilenin@ukr.net

Transportation of mixtures of natural gas and green hydrogen is one of the promising ways to use the local gas-transportation system under the conditions of a rapid transition to a sustainable economy. For safe operation of the available main gas pipelines at transportation of gas-hydrogen mixtures of different compositions, it is necessary to take into account the negative influence of hydrogen on the mechanical properties of pipe metal, in particular at evaluation of their technical condition by the results of flaw detection. In this work, the principles of safe operation of pipelines with detected defects of local corrosion loss of metal were studied. For this purpose a numerical procedure was developed for assessment of brittle strength based on finite-element modeling of the stressed state and brittle-ductile fracture criteria. It is shown that under the conditions of static loading degradation of brittle fracture resistance of pipeline metal with the detected defect of local metal loss is relatively small, and it can be compensated by a change in service load. Under the conditions of cyclic loading by internal pressure the regularities of lowering of the load-carrying capacity of a corroded pipeline were demonstrated, depending on the actual brittle fracture resistance of the pipe steel. 18 Ref., 6 Fig.

Keywords: gas-hydrogen mixtures, main pipeline, local metal loss due to corrosion, hydrogen degradation, technical condition, brittle fracture, cyclic loading

Отримано 09.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 01.03.2024

Прийнято 22.03.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2024

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	–	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	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 електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогам передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр» 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.

Можлива також передплата на електронні версії журналів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН РУЙНУВАННЯ ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННИКА З НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ AISI 316L У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

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

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

Проведено комплекс досліджень причин руйнування пластинчастого теплообмінника з нержавіючої сталі AISI 316L. Із застосуванням аналізу умов експлуатації, методів сканувальної мікроскопії, візуального огляду, масометрії, фізичних методів аналізу середовищ, випробувань стійкості проти локальної корозії встановлено причини утворення наскрізних пошкоджень пластин теплообмінника. Доведено, що ініціювання наскрізних дефектів обумовлено складною взаємодією комплексу чинників, а саме: руйнуванням пасивної плівки в місцях стикання пластин, розвитком міжкристалітної корозії поверхневого шару при тривалому простоюванні теплообмінника з дезінфікуючою консервуючою рідиною, що призвело до утворення застійних зон між гофрами пластин, притиснених одна до одної, в яких затримувалася рідина, та підвищення корозивності води відносно сталі. Бібліогр. 22, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: нержавіюча сталь, теплообмінник, пітингова корозія, опірність до локальної корозії, швидкість пітингової корозії

Вступ. Корозійні збої теплообмінників є дуже поширеним явищем, подолання наслідків якого вимагає великих витрат на технічне обслуговування або ремонт [1]. Відмови в їх роботі обумовлені в основному локальною корозією: пітинговою, щілинною, корозійним розтріскуванням.

Так, комплексний аналіз пошуку причин внутрішнього витоку пластин 316L у пластинчастому теплообміннику, який працював на когенераційній електростанції, показав, що несправності викликані утворенням напівсферичних перфорацій, рівномірно розподілених у місцях стикання зигзагоподібних вершин сусідніх гофрованих пластин. Там, де поверхнева пасивна плівка пошкоджена тертям, спочатку розвивається щілинна та пітингова корозія, у міру зростання розміру пітинга – щілинна та фретинг-корозія, що викликають розвиток ураження навколо дефекту, пітингова та щілинна корозія – розвиваються у глибинному напрямку. У вузькій щілині накопичується багато продуктів корозії, зокрема Cl^- , а напруження стиску викликає тертя із коливаннями тиску води [2].

Випробування методами потенціометрії та електрохімічної циклічної поляризації підтвердили сприйнятливості пластин SS 316L теплообмінного обладнання на текстильній фабриці до інтенсивнішої пітингової корозії в живильній воді відкритого контуру та воді кожуха двигуна через високий рівень вмісту хлоридів [3].

У нафтохімічному комплексі Jam (Іран) пластини зі сталі 316 деяких теплообмінників були пошкоджені через появу тріщин у місцях встановлення прокладок [4] внаслідок накопичення хло-

рид- та сульфід-іонів у щілинах між пластинами та прокладками, що при високій температурі призвело до корозійного розтріскування пластин.

У системі централізованого теплопостачання утворення дефектів проточної пластини з нержавіючої сталі AISI 316 пластинчастого теплообмінника спричинені пітинговою корозією, оксидними відкладеннями та забрудненнями в місцях регулярного контактування сусідніх пластин [5]. Поверхневі оксиди та забруднення містили вуглець, кремній і магній, що входять до складу хімічних клеїв. Концентрація іонів хлориду складала 30...40 ppm, що не становило небезпеки для розвитку пітингової корозії. У щілині відбувалося локальне зменшення розчиненого кисню разом зі збільшенням вмісту хлорид-іонів, утворюючи кисле середовище. Таке середовище руйнує пасивну плівку нержавіючої сталі, що призводить до утворення пітингів. Крім того, забруднювачі звузили проміжок між сусідніми пластинами та перешкождали дифузії іонів, тим самим прискорюючи щілинну корозію.

Причиною утворення наскрізних дефектів пластини теплообмінника під час роботи обладнання в середовищі з іонами хлору та сірки, як стверджують автори [6], є розвиток корозії в області фериту, який смугоподібно розподілений в аустенітній матриці.

Причиною несправності теплообмінників у нафтовій та нафтохімічній галузях відзначено дефекти виготовлення та зварювання, наявність залишкових напружень, невідповідний вибір матеріалів і дизайн, неправильний хімічний склад/потік води

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

Л.В. Гончаренко – <https://orcid.org/0000-0001-8371-2078>, В.А. Костін – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>

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

та незадовільний вибір фільтрів, наявність Cl^- , S^{2-} , O_2 , NH_4^+ у воді, недотримання рекомендованих умов експлуатації та стандартних рекомендацій під час зупинки [7].

Робота теплообмінників в умовах забруднення пластин осадом з води призводить до їх локальної корозії під осадом [8]. За рівних умов роботи теплообмінні пластини зі сталі AISI 316L пропрацювали в 2,36 рази довше, ніж зі сталі AISI 304L. Корозійне руйнування пластин під осадом почалося із зародження пітінгу поблизу неметалевих включень.

Причиною передчасного виходу з ладу пластин теплообмінника зі сталі 316/316L на харчовому заводі виявлено наявність поверхневих домішок, що містять хлориди [9]. Характерною особливістю поверхні рифленої пластини є вторинно рекристалізована мікроструктура з товстими та чітко вираженими границями зерен аустеніту. Пітінгоутворення визначено домінуючим механізмом руйнування матеріалу, спричинене фреїтінг-корозією сусідніх ребер пластини.

Мартенситне перетворення, яке відбувається внаслідок процесу холодного формування сталі AISI 316 та в умовах циклічного навантаження, має істотний вплив на корозійну стійкість пластинчастих теплообмінників з аустенітної нержавіючої сталі AISI 316 [10]. Роль молібдену в пасивній плівці полягає у його здатності утворювати нерозчинні хлоридні комплекси на дні пітінгів. Проте захисна плівка при пасивації або репасивації постійно руйнується через безперервне мартенситне перетворення в результаті циклічної роботи пластинчастого теплообмінника внаслідок його вібрації та деформації, які можуть призвести до розвитку тріщин або руйнування. При мартенситному перетворенні внаслідок холодної пластичної деформації змінюється структура сталі та її фізико-хімічні властивості. Набуття сталлю магнітних властивостей дуже залежить від легуючих елементів. Маючи інші потенціали корозії, вони легко стають анодом або катодом у корозійному напівелементі.

На швидкість корозії впливає теплопередача, основним чинником якої є градієнт температур, що викликає відмінності в розчинності елементів у рідині. Залежно від того, нагрівається чи охолоджується рідина, цей градієнт може прискорювати

або гальмувати корозію. Корозія негативно впливає на теплогідравлічні характеристики теплообмінників. Продукти корозії можуть перешкоджати потоку та сприяти збільшенню перепаду тиску.

З аналізу великої кількості несправностей, наведених у літературі, зрозуміло, що існує необхідність подальших наукових досліджень у напрямку розроблення корозійностійких матеріалів для різних середовищ [11–13], розширення досліджень зниження швидкості корозії із застосуванням електрохімічних методів (катодний або анодний захист), пошуку альтернативних підходів щодо вдосконалення конструкції теплообмінника таким чином, щоб пошкоджені корозією пластини було легко замінити [14, 15].

Мета роботи полягала у дослідженні причин руйнування пластинчастого теплообмінника з нержавіючої сталі у водному середовищі на підприємстві харчової промисловості.

Методи дослідження. Дослідження причин виходу з ладу теплообмінників передбачає застосування комплексного підходу, який включає аналіз умов монтажу та експлуатації виробу, транспортованого середовища, проведення комплексу лабораторних досліджень з оцінювання властивостей пластин, їх опірності до локальної корозії, детальне вивчення області дефектів.

Досліджували три пластини з нержавіючої сталі: непошкоджену після 8 років експлуатації, після 1 року експлуатації з ненаскрізними та наскрізними ураженнями, товщина яких становила 0,8, 0,5 і 0,5 мм відповідно, хімічний склад яких визначено на спектрометрі «Spectrovac-1000» (табл. 1).

Випробування опірності до пітінгової корозії проводили відповідно до [17] у 10%-му розчині заліза трихлориду гексагідрату ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) за кімнатної температури впродовж 24 год. Зразки виготовляли з пластин теплообмінника з ділянок, на яких присутні кутоподібні та ромбоподібні тиснення.

Середню умовну швидкість пітінгової корозії в $г/(м^2 \cdot год)$ визначали за формулою:

$$v_{кор} = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}$$

де $v_{кор}$ – середня умовна швидкість пітінгової корозії, $г/(м^2 \cdot год)$; Δm – втрата маси зразка, г; S – площа поверхні зразка, $м^2$; τ – тривалість випробувань, год.

Таблиця 1. Хімічний склад пластин

Характеристика зразка	Масова частка елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	S	P
Після 8 років експлуатації	0,027	0,36	1,28	17,0	11,1	0,29	2,0	<0,1	0,002	0,027
Після 1 року експлуатації	0,031	0,34	1,21	17,2	11,7	0,33	2,1	<0,1	0,002	0,025
AISI 316L згідно з ASTM A 240/A 240M [16]	0,03	0,75	2,00	16,0...18,0	10...14	–	2,0...3,0	–	0,030	0,045

Середнє число пітінгів на поверхні ділянок зразка визначали неозброєним оком на одиницю площі поверхні (шт/м²).

Для дослідження поверхні зразків в області точкових дефектів використовували методи растрової електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу. Дослідження проводили на електронному мікроскопі JSM 840 (JEOL, Японія) і енергодисперсійному мікроаналізаторі Link 860/500 (Link Analytical, Великобританія). Вивчення поверхні виконували в режимі вторинних (SEI) і зворотнорозсіяних електронів (BEI) за напруги прискорення 20 кВ і струмі електронного пучка 10⁻⁷...10⁻¹⁰ А.

Мікротвердість за Віккерсом визначали згідно з ГОСТ 2999 [18] на різних ділянках зразка на мікротвердомі M-400 фірми LECO (США) при навантаженні 100 г.

Результати досліджень та їх обговорення.
Аналіз умов експлуатації. Теплообмінник з паралельним потоком призначений для пастеризації пива, яка здійснюється за допомогою води, містив пакет гофрованих сталевих пластин з отворами. До початку експлуатації пластини теплообмінника зберігали впродовж ~16 років. Максимальна температура транспортованих води та пива в теплообміннику 78 °С, тиск 10 бар, перевищень робочих допустимих значень яких не було. Проведені випробування на герметичність надлишковим тиском за допомогою вуглекислого газу з однієї сторони та атмосферним тиском з іншої не перевищували 6 бар. Промивання пластин проводили підготовленою гарячою водою з температурою 80 °С та розчинами, що не містять хлоридів. Тривалість роботи теплообмінника до утворення наскрізних уражень становила 1 рік, тривалість контакту з водою (пивом) – приблизно 4400 год. Натомість теплообмінник, встановлений раніше, працював 8 років без відмов.

Корозійні ураження виявлені у виробничих умовах з боку контакту пластини з пивом. На більшості пластин наявні пітінги. Наскрізні ураження виявлено лише на деяких пластинах. Під час експлуатації теплообмінника з наскрізними ураженнями були декілька зупинок, усього впродовж 1 року експлуатації 4400 год, тобто загалом більше ніж 0,5 року. При цьому теплообмінник заповнювали холодною водою з кислотним засобом для дезінфекції, дозволим в харчовій промисловості, з рН 6,3...6,8. Аналогічним було

оброблення теплообмінника, який не мав наскрізних уражень. Таким чином, одне простоювання обладнання продовжувалося не менше ніж декілька днів. Треба зазначити, що ймовірність пітінгової корозії дуже мала у водах з високою швидкістю потоку [19].

Аналіз властивостей середовищ. Результати аналізу проби води та пива показали, що водневий показник рН пива до та після теплообмінника не змінився і становив 4,4 при незначній зміні електропровідності: від 922 до 1022 мкСм/см (в 1,1 рази). Натомість кислотність води збільшилася (від 4,4 до 3,6) на 0,8 одиниць рН, електропровідність (від 434 до 604 мкСм/см) – в 1,4 рази. Це свідчить про підвищення корозивності води відносно нержавіючої сталі при рН 4,0 і менше [20].

Візуальний огляд в лабораторних умовах показав, що на поверхні гофрованих ребер всіх пластин наявні ромбовидні потертості від стискання розміром приблизно 1×1 мм з кроком ~ 20 мм (рис. 1) та пітінги.

За вмістом основних легувальних елементів метал пластин відповідає сталі AISI 316L. Проте вміст вуглецю у зразках після 1 року експлуатації дещо більше (0,031 %), ніж нормоване значення (0,03 %), на відміну від зразка після 8 років експлуатації, в якому вміст вуглецю 0,027 % (табл. 1). Стійкість пластин теплообмінника проти міжкристалітної корозії підтверджено випробуваннями методом Штрауса [21].

Стійкість нержавіючої сталі проти пітінгоутворення оцінили за індексом пітінгостійкості – PRE (pitting resistance equivalent) відповідно до рівняння: $PRE = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + k \times \% N$ (для сталей аустенітного класу $k = 30$) [22]. За цим показником пластини приблизно однакові (сталь стійка проти пітінгоутворення, якщо PRE більше 35 [22]), але для пластини після 8 років експлуатації властиве більше співвідношення Cr/Ni (табл. 2).

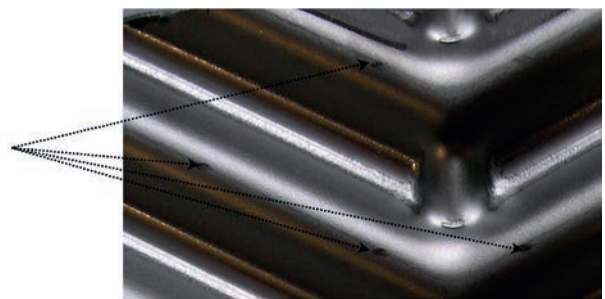


Рис. 1. Ділянка поверхні пластини з ромбовидними потертостями

Таблиця 2. Індекс пітінгостійкості для сталі досліджуваних пластини

Характеристика зразка	Cr	Ni	Mo	PRE	Cr/Ni
Після 8 років експлуатації	17	11,1	2	23,6	1,53
Після 1 року експлуатації	17,2	11,7	2,1	24,1	1,47

Дослідження опірності пластин пітингової корозії. З аналізу зовнішнього вигляду зразків (рис. 2) видно, що пітинги утворювалися переважно на випуклих ділянках зразків, що зазнали холодного деформування під час виготовлення (рис. 2, *e*) та в місцях, в яких пластини теплообмінника стикалися одна з одною, що призвело до порушення суцільності пасивного шару. В цих місцях утворилися ненаскрізні пітинги, але з часом внаслідок електрохімічної гетерогенності між дном пітинга та поверхнею пластини ймовірним є подальший розвиток активних пітингів до утворення наскрізного дефекту. Зроблено висновок, що однією з причин утворення пітингів є порушення суцільності пасивної плівки внаслідок контакту випуклих частин теплообмінника між собою. Оцінювання середньої умовної швидкості пітингової корозії та кількості пітингів на одиницю площі виявило відмінності в кількості пітингів на одиницю площі при близьких значеннях умовної швид-

кості корозії, що імовірно обумовлені різницею їх розвитку вглиб чи по поверхні (табл. 3).

Дослідження області локальних корозійних дефектів. Як виявлено (рис. 3–5), мікроструктура всіх зразків аустенітна зі слідами деформації всередині зерен, що обумовлено деформуванням пластин під час виготовлення. Мартенсит деформації на ділянці дефекту відсутній. Мікротвердість $HV_{0,1}$ становить 199...236 кгс/мм², що відповідає мікротвердості аустенітної матриці. Дефектів у вигляді подряпин, відшарувань поверхневого шару не виявлено. На всіх зразках відмічено розтавлення границь аустенітних зерен на поверхні, що ймовірно обумовлено впливом середовища під час експлуатації. Дослідження методом енергодисперсійного мікроаналізу вмісту легувальних елементів хрому та нікелю в області пітингів та на відстані від нього на неуразеній поверхні показав наявність незначних відмінностей (табл. 4), що не є визначальним в утворенні пітингів.

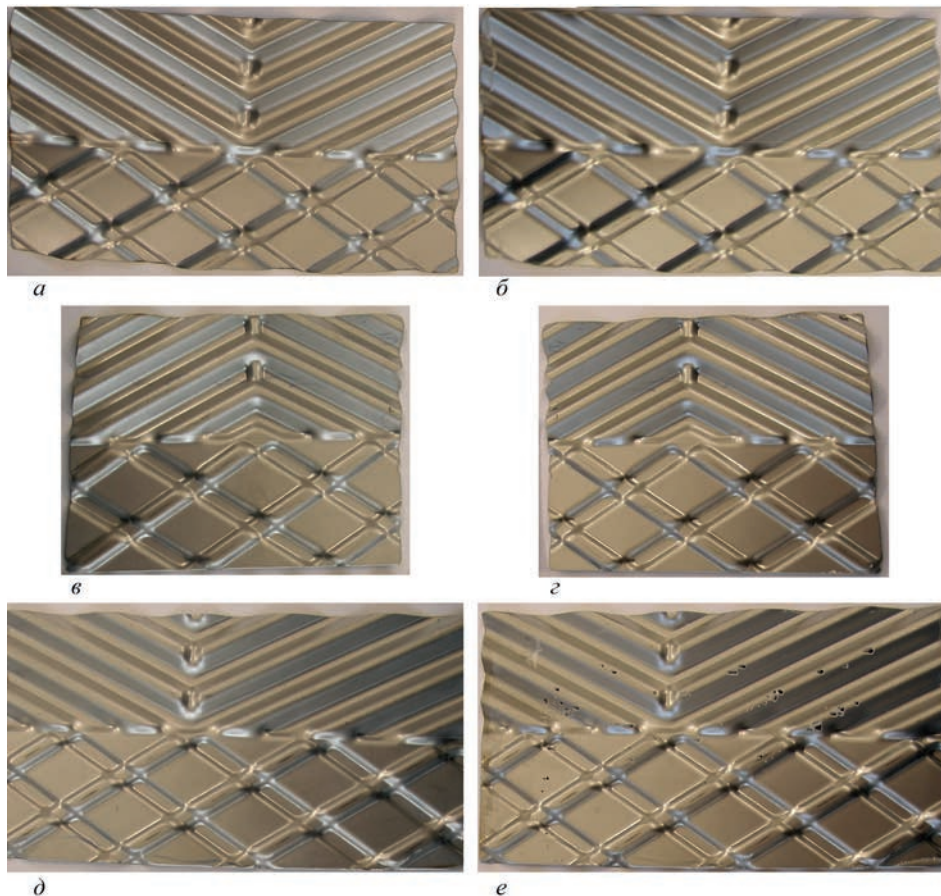


Рис. 2. Зовнішній вигляд поверхні зразків, вирізаних з пластин теплообмінника після експлуатації впродовж 8 років (*a, б*), 1 року без наскрізних пітингів (*в, г*) та з наскрізними пітингами (*д, е*): *a, в, д* – до випробувань; *б, г, е* – після випробувань тривалості проти пітингової корозії

Таблиця 3. Середня умовна швидкість пітингової корозії

Вид пластини	Характеристика пластин	Середня умовна швидкість пітингової корозії, мм/рік	Кількість пітингів, шт/м ²
Після експлуатації 8 років	Без пітингів	$1,28 \cdot 10^{-4}$	45
Після експлуатації 1 рік	Без пітингів	Середнє $1,25 \cdot 10^{-4}$	460
	З наскрізними пітингами	Середнє $1,65 \cdot 10^{-4}$	550

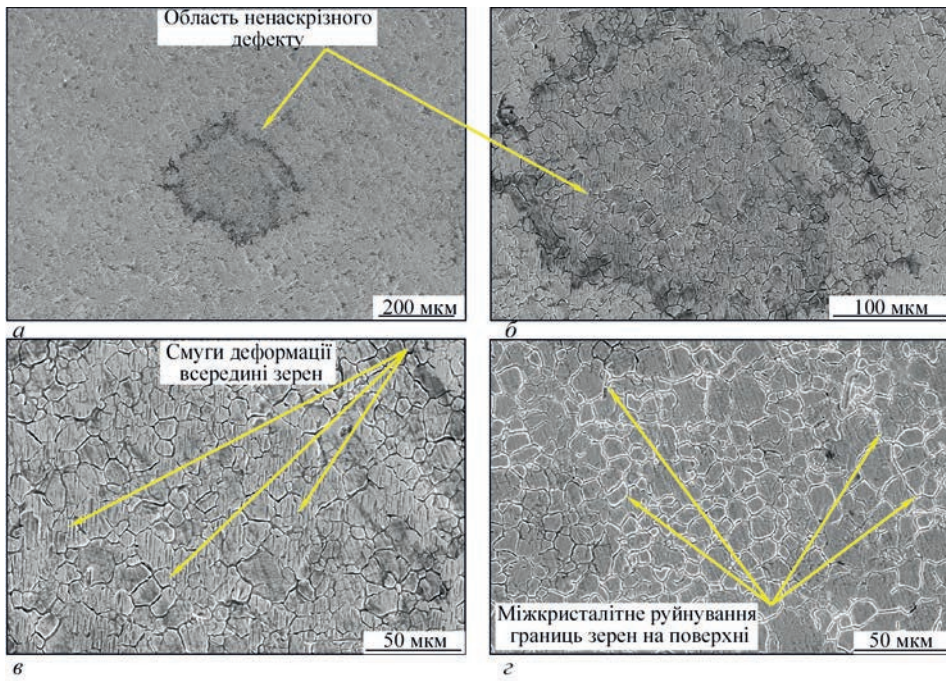


Рис. 3. Вигляд поверхні зразка теплообмінника після 8 років експлуатації в області локального руйнування пасивного шару (а, б) та мікроструктура на ділянці дефекту (в), на відстані від дефекту (г)

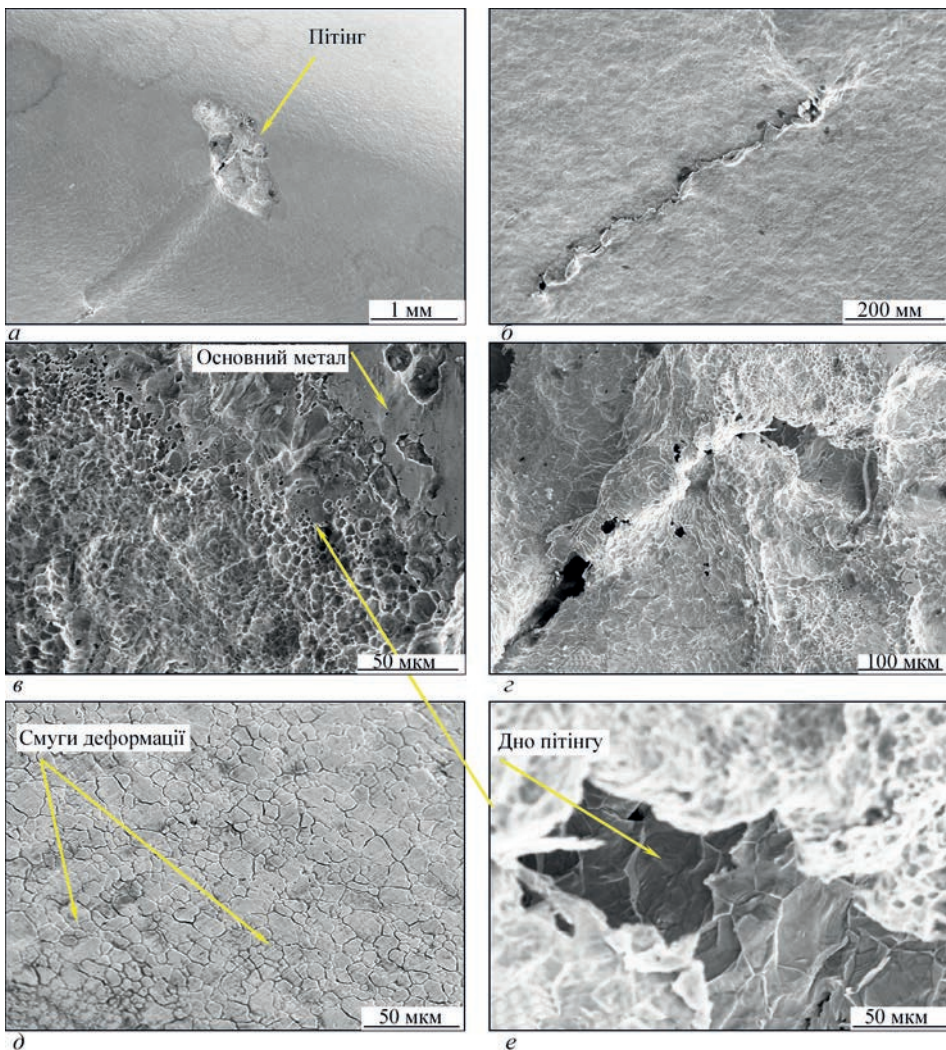


Рис. 4. Вигляд поверхні зразка пластини після 1 року експлуатації з ненаскрізними дефектами та структура на різних ділянках: а – пітінг; б – тріщина; в – дно пітінгу; г – береги дефекту; д – основний метал на відстані від дефекту; е – дно пітінгу

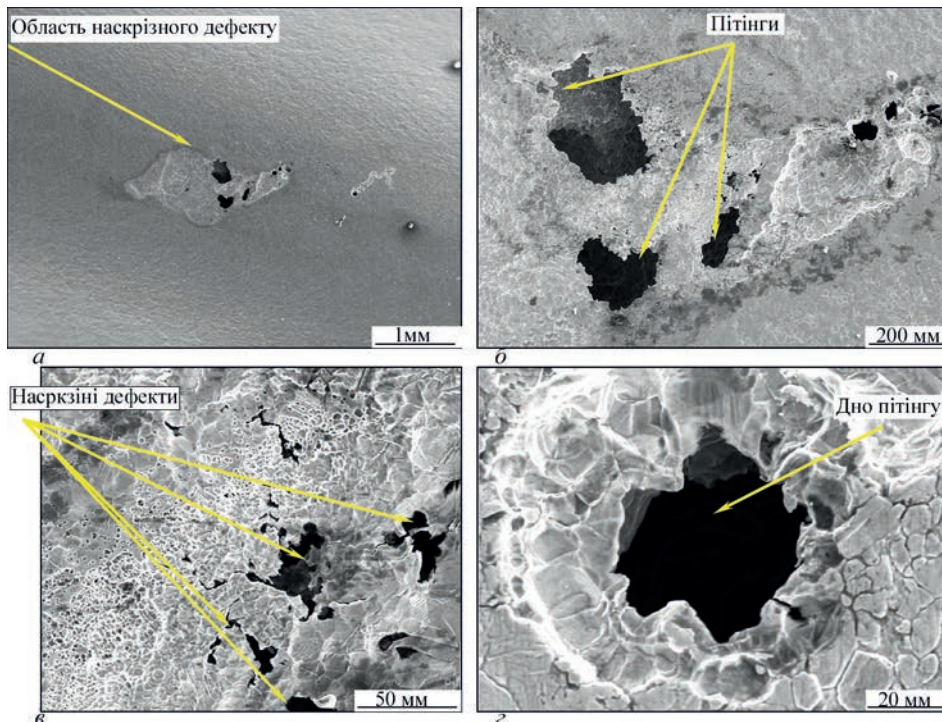


Рис. 5. Вигляд зразка пластини після 1 року експлуатації з наскрізними дефектами: а – вигляд дефекту; б – ненаскрізні пітинги; в – вигляд поверхні навколо пітингу; г – вигляд пітингу

Таблиця 4. Вміст легувальних елементів в локальних зонах досліджуваних зразків

Характеристика пластини	Характеристика зразка	Вміст легувальних елементів, %			
		В дефекті		На відстані від дефекту	
		Cr	Ni	Cr	Ni
Після 8 років експлуатації	Без пошкоджень	16,18	10,25	15,66	10,25
Після 1 року експлуатації	Без наскрізних пошкоджень	16,05	9,75	16,79	9,54
	З наскрізними пошкодженнями	15,83	9,88	17,43	9,35

Висновки

Встановлено, що незважаючи на стійкість проти міжкристалітної корозії металу пластин теплообмінника з нержавіючої сталі AISI 316L, перфорація виникла внаслідок руйнування поверхневого пасивного шару сталі та розвитку пітингової корозії, яке прискорювалося напруженим станом пластин внаслідок холодного деформування і навантаження тиском. Руйнуванню поверхневого шару сприяв тривалий контакт впродовж 4400 год з водним середовищем, наявність залишків водного середовища на поверхні пластин під час простоювання та створення специфічних умов (зниження рН нижче 4, щільний ефект, різниця температур по поверхні пластини тощо), за якого можливий розвиток міжкристалітної корозії. Це призвело до втрати окремими зернами аустеніту зв'язку із матрицею та стало причиною утворення наскрізного дефекту.

Список літератури/References

1. Faes, W., Lecompte, S., Ahmed, Z.Y. et al. (2019) Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion reviews*, 37(2), 131–155. DOI: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0054>
2. Fan, Z.D., Du, J.S., Zhang, Z.B. et al. (2019) Internal leakage of plate heat exchangers caused by cooperation of pitting, crevice corrosion, and fretting. *Engineering Failure Analysis*, 96, 340–347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.10.007>
3. Deen, K.M., Virk, M.A., Haque, C.I. et al. (2010) Failure investigation of heat exchanger plates due to pitting corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 17(4), 886–893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.023>
4. Khodamorad, S.H., Alinezhad, N., Fatmehsari, D.H., Ghahtan, K. (2016) Stress corrosion cracking in type. 316 plates of a heat exchanger. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 5, 59–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2016.03.001>
5. Song, M.J., Choi, G., Chae, H. et al. (2021) Corrosion failure analysis of flow plate in plate heat exchanger. *Corrosion Science and Technology*, 20(4), 204–209. DOI: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.4.204>
6. Song, W.M., Yang, G.R., Hao, Y., Zhang, Y.F. (2013) The corrosion failure analysis of plate pipe for plate heat exchanger. *Advanced materials research*, 750, 2252–2257. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.750-752.2252>
7. Ali, M., Ul-Hamid, A., Khan, T. et al. (2021) Corrosion-related failures in heat exchangers. *Corrosion Reviews*, 39(6), 519–546. DOI: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0073>
8. Nariv's'kyi, O.E. (2007) Micromechanism of corrosion fracture of the plates of heat exchangers. *Materials Science*, 43(1), 124–132. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0014-3>
9. Wassilkowska, A., Skowronek, T., Rybicki, S. (2022) Microstructure investigation of premature corroded heat exchanger plates. *Materials Testing*, 58(3), 218–223. DOI: <https://doi.org/10.3139/120.110837>
10. Solomon, N., Solomon, I. (2017) Effect of deformation-induced phase transformation on AISI 316 stainless steel corrosion resistance. *Engineering Failure Analysis*, 79, 865–875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.031>
11. Li, M.J., Tang, S.Z., Wang, F.L. et al. (2017) Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temper-

- ature waste heat utilization: A review on simulation and experiment. *Applied Thermal Engineering*, **126**, 737–761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.095>
12. Jong-Soon, K.I.M., Tae-Ho, K.A.N.G., In-Kwan, K.I.M. (2009) Surface treatment to improve corrosion resistance of Al plate heat exchangers. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **19**, 28–31. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60240-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60240-3)
 13. Davíðsdóttir, S., Gunnarsson, B.G., Kristjánsson, K.B. et al. (2021) Study of corrosion resistance properties of heat exchanger metals in two different geothermal environments. *Geosciences*, **11(12)**, 498. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11120498>
 14. Reppich, M. (1999) Use of high performance plate heat exchangers in chemical and process industries. *International j. of thermal sciences*, **38(11)**, 999–1008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.095>
 15. Turissini, R.L., Bruno, T.V., Dahlberg, E.P., Setterlund, R.B. (1997) March. Corrosion failures in plate heat exchangers. In: NACE CORROSION (pp. NACE-97522), NACE.
 16. ASTM A 240/A 240M – 04 *Specification for heat-resisting chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels.*
 17. ASTM G48-11(2020)e1 *Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solution.*
 18. ГОСТ 2999-75 (СТ СЭВ 470-77) *Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. С изменениями № 1, 2.*
 19. 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.*
 20. Shreir, L.L. (2010) *1.05-Basic concepts of corrosion. Shreir's corrosion.* Oxford, Elsevier, pp. 89–100. ISBN 978-0-444-52788-2.
 21. 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 сірчанокислотних середовищах (EN ISO 3651-2:1998, IDT).*
DSTU EN ISO 3651-2:2005. *The steel is corroded. Increased toughness to intercrystalline corrosion. Part 2. Ferritic, austenitic and ferritic-austenitic (dual-phase) steels. Testing for corrosion in sulfuric acid media (EN ISO 3651-2:1998, IDT) [in Ukrainian].*
 22. Cleland, J.H. (1996) What does the pitting resistance equivalent really tell us? *Engineering Failure Analysis*, **3(1)**, 65–69. DOI: [https://doi.org/10.1016/1350-6307\(95\)00026-7](https://doi.org/10.1016/1350-6307(95)00026-7).

INVESTIGATIONS OF THE CAUSES FOR DAMAGE IN A PLATE HEAT EXCHANGER FROM STAINLESS STEEL AISI 316L IN A FOOD INDUSTRY ENTERPRISE

L.I. Nyrkova, S.O. Osadchuk, L.V. Honcharenko, V.A. Kostin

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

A complex of studies has been performed to establish the causes for damage of a platelike heat exchanger from AISI 316L stainless steel. Analysis of service conditions, methods of optical, scanning microscopy, visual examination, massometry, physical methods of media analysis, and testing for local corrosion resistance were used to establish the causes for formation of through-thickness damage of heat exchanger plates. It was proved that initiation of through-thickness defects is due to complex interaction of a set of factors, namely: breaking up of passive film in the points of plate abutment, development of intercrystalline corrosion of the surface layer at long downtime of a heat exchanger with a disinfectant preservative liquid, leading to formation of stagnant zones between the corrugations of the plates pressed to one another, where the liquid was retained, and increase of water corrosiveness relative to steel. 22 Ref., 4 Tabl., 5 Fig.

Keywords: stainless steel, heat exchanger, pitting corrosion, local corrosion resistance, corrosion rate

Надійшла до редакції 22.02.2024
Отримано у переглянутому вигляді 11.03.2024
Прийнято 22.03.2024



Національний університет
водного господарства
та природокористування



Wrocław University
of Science and Technology

XVII Міжнародна науково-практична конференція

«ІНТЕГРОВАНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ»

(ІПТК-2024)

21 – 22 травня 2024 р., Київ, Україна
Національний авіаційний університет
в режимі ON-LINE

Тематика конференції

Секція 1 Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси

Секція 2 Авіаційна та космічна техніка

Секція 3 Вимірвальна техніка. Метрологія, стандартизація і сертифікація

Секція 4 Енергетика. Електротехнічні системи, світлотехніка

Секція 5 Інформаційні технології в приладобудуванні та машинобудуванні. Нафтогазові технології

Секція 6 Захист інформації та телекомунікаційні системи

Секція 7 Економіка промисловості

Секція 8 Військово-технічні проблеми та освіта

Контакти

Кафедра комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету, корп. 11, ауд. 402.

м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Тел. +38044 406 71 58, +38093 721 10 41, +38098 550 90 08

E-mail: iirtk.nau@gmail.com

ПРОВЕДЕННЯ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

С.А. Недосека¹, А.Я. Недосека¹, М.А. Яременко¹, М.А. Овсієнко¹, Б.М. Ободовський², С.Г. Епов²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: inpat59@ukr.net

²АТ «Одеський припортовий завод». 65481, Одеська обл., м. Южне, вул. Заводська, 3. E-mail: office@opz.odessa.ua

У статті наведено результати акустико-емісійного (АЕ) контролю при проведенні пневматичних випробувань посудин тиску станції розподілу повітря Одеського припортового заводу. Показано, що застосування методу АЕ контролю та відповідного обладнання дозволило оцінити технічний стан об'єктів контролю, а також урахувати особливості проведення контролю для вдосконалення методологічних підходів до отримання та обробки даних АЕ діагностування складних конструкцій. Бібліогр. 8, табл. 5, рис. 10.

Ключові слова: акустична емісія, зонна локація, кластеризація, амплітудна фільтрація

Вступ. Контроль і оцінка поточного стану об'єктів з обмеженим доступом є важливим та актуальним питанням. Аналіз світового досвіду використання методу АЕ вказує на те, що контроль конструкцій з обмеженим доступом до поверхні може бути здійсненим, але мова йде виключно про об'єкти, у яких акустичний зв'язок між декількома датчиками присутній [1, 2] і можуть бути сформовані локаційні антени, завдання яких – визначати координати виявлених джерел АЕ. Значно складнішою проблема оцінки стану конструкцій з обмеженим доступом стає, коли такий зв'язок відсутній. У даній статті показано, що з використанням методу зонної АЕ локації та за наявності у АЕ системи можливостей прогнозу руйнівного навантаження кількісну оцінку поточного стану конструкцій з обмеженим доступом може бути виконано. Роботи виконувались відповідно до вимог, викладених у нормативних документах: ДСТУ 4223-2003 «Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Технічне діагностування. Загальні вимоги» [3], ДСТУ 4227-2003 «Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки» [4].

Застосування методу АЕ та відповідного обладнання дозволяє оперативно оцінити стан відповідальних промислових конструкцій [5]. Наявний досвід проведення таких робіт дозволить активно застосовувати цю технологію при відновленні роботи промислових підприємств [6].

Таблиця 1. Характеристики об'єктів АЕ

Найменування посудини, апарата	$P_{\text{розрах}}$, МПа	$P_{\text{роб}}$, МПа	$T_{\text{розрах}}$, °С	$T_{\text{роб}}$, °С	V , м ³
Киснева колона	1,02	1,7	-196	-172	3,2
Азотна колона	1,02	6,7	-196	-172	10,035
Головний конденсатор	1,02	3,8	-196	-172	3,996

Об'єкти контролю. Зовнішній вигляд посудин тиску, що контролювалися, показано на рис. 1. Обмежений доступ до внутрішньої частини апаратів дозволив встановити датчики АЕ лише на зовнішніх ділянках вхідних та вихідних труб. У таких умовах можна застосовувати для АЕ контролю лише зонний спосіб локації (детально описаний нижче). Характеристики об'єктів АЕ контролю наведено у табл. 1, де $P_{\text{розрах}}$ – розрахунковий допустимий тиск, МПа; $P_{\text{роб}}$ – робочий тиск, МПа; $T_{\text{розрах}}$ – розрахункова допустима температура, °С; $T_{\text{роб}}$ – робоча температура, °С; V – об'єм робочої частини апарату, м³.

Вимірювальне АЕ обладнання. Для проведення АЕ контролю використовували 16-ти каналну систему ЕМА-4 та дві 4-х каналні, всі об'єднані у єдиний вимірювальний комплекс (табл. 2).

На підставі технічної документації на об'єкти АЕ контролю та їх попереднього обстеження визначено методику проведення АЕ контролю, місця для розміщення датчиків АЕ на об'єктах контролю з урахуванням наявності доступу до основного металу та особливостей їх експлуатації, місця розміщення обладнання та організовано передачу даних щодо навантаження об'єктів. Місця встановлення датчиків АЕ на об'єктах (вибірково) показані на фото (рис. 2). Для проведення АЕ контролю встановлено 24 датчики АЕ.

Методика випробувань. Всі датчики АЕ підключені у режимі зонної локації, сформовано

А.Я. Недосека – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, С.А. Недосека – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>,

М.А. Яременко – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, М.А. Овсієнко – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>

© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, Б.М. Ободовський, С.Г. Епов, 2023



Рис. 1. Посудини, що працюють під тиском, на станції розподілу повітря

Таблиця 2. Технічна характеристика пристроїв ЕМА-4/16 та ЕМА-4/4

Кількість незалежних каналів АЕ	16/4	
Безперервний потік АЕ імпульсів, що обробляється, /с	> 1000	
Частотний діапазон АЕ сигналу, що обробляється, кГц	30...1000	
Обробка АЕ сигналу	цифрова	
Частота оцифрування АЕ сигналу, МГц	16	
Розрядність АЦП, біт	10	
Програмований цифровий смуговий фільтр	у кожного каналу АЕ	
Діапазон нижніх частот цифрового фільтра, кГц	30...970	
Діапазон верхніх частот цифрового фільтра, кГц	60...1000	
Ширина смуги пропускання цифрового фільтра, кГц	не менше 30	
Роздільна здатність при визначенні граничних частот цифрового фільтра, кГц	1	
Вимірювані первинні параметри АЕ		
Параметр АЕ	Од. виміру	Макс. значення
Час надходження (Elapse Time)	125 нс	7 років
Час наростання (Rise Time)	125 нс	100 мс
Тривалість (Duration)	125 нс	8 мс
Число подій АЕ (Counts)	1	65535
Пікова амплітуда (Peak), логарифмічний режим, дБ	0,5	101
Середнє значення (Average), логарифмічний режим, дБ	0,5	101
Збереження повної форми імпульсу АЕ	одночасно по всіх каналах АЕ	
Довжина реєстраторів форми імпульсу АЕ	8 мс по кожному каналу АЕ	
Тип внутрішнього підсилювального модуля для кожного каналу АЕ	LLA 104	
Кількість низькочастотних вимірювальних каналів	8/4	
Кількість зовнішніх параметрів навантаження	5/1	
Зовнішній параметр навантаження	0...20 мА (струмова петля) або 0...10 В	
Розрядність АЦП, біт	12	
Вимірювання напруги живлення, В	0...20	
Вимірювання температури всередині корпусу приладу, °С	-20...100	
Вимірювання відносної вологості всередині корпусу приладу, %	0...100	
Кількість цифрових входів / виходів ТТЛ	8/4	
Тип роз'єму зовнішнього параметра навантаження і цифрових входів-виходів	HD D-sub	
Інтерфейс зв'язку з комп'ютером	USB або Ethernet (опційно)	
Живлення через мережевий адаптер	12 В/1000 мА	
Опційне живлення за стандартом PoE	10...57 В/12 Вт	

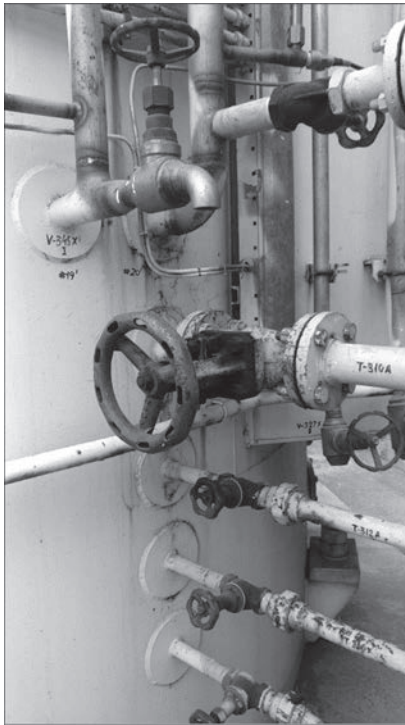


Рис. 2. Підготовка місць для встановлення датчиків АЕ (вибірково)

п'ять локаційних антен згідно з особливістю розташування місць встановлення датчиків [7]. Прийнято рішення застосувати метод зонної локації й при прогнозуванні руйнівного навантаження. Перевага зонної локації полягає в тому, що можливо, за необхідності, зіставити дані, отримані різними приладами в одному і тому ж експерименті, з точки зору прогнозу руйнування. Крім того, не будуть втрачені дані, які відбраковуються програмою при формуванні подій АЕ при координатній локації.

Метод зонної локації заснований на тому, що події АЕ формуються як результат спрацювання одного датчика, на відміну від координатної локації за допомогою антени з рознесених на деяку відстань датчиків, коли подією вважається близьке за часом спрацювання декількох датчиків, що дозволяє визначити координати джерела АЕ. Проте, зонна локація побічно вказує на область об'єкта контролю, в якій знаходиться джерело сигналу АЕ. При виставленні значення стробу (мертвого часу) досить великим можна чітко домогтися розуміння того, з області розташування якого датчика АЕ надходять сигнали. При проведенні контролю використовували автоматичний режим визначення порогу амплітудної фільтрації.

Оскільки оброблена інформація містить знімки екранів програми ЕМА-3.92 з результатами локації та прогнозу руйнування, наведемо короткий опис даних, які будуть відображені, та засоби їх відображення. У системах типу ЕМА спрацювання датчиків проходять багатоступеневу об-

робку, потрібну для прогнозу руйнівного навантаження. Кінцевим об'єктом, призначеним для прогнозування, є кластер. Перед цим дані проходять складну фільтрацію, призначену для вибору з усієї маси даних АЕ саме тих, які пов'язані з розвитком пошкодження та руйнування матеріалу.

У разі зонної локації кластер формується для кожного каналу АЕ, що спрацював, окремо. На екрані програми ЕМА-3.92 кластер відображається при зонній локації як стовпчик з прапорцем, що знаходиться над зображенням датчика. На прапорці відображається число подій АЕ, що потрапили в кластер.

Інформація, що отримується в процесі проведення АЕ контролю, відображається у вікні програми «Випробування», у якому є наступні основні екрани.

Екран «Індикатор і прогноз стану» – вікно розрахунку гранично допустимого прогнозного значення низькочастотного (НЧ) параметра при оцінці стану контрольованого об'єкта. У процесі проведення випробування або його повтору передбачено можливість прогнозування руйнівного навантаження та генерацію попереджень про небезпеку колірним індикатором.

Таблиця зі значеннями прогнозних даних є одночасно й колірним індикатором стану об'єкта. Поля таблиці показують номер антени та дані кластера, для якого виконано прогноз, а також мінімальне та максимальне значення допуску прогнозного параметра.

На екрані «Антен» схематично відображаються одна або кілька локаційних антен. Події після необхідної фільтрації об'єднуються за заданими ознаками в кластер. Нижня частина вікна відображає стовпчиками величину шуму по окремих каналах АЕ, колір яких відповідає їх амплітуді, і горизонтальними рисками встановлені пороги дискримінації за амплітудою сигналу для кожного каналу АЕ.

Екран «Графіки реального часу» – це екран в правій частині вікна, що відображає графічну залежність процесу зміни обраних користувачем АЕ параметрів у реальному часі при випробуваннях або в умовному часі при комп'ютерному повторі. На кожному графіку відображаються два параметри процесу.

Приклади налаштування АЕ антен (вибірково) наведено в табл. 3–5.

При проведенні АЕ контролю при пневматичних випробуваннях зареєстровано сигнали АЕ по окремих каналах. Загальна тривалість двох етапів випробування – 306 хв. Тип навантаження – пневматика; випробувальний тиск – 12,8 ат ($\approx 1,25$ МПа).

У процесі підйому тиску передбачалися витримки по ≈ 10 хв. кожна з метою виявлення дже-

Таблиця 3. Параметри антен АЕ

Номер антени	Тип локації	Число датчиків	Номери датчиків
1	Зонна	8	1;2;3;4;5;6;7;8
2	«-»	7	9;10;11;12;13;14;15
3	«-»	2	16;17
4	«-»	2	18;19
5	«-»	5	20;21;22;23;24

Таблиця 4. Антена АЕ № 1. Налаштування

Параметр	Значення
Тип локації	Зонна
База, мм	0
База 1, мм	0
Зона 1, мм	0
Зона 2, мм	0
Кластер, X; Y, мм	0; 0
НЧ канали	1;3
Мін. затримка, мкс	0
Макс. затримка, мкс	0
Фільтр, номер	2
Строб, мкс	100000
Частота вимірювань НЧ, мс	5000
Швидкість звуку X, мм/мкс	0
Швидкість звуку Y, мм/мкс	0

Таблиця 5. Антена АЕ № 1. Датчики. Коефіцієнт підсилювання – логарифмічний. Тип порогу – плаваючий

Канал	1	2	3	4	5	6	7	8
Поріг амплітуди, дБ	46,5	46,5	49	48,5	45	45	45	45

рел АЕ, які не викликані технологічними шумами при роботі системи навантаження. Дані щодо тиску заведено у систему АЕ контролю шляхом підключення до манометричної системи. Тарування значень поточного тиску уточнювали після завершення випробувань шляхом співставлення з кривою навантаження на графіку (рис. 3).

Хід та результати випробування. Випробування проведено у два етапи. На першому етапі у зв'язку з виникненням технічних питань (виявлено пропуск по різьбовому з'єднанню обов'язочного трубопроводу в районі кріплення манометричної зборки) тиск був піднятий тільки до ≈ 8 ат, потім скинутий майже до нуля і випробування було повторено.

Перше випробування записано частково, включно до останньої витримки, у двох окремих файлах. Друге випробування записано від початку і до кінця, у трьох окремих файлах.

Отриманих в процесі проведених вимірювань даних АЕ достатньо для оцінки стану об'єкта контролю, у тому числі прогнозу руйнування для окремих ділянок.

Графік тиску в процесі випробувань представлено на рис. 3, а.

На графіках (рис. 3, б–г) окрім кривої навантаження P , ат представлено загальний рівень неперервної акустичної емісії A_v , дБ, який характеризує акустичну активність в цілому протягом випробування. Як правило, стрімкий ріст цього

параметра відбувається під час навантаження за рахунок високого рівня технологічних шумів, що спричинені роботою систем навантаження. Відзначимо, що наявні на рис. 3, б, г та деяких подальших графіках різкі провали на кривій навантаження P фізично не відбувалися та пов'язані з тимчасовими затримками передачі технологічних НЧ параметрів від контролюваного об'єкта до системи ЕМА.

Основними завданнями при обробці результатів випробувань було встановити найнебезпечніші ділянки об'єктів контролю та, за наявності попереджень про безпеку першого рівня або вище, отримати прогноз руйнівного навантаження. Кластери, для яких отримано попередження про безпеку, вказують при зонній локації місце, близьке до розташування відповідного датчика АЕ. Для кожного з п'яти файлів, які записані під час випробувань, окремо встановлювали фільтри технологічних шумів згідно з аналізом кривої неперервної АЕ. У зв'язку з цим кожен з п'яти етапів випробування представлений наступним чином: якщо в процесі випробування виникало попередження про безпеку та виконувався прогноз руйнівного навантаження, спочатку надається знімок вікна програми ЕМА-3.92 після завершення комп'ютерного повтору відповідного етапу випробування, інакше знімок не наводиться. Далі для кожної з локаційних антен побудовано графіки, на яких показані в залежності від часу: лінійними графіками поточне навантаження (P , ат) та рівень неперервної емісії, що має характер шуму (A_v , дБ); стовпчиками – максимальні амплітуди подій (A , дБ). Якщо в процесі відповідного випробування для певного кластера виявлено необхідні дані для видачі попередження та прогнозу руйнівного навантаження [8], вони відображаються на екрані програми кольором прапорця на небезпечному кластері та кольором індикатора безпеки для антени АЕ, до якої відноситься кластер.

Для етапу першого підйому тиску попереджень про безпеку від АЕ системи не надходило, небезпечних джерел АЕ зареєстровано не було, тому одразу наведено графіки, які демонструють невисоку АЕ активність (рис. 4).

Аналіз даних (рис. 4) показує, що на етапі 1 першого підйому тиску небезпечних джерел АЕ зареєстровано не було. Слід відзначити різкі коливання шуму по всіх антенах. Також слід звернути увагу на виникнення другого за часом джерела АЕ по антені № 5 (датчик № 20). На витримках АЕ подій не спостерігалось.

При подальшому підйомі тиску до максимуму перед початком скидання тиску (рис. 5, б) зареєстровано події АЕ, що відповідають попере-

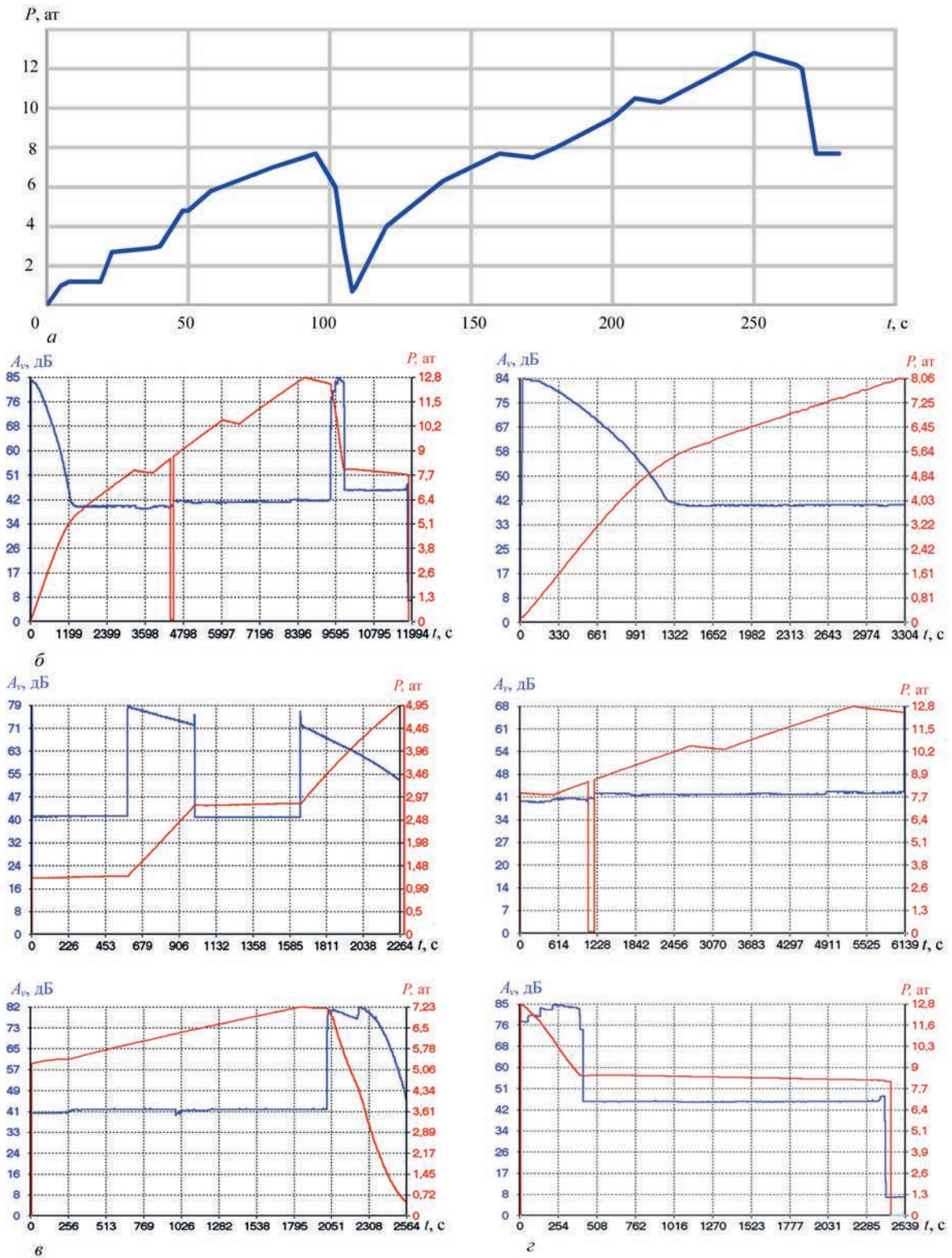


Рис. 3. Зміна тиску при проведенні випробувань: а – загальний графік навантаження при проведенні випробувань; б – загальний графік другого етапу випробувань, побудований програмою ЕМА-3.92; в – графіки ЕМА для двох стадій першого етапу випробувань; г – графіки ЕМА для трьох стадій другого етапу випробувань

дження про безпеку першого рівня «Звернути увагу» для усіх антен АЕ. Відзначимо, що попередження про безпеку формувалося згідно з ДСТУ 4227-2003. Можна виділити номери датчиків, для яких саме видано попередження першо-

го рівня: №№ 1, 10, 16, 17, 18, 21 (жовтий колір прапорців над номерами датчиків). Для інших датчиків попередження відсутні (зелений колір прапорців).

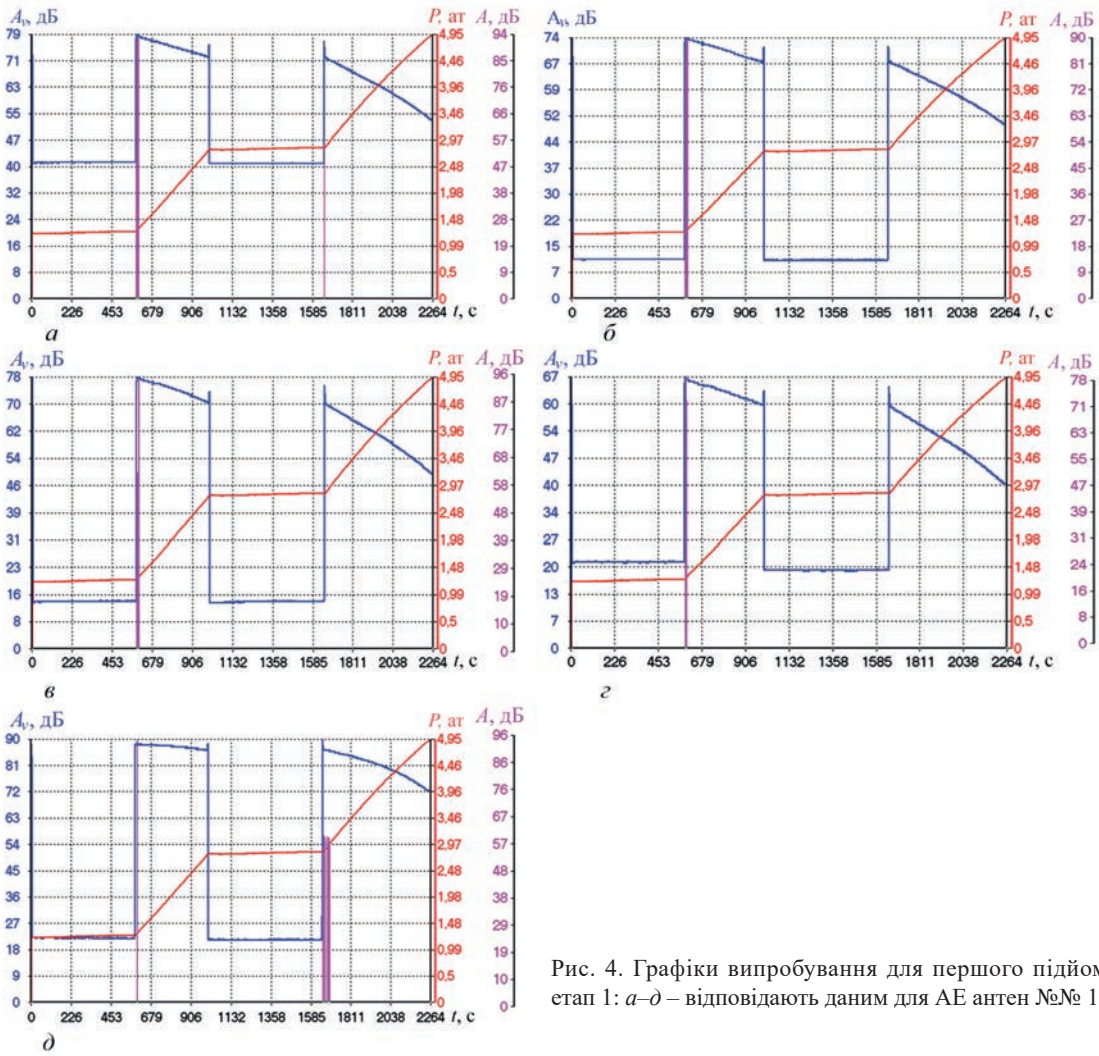


Рис. 4. Графіки випробування для першого підйому тиску, етап 1: а-д – відповідають даним для АЕ антен №№ 1, 2, 3, 4, 5

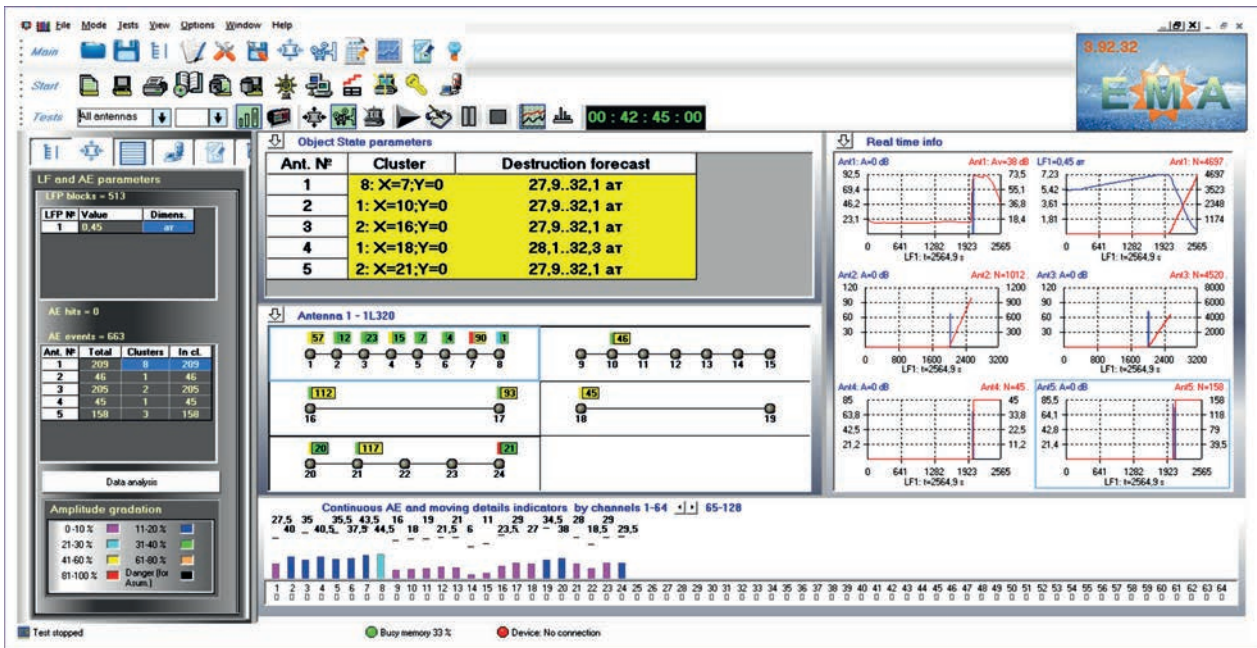


Рис. 5. Вікно програми ЕМА-3.92 після подальшого підйому тиску, етап 1. Спостерігається високий рівень шумів, на максимумі навантаження видано попередження про небезпеку першого рівня «Звернути увагу» для усіх антен. Чітко видно сім кластерів, для яких сформовано попередження. На індикаторах безпеки – прогноз руйнівного навантаження для всіх АЕ антен

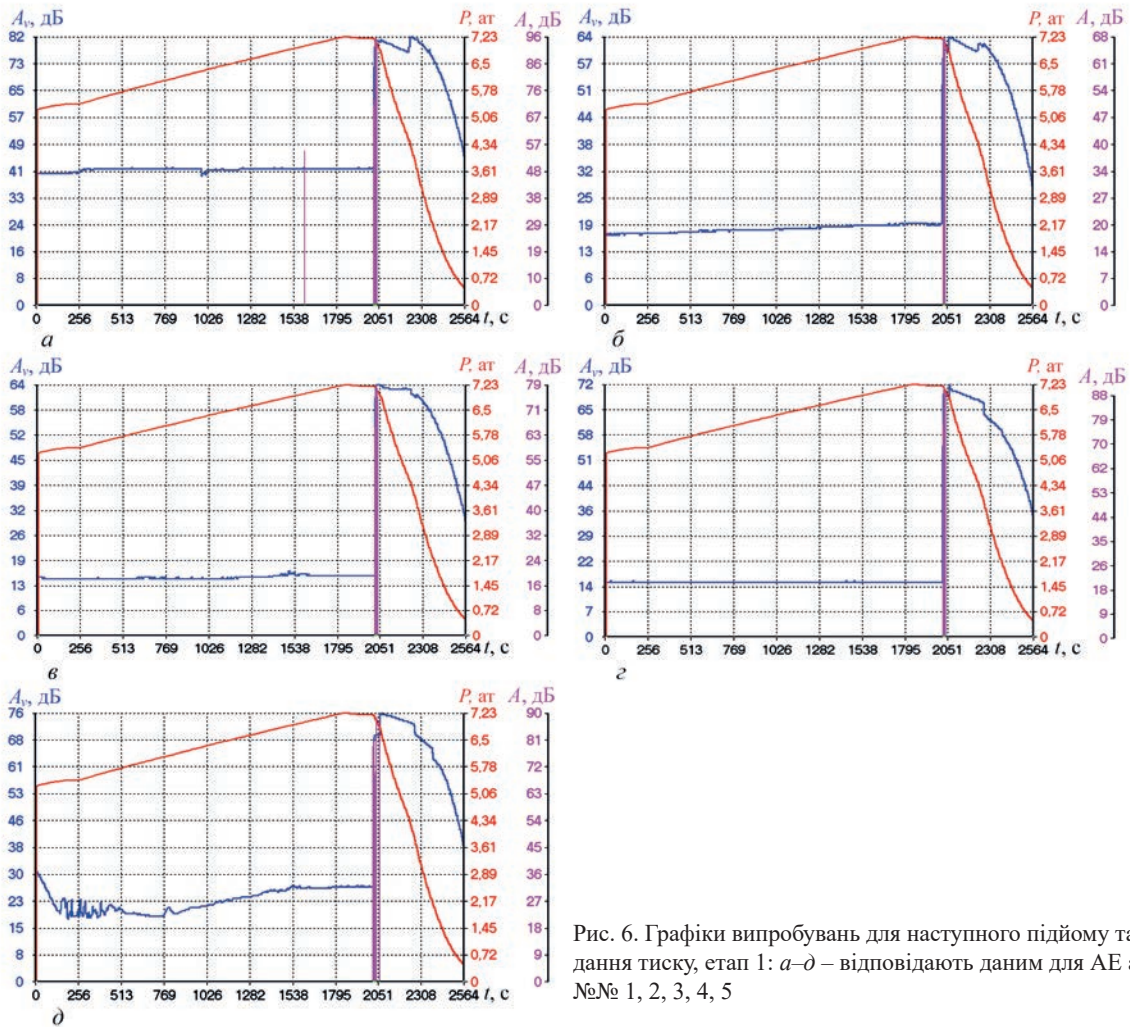


Рис. 6. Графіки випробувань для наступного підйому та скидання тиску, етап 1: а-д – відповідають даним для АЕ антен №№ 1, 2, 3, 4, 5

Узагальнюючи дані прогнозу руйнівного навантаження по всіх антенах, отримуємо діапазон значень прогнозу руйнування навантаження у межах 27,9...32,3 ат.

Прогнозні значення суттєво перевищують як максимальний для даних об'єктів контролю (згідно з паспортами) робочий тиск – 6,7 ат, розрахунковий робочий тиск – 10,2 ат, так і випробувальний тиск – 12,8 ат. За даними першого етапу випробувань можна відзначити, що об'єкти контролю знаходяться у задовільному стані та можуть експлуатуватися далі за умови періодичного АЕ контролю і спостереження за небезпечними ділянками.

Слід також відзначити суттєві коливання шуму для антени № 5 протягом усього першого етапу випробування. У значній мірі це стосується датчика № 20. Перший етап закінчився скиданням тиску до мінімуму без досягнення максимального випробувального тиску. Після вирішення технічних питань почався етап 2 – підняття навантаження до 12,8 ат.

Аналіз подальших даних (рис. 7) показує, що на етапі 2 під час початкового підйому тиску не-

безпечних джерел АЕ зареєстровано не було. Слід відзначити різкий підйом шуму на самому початку випробування по всіх антенах, з плавним зниженням його зі зростанням навантаження. Також слід звернути увагу на короточасне виникнення джерел АЕ на самому початку випробування, що, скоріш за все, пов'язано з роботою систем навантаження. Далі АЕ події не спостерігалися. Попередження про небезпеку не генерувалися, відповідні індикатори показували задовільний стан об'єктів контролю.

При подальшому підйомі тиску до максимуму (рис. 8, 9) зареєстровано події АЕ, що відповідають попередженню про небезпеку другого рівня «Підсилити увагу» для двох антен АЕ №№ 1, 5. Визначимо номери датчиків, для яких саме видані попередження: першого рівня – №№ 2, 3 (жовтий колір прапорців над номерами датчиків); другого – №№ 1, 24 (помаранчевий колір прапорців над номерами датчиків). Для інших датчиків попередження відсутні, що відповідає зеленому кольору прапорців.

Підсумки результатів випробувань. Узагальнюючи дані прогнозу руйнівного навантаження по

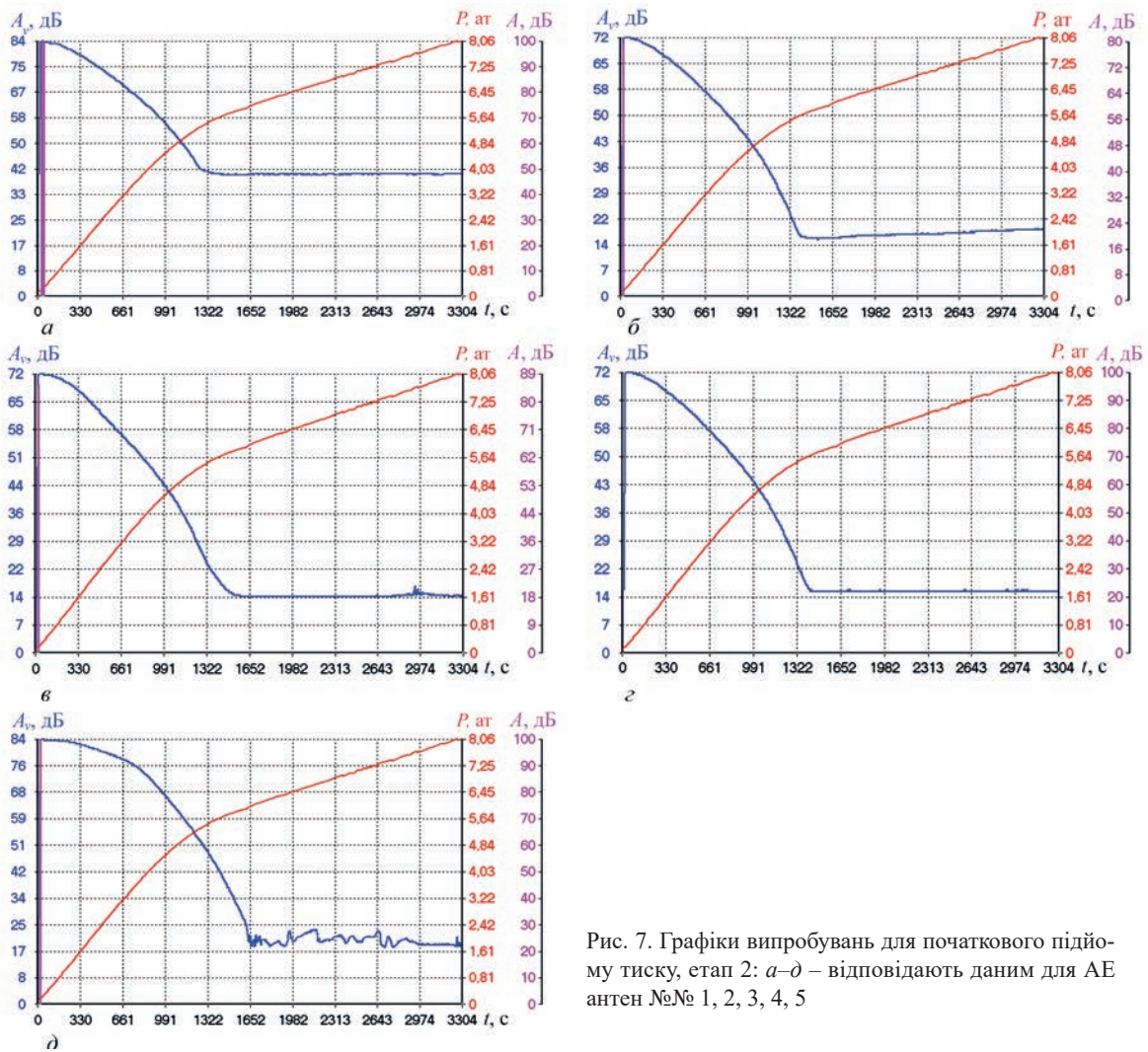


Рис. 7. Графіки випробувань для початкового підйому тиску, етап 2: а-д – відповідають даним для АЕ антен №№ 1, 2, 3, 4, 5

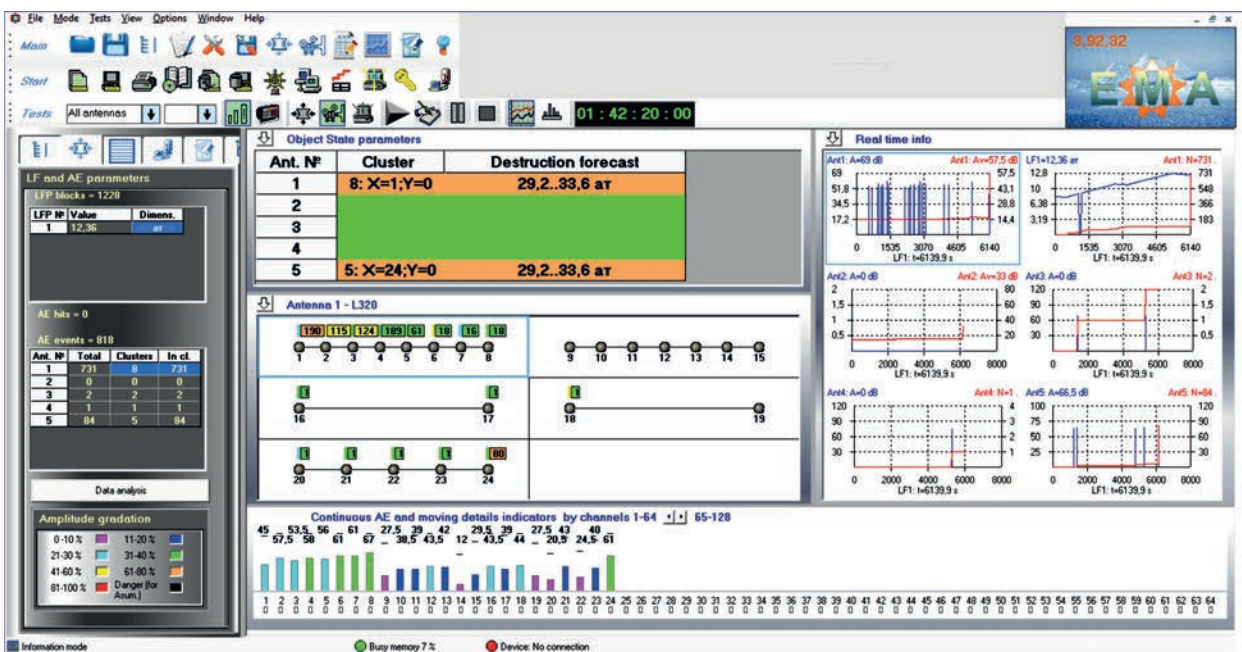


Рис. 8. Вікно програми EMA-3.92 після подальшого підйому тиску до максимуму, етап 2. Спостерігається високий рівень шумів, на максимумі навантаження видано попередження про небезпеку другого рівня «Підсилити увагу» для антен №№ 1, 5. Чітко видно чотири кластери, для яких сформовані попередження. На індикаторах небезпеки – прогноз руйнівного навантаження для двох антен АЕ

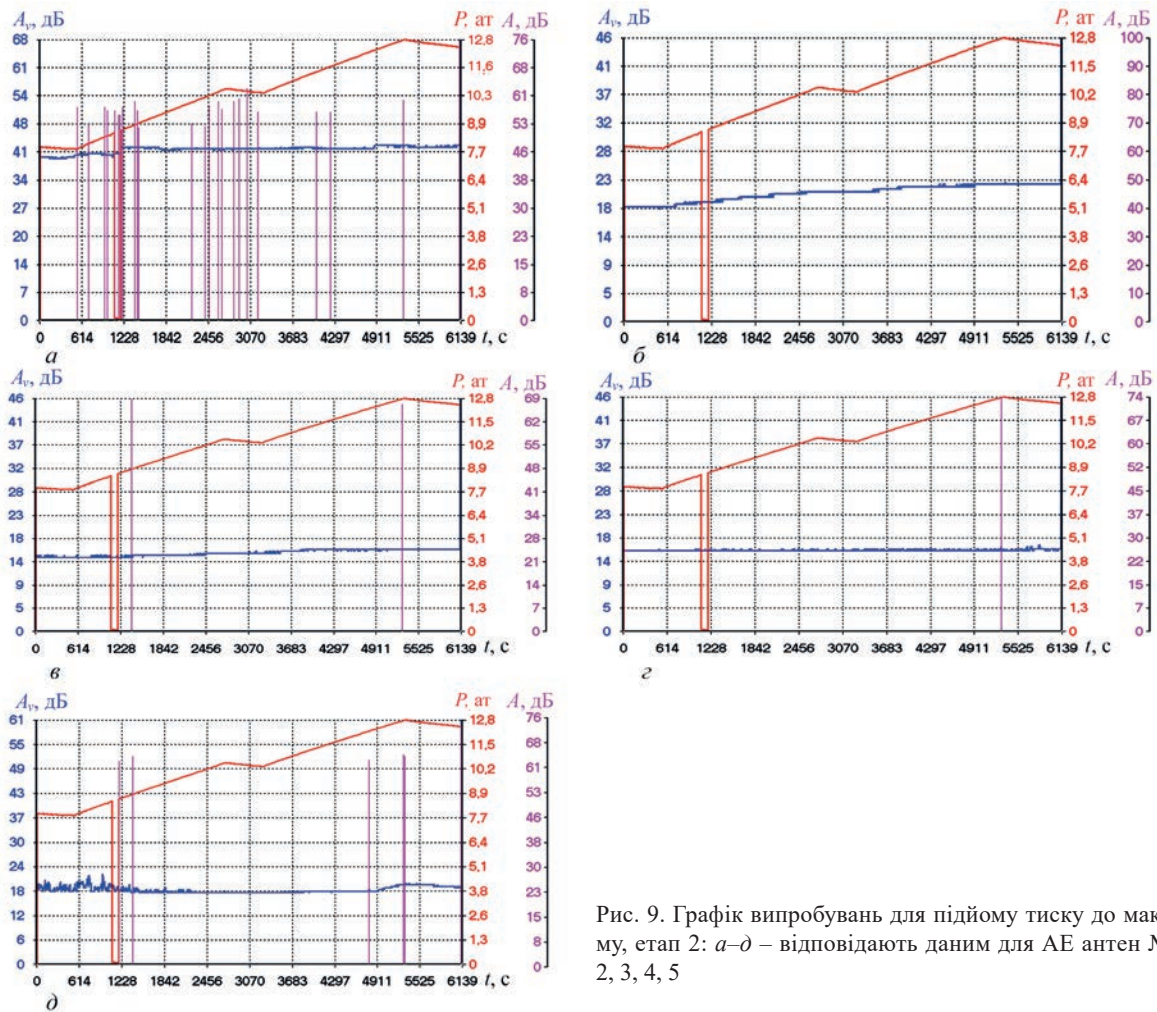


Рис. 9. Графік випробувань для підйому тиску до максимуму, етап 2: а-д – відповідають даним для АЕ антен №№ 1, 2, 3, 4, 5

всіх антенах, отримали діапазон значень прогнозу руйнівного навантаження у межах 27,9...32,3 ат.

Прогнозні значення суттєво перевищують як максимальний для даних об'єктів контролю (згідно з їх паспортами) робочий тиск – 6,7 ат, розрахунковий робочий тиск – 10,2 ат, так і випробувальний тиск – 12,8 ат. За даними другого етапу випробувань можна відзначити, що об'єкти контролю знаходяться у задовільному стані і можуть експлуатуватися далі за умови періодичного АЕ контролю та спостереження за небезпечними ділянками.

Аналіз даних, отриманих під час скидання тиску (рис. 10) показує, що на етапі 2 небезпечних джерел АЕ зареєстровано не було. Слід відзначити різкий підйом шуму на самому початку скидання по всіх антенах з плавним зниженням його по мірі падіння тиску. Також слід звернути увагу на короткочасне виникнення джерел АЕ на відносно пологій ділянці скидання, але вони є поодинокими та не призвели до генерації попереджень про небезпеку; відповідно індикатори показували задовільний стан об'єктів контролю. Далі випробування завершилося.

При виконанні АЕ контролю під час пневматичного випробування трьох посудин тиску (кисневої колони, азотної колони та головного конденсатора) станції розподілу повітря зареєстровані сигнали АЕ у режимі зонної локації. Отриману інформацію збережено для порівняння при проведенні наступного АЕ контролю для аналізу можливого розвитку зон підвищеної АЕ активності.

Таким чином, на підставі аналізу даних, отриманих при проведенні АЕ контролю посудин тиску станції розподілу повітря при проведенні пневматичних випробувань, вивчення та аналізу інформації щодо об'єктів АЕ контролю та результатів проведення пневматичних випробувань посудин тиску, додаткової обробки даних АЕ контролю виявлено наступне:

1. Попередження першого рівня безпеки «Звернути увагу» згенероване для зонних антен – датчиків з номерами: 1, 2, 3, 10, 16, 17, 18, 21.

2. Попередження другого рівня безпеки «Підсилити увагу» згенероване для зонних антен – датчиків з номерами: 1, 24.

3. Незважаючи на відсутність для датчика № 20 попереджень про небезпеку, в зоні його розташування помічено відхилення АЕ параметрів.

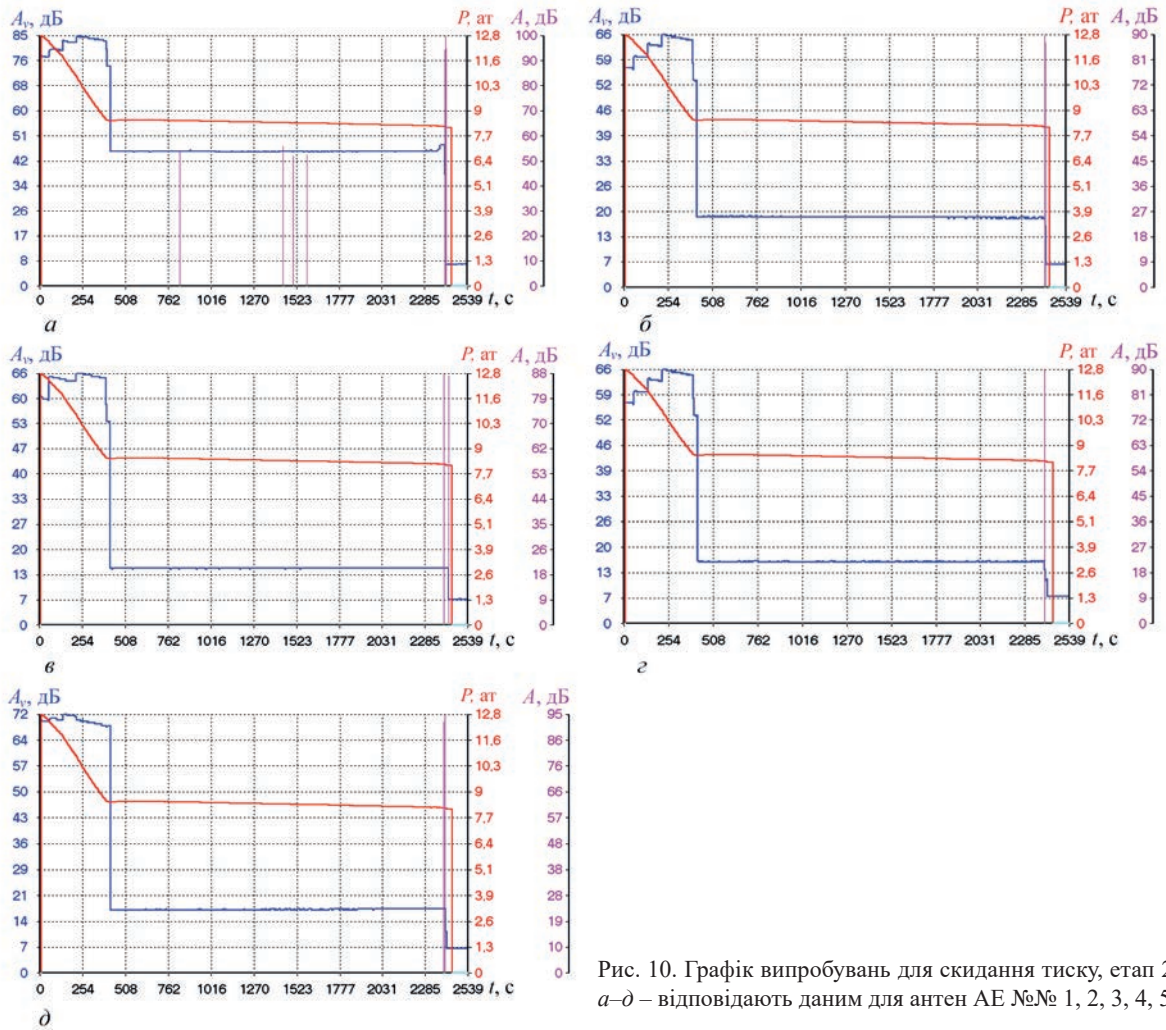


Рис. 10. Графік випробувань для скидання тиску, етап 2: а-д – відповідають даним для антен АЕ №№ 1, 2, 3, 4, 5

трів від таких для інших датчиків, тому рекомендовано звернути увагу й на зону його розташування також.

4. Значення прогнозу руйнівного навантаження складають 27,9...32,3 ат на першому етапі випробування; 29,2...33,6 ат – на другому. Поля допуску отриманих прогнозних значень руйнівного навантаження не перевищують тих, що дозволяються технічною документацією на системи ЕМА ($\pm 15\%$).

5. Прогнозні значення суттєво перевищують як максимальний для об'єктів контролю (згідно з їх технічними паспортами) робочий тиск – 6,7 ат, розрахунковий робочий тиск – 10,2 ат, так і випробувальний тиск – 12,8 ат.

Висновки

На підставі комплексного аналізу отриманих даних та відповідних нормативних документів визначено, що подальша експлуатація контрольованих посудин тиску можлива на робочих параметрах протягом чотирьох років з обов'язковим проведенням АЕ контролю і спостереження за не-

безпечними ділянками, що відповідають вказаним номерам датчиків, один раз на рік.

На базі отриманих результатів випробувань виконано ряд науково-дослідних робіт, які дозволили удосконалити методики реєстрації сигналів акустичної емісії при застосуванні зонної системи локації.

Внесено зміни в алгоритми оцінки визначення діагностичних параметрів для конструкцій з великим діапазоном робочих параметрів.

Список літератури

1. Anastasopoulos, A.A., Kourousis, D.A., Cole, P.T. (2008). Acoustic emission inspection of spherical metallic pressure vessels. *The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008), October 2008, Tehran, Iran.*
2. Cheng, L., Nokhbatolfighahai, A., Groves, R.M., Veljkovic, M. (2023) Acoustic emission-based detection in restricted-access areas using multiple PZT disc sensors. In: P. Rizzo, A. Milazzo eds. *European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2022, 1*, 619–629. (Lecture Notes in Civil Engineering; Vol. 253 LNCE). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-07254-3_62
3. ДСТУ 4223-2003 *Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Технічне діагностування. Загальні вимоги.*

4. ДСТУ 4227-2003 *Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки.*
5. Скальський В.Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 29–36.
6. Недосека С.А., Овсиенко М.А. (2012) Особенности обработки данных акустической эмиссии для сложных и множественных локационных антенн. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 7–12.
7. Журавльов С.В., Ободовський Б.М., Яременко М.А. та ін. (2021) Впровадження технології АЕ моніторингу на ОПЗ. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **3**, 26–32. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.03.03>
8. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: монография. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
2. Cheng, L., Nokhbatolfoghahai, A., Groves, R.M., Veljkovic, M. (2023) Acoustic emission-based detection in restricted-access areas using multiple PZT disc sensors. Ed. by P. Rizzo, A. Milazzo. In: *European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2022*, **1**, 619–629. (Lecture Notes in Civil Engineering; Vol. 253 LNCE). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-07254-3_62
3. DSTU 4223-2003 *Boilers, pressure vessels and pipelines. Technical diagnosis. General requirements* [in Ukrainian].
4. DSTU 4227-2003 *Guidelines for conducting acoustic-emission diagnostics of objects of increased danger* [in Ukrainian].
5. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solids, based on acoustic emission signals. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 29–36 [in Russian].
6. Nedoseka, S.A., Ovsienko, M.A. (2012) Features of processing acoustic emission data and application of complex and multiple location arrays. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 7–12 [in Russian].
7. Zhuravlyov, S.V., Obodovskyi, B.M., Yaremenko, M.A. et al. (2021) Introduction of the technology of AE monitoring at OPP. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 26–32. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.03.03>
8. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*: Monograph. 5th ed. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].

References

CONDUCTING ACOUSTIC EMISSION TESTING OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH LIMITED ACCESS

S.A. Nedoseka¹, A.Ya. Nedoseka¹, M.A. Yaremenko¹, M.A. Ovsienko¹, B.M. Obodovskyi², S.G. Epov²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: inpat59@ukr.net

²JSC «Odesa Port Plant». 3 Zavodska Str., 65481, Yuzhne, Odesa reg., Ukraine. E-mail: office@opz.odessa.ua

The paper gives the results of acoustic emission (AE) evaluation during pneumatic testing of pressure vessels in air distribution station at Odesa Portside Plant. It is shown that application of AE testing and respective equipment allowed evaluation of technical condition of the tested objects, as well as taking into account the special features of testing performance, in order to improve the methodological approaches to generation and processing of data of complex structure AE diagnostics. 8 Ref., 5 Tabl., 10 Fig.

Keywords: acoustic emission, zonal location, clustering, amplitude filtering

Отримано 31.08.2023

Отримано у переглянутому вигляді 16.10.2023

Прийнято 10.11.2023



XXIII Міжнародна науково-технічна конференція

«ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ»

14 – 15 травня 2024 р., Київ, Україна

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

Приладобудівний факультет, 03056, Київ, пр. Берестейський, 37, корп.1

Тематика конференції

Секція 1 Комп'ютерно-інтегровані технології та системи навігації і керування

Секція 2 Оптичні та оптико-електронні прилади і системи. Фотоніка

Секція 3 Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів

Секція 4 Прилади систем автоматизації

Секція 5 Аналітичне та екологічне приладобудування

Секція 6 Інформаційно-вимірвальна техніка та технології біомедичних досліджень

Секція 7 Неруйнівний контроль, технічна та медична діагностика, підготовка фахівців галузі

Секція 8 Енергозбереження, енергоефективність. Інформаційно-вимірвальні технології обліку енергоносіїв

Секція 9 Метрологічні аспекти вимірювання маси

Секція 10 Автоматизація експериментальних досліджень

Секція 11 Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології

Реєстрація на сайті конференції

<http://conferences.uran.ua/> | <http://conferencepb.kpi.ua/conferencepb2024/>

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ ТОНКОЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

А.С. Новодранов, Є.В. Шаповалов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: artur19940731@gmail.com

Зважаючи на швидкість розвитку виробництв тонколистових матеріалів застосування автоматизованих систем виявлення поверхневих дефектів у таких výroбах стає все більш актуальним. Обумовлено це тим, що завчасно виявлений дефект зменшує кількість відходів та підвищує продуктивність виробництва шляхом зменшення часу простою обладнання. Метою статті є огляд сучасних автоматизованих систем візуального контролю поверхневих дефектів на тонколистових матеріалах для оцінки їх ефективності, переваг та обмежень. У статті розглянуто та проаналізовано автоматизовані системи пошуку поверхневих дефектів на різних виробництвах – металевому, паперовому та ткацькому прокатах. Показано, що системи такого класу найчастіше виконуються у стаціонарній конфігурації безпосередньо на верстатах або прокатних машинах, але є системи, які крім стаціонарної реалізації мають портативну версію, яка монтується на діагностичному візку. Розглянуто складові частини апаратної підсистеми, а саме визначено переваги застосування інтелектуальних камер у порівнянні з камерами лінійного сканування. Визначено переваги застосування стробоскопічного освітлення у порівнянні зі звичайними LED прожекторами. Розглянуто програмну підсистему, а також визначено, що застосування методів штучного інтелекту, а саме нейронних мереж із машинним навчанням, є перспективним вектором розвитку таких систем. Бібліогр. 36, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: автоматизований візуальний контроль, дефекти тонколистових матеріалів, металеві тонколистові матеріали, автоматизовані системи контролю

Вступ. Інтенсивний розвиток виробництв тонколистових металевих і неметалевих матеріалів потребує забезпечення високої якості продукції, що випускається. Наявні системи управління формуванням тонколистового полотна достатньо складні та не завжди ефективно реагують на деякі небажані фактори, що чинять вплив на процес виробництва і призводять до виникнення обривів, нерівномірного розподілу листового матеріалу за шириною формуючої машини, утворення дефектів по краях полотна та ін. Застосування автоматизованих систем контролю дефектності тонколистових матеріалів дає змогу виявити всі вищенаведені недоліки старих систем [1, 2]. Варто зазначити, що використання автоматизованих систем моніторингу поверхневих дефектів у першу чергу доцільно на ткацьких [3, 4], металопрокатних [5], а також паперово-картонних [6, 7] виробництвах. Використання автоматизованих систем моніторингу дає можливість контролювати в режимі реального часу якість листових матеріалів, а також підвищує продуктивність і знижує вплив людського фактору на процес виробництва. Системи такого типу можна віднести до візуального методу неруйнівного контролю, який не потребує безпосереднього механічного контакту з прокатом полотна та запобігає пошкодженню або забрудненню поверхні.

Зазвичай системи візуального контролю тонколистових матеріалів складаються з апаратної

та програмної частини. Апаратна складова таких систем забезпечує захоплення потокового зображення прокату полотна та його передачу на сервер для подальшої програмної обробки [8, 9]. У свою чергу програмна частина складається із сукупності алгоритмів обробки зображень, методів машинного навчання та класифікатора дефектів, частіше на базі нейромережевої технології [10]. За результатами класифікації знайденого дефекту автоматизована система приймає рішення про подальші кроки, такі як зупинка формуючої машини або занесення даних про незначний дефект в електронний журнал із зазначенням точного часу виявлення дефекту та його збільшеним зображенням для подальшої звітності.

Складові частини автоматизованої системи моніторингу якості тонколистових матеріалів. Для досягнення високої швидкості та точності виявлення поверхневих дефектів не підходять традиційні методи ручного візуального неруйнівного контролю через низку недоліків, до яких можна віднести низьку точність і продуктивність, а також погану адаптацію до умов навколишнього середовища. Зі швидким розвитком комп'ютерного зору автоматизація моніторингу поверхневих дефектів все більше й більше застосовується у виробництві металопрокату сталі, алюмінію, міді та інших металів, а також у паперово-картонному, ткацькому та інших подібних виробництвах

Новодранов А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3380-3745>, Шаповалов Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5063-9556>

© А.С. Новодранов, Є.В. Шаповалов, 2024

[11]. У загальному випадку автоматизована система моніторингу якості тонколистових матеріалів (рис. 1) складається з апаратної та програмної підсистем.

До апаратної підсистеми можна віднести світильники (О-1–О-7), в якості яких можуть виступати LED прожектори, промислові високошвидкісні камери (К1–К2), контролери живлення, мережеве обладнання, сервери та інтерфейсні кабелі. Умови освітлення відчутно впливають на якість вихідного зображення. Застосувавши достатню кількість освітлювачів, а також розмістивши їх рівномірно вздовж контрольованої ділянки полотна, можна досягти зменшення рівнів шуму зображення, тіней та відблисків. Правильно розташоване освітлення в подальшому спрощує попередню обробку зображення. Головною частиною промислової камери є матриця, яка перетворює зображення у цифровий відеосигнал. Зображення на матриці отримується шляхом фокусування світла, відбитого від поверхні досліджуваного об'єкту за допомогою об'єктиву камери. При проектуванні оптичної системи слід визначити фокусну відстань, від якої буде залежати кут огляду та масштаб зображення. Наприклад, об'єктив із фокусною відстанню 8 мм має ширший кут огляду, ніж із 4 мм. Але об'єктив із фокусною відстанню 4 мм, маючи вужчий кут огляду, забезпечує більшу деталізацію зображення. Підбір цих та інших параметрів залежить від поставленої задачі [12]. Найчастіше використовують промислові кольорові або моно-камери (рис. 2) з роздільною здатністю 2...5 мегапікселів, частотою кадрів 50...60 fps та інтерфейсом передачі даних Gigabit Ethernet. До найпоширеніших виробників промислових камер можна віднести Basler, Vision Research, IDT і Photron. Для роботи автоматизованих систем на ділянках, які виходять за межі поля зору однієї камери, застосовують декілька камер з подальшим програмним об'єднанням і перекриттям. До мере-

жевого обладнання можна віднести Gigabit комутатори для забезпечення обміну даними між камерами та сервером за протоколами TCP або UDP. Інколи умови на виробництві вимагають застосування швидкісних комутаторів з функцією PoE для живлення промислових камер або іншого обладнання постійною напругою 12/24 В.

До програмної підсистеми належить наступне програмне забезпечення:

- модуль попередньої обробки зображень;
- модуль об'єднання декількох відеопотоків в один;
- протокол синхронізації декількох камер;
- модуль машинного навчання;
- модуль розпізнавання та класифікації дефектів;
- модуль прийняття рішень;
- модуль реєстрації та архівації даних.

У типовому випадку реалізації системи камери та освітлювачі розміщені горизонтально та паралельно до поверхні досліджуваного полотна. Камери розташовані так, щоб перекривати одна одну для недопущення пропуску дефектних ділянок. Зображення, отримані за допомогою високошвидкісних камер, передаються до серверу обробки. Далі спеціалізоване програмне забезпечення виконує зведення зображень з декількох камер та їх попередню обробку. У випадку розпізнавання дефекту виконується його класифікація за допомогою залучення нейронної мережі [14]. У залежності від визначеного класу дефекту модуль прийняття рішень визначає подальші дії системи, а саме повну зупинку системи та ін. [15].

Автоматизовані системи розпізнавання дефектів на металопрокатних виробництвах. Застосування автоматизованих систем розпізнавання поверхневих дефектів насамперед актуально для виробництв із виготовлення фольги з алюмінієвих і мідних сплавів. Також доцільне застосування на більш специфічних виробництвах фольги

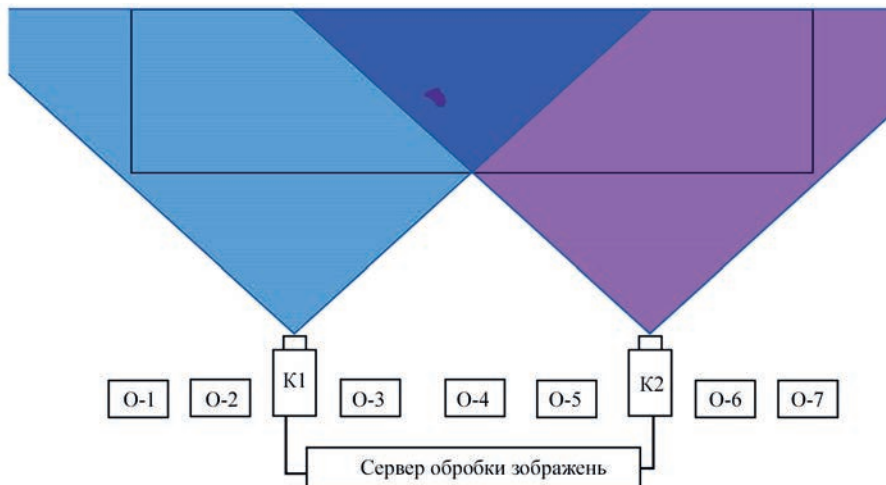


Рис. 1. Типова схема автоматизованої системи контролю дефектності тонколистових матеріалів



Рис. 2. Промислова швидкісна камера Basler Ace [13]

з кобальту або нікелю. До типових поверхневих дефектів металопрокатних виробництв належать масляні плями, подряпини та дірки, нерівності, а також плями корозії [16].

Наприклад, американська компанія Wintriss Engineering Corporation розробляє високоефективні системи Web Ranger (рис. 3) для виявлення дефектів на тонколистових металевих матеріалах. Такі системи можуть бути налаштовані на роботу з плівками, металами, тканиною та папером. Виробник заявляє про можливість розпізнавання найменших і найтонших дефектів за рахунок інтелектуальних камер OPSIS Smart Vision, а також запатентованої системи освітлення. Інтелектуальні камери лінійного сканування обробляють потокове відео в режимі реального часу. За допомогою вбудованого процесора PowerPC дана камера може працювати без сервера за рахунок вбудованих п'яти двовимірних програмних фільтрів, які паралельно обробляють зображення під час сканування поверхні, а також відеобуферу на 1 Гб. За допомогою інтерфейсу Ethernet камера може об'єднуватися з іншими камерами та головним комп'ютером. Швидкість сканування даної камери становить до 640 мегапікселів на секунду [17].

Також слід згадати німецьку компанію IMS Experts, яка розробляє системи контролю для чорної та кольорової металургії. Їх розробку для автоматизованого контролю досліджуваних поверхонь SURCON 2D наведено на рис. 4. Дана система здатна розпізнавати найменші поверхневі дефекти (0,4 мм) у найскладніших виробничих умовах, таких як обмежений простір, середовища з випаровуванням масла або кислот, а також проводити моніторинг поверхні одночасно з двох сторін. Ширина та довжина полотна не обмежена, а максимальна швидкість прокату досягає 1900 м/хв. Апаратна частина складається з Gigabit Ethernet камери лінійного сканування з роздільною здатністю до 8192 пікселів і частотою кадрів до 140 кГц. У якості освітлення використовуються потужні світлодіоди з довжиною хвилі 450...630 нм і активною потужністю понад 500 Вт/м². У якості класифікатора дефектів використовується попередньо навчена за допомогою машинного навчання нейронна мережа. Також можливою є функція паралельної класифікації з використанням декількох класифікаторів для збільшення точності розпізнавання. На додаток корпус системи оснащений повітряним охолодженням для забезпечення



Рис. 3. Автоматизована система Web Ranger для металопрокатного виробництва [18]



Рис. 4. Автоматизована система контролю поверхонь SURCON 2D [20]

роботи на тривалому відрізку часу, а також захистом системи від бризок, пилу, а також бруду [19].

Американська компанія АМЕТЕК Surface Vision розробила модульну систему (рис. 5) для моніторингу поверхневих дефектів на сталі, алюмінії, міді та навіть папері. Дана система оснащена високошвидкісною лінійною камерою з роздільною здатністю 4K 160 МГц, апаратним забезпеченням датчиків власної розробки SmartView SPU, а також лінійними світильниками високої інтенсивності. Програмну частину реалізовано за допомогою штучного інтелекту на базі нейронної мережі, що дозволяє отримати ви-



Рис. 5. Автоматизована система моніторингу поверхні SmartView [22]

сокий рівень розпізнавання та класифікації. Конфігурація оптичного модуля камери забезпечує роздільну здатність пікселя 0,2 мм² із повітряним обдувом для виключення можливості забруднення оптики. Також слід відзначити великий обсяг пам'яті відеобуферу, який сягає 30 год потокового запису [21].

Автоматизовані системи розпізнавання дефектів на паперово-картонних виробництвах. Враховуючи швидкість розвитку паперово-картонної промисловості, головною метою таких підприємств є зменшення кількості дефектів і розривів полотна шляхом удосконалення формуючого обладнання. На цей час найкращим рішенням для зменшення кількості відмов є інтеграція автоматизованих модулів виявлення дефектів в існуючу систему. Типовими дефектами, які негативно впливають на якість матеріалів паперово-картонних виробництв, є: дірки, яскраві та чорні плями, шорсткі краї, подряпини, складки, а також розриви полотна [23].

Наприклад, австрійська компанія IBS-Paper Performance Group в об'єднанні з канадською компанією Papertech розробили автоматизовану систему виявлення дефектів паперового полотна WebInspector (рис. 6). Дана система представлена у трьох конфігураціях у залежності від особливостей виробництва:

- балкова конструкція (рис. 6, а). Даний тип має найвищий ступінь захисту від негативних факторів навколишнього середовища;
- портативна пересувна конструкція (рис. 6, б). Дана система за рахунок своєї мобільності та адаптивності дає змогу проводити моніторинг поверхонь у важкодоступних місцях;
- конструкція типу WebView (рис. 6, в). Даний тип конструкції є спрощеним і дешевшим варіантом балкової конструкції. Конфігурація камер і можливості програмної частини залишилися незмінними.

У якості апаратної частини системи можуть виступати швидкісні промислові камери GigE-стандарту моно або кольорові, з роздільною здатністю матриці понад 2 Мп і частотою 30...1000 зображень на секунду. У якості джерел світла використовуються LED, ксенонові або люмінесцентні прожектори WebLED власної розробки, які повністю синхронізуються з камерами. Програмна частина системи TotalVision працює на базі нейронної мережі. Класифікатор системи виявляє поверхневі дефекти, визначає їх клас та позначає його на карті дефектів котушки [25].

Також варто відзначити фінську компанію Valmet Oyj, яка розробила автоматизовану систему Valmet IQ Web Inspection System (рис. 7) для моніторингу поверхневих дефектів і підви-



Рис. 6. Автоматизована система WebInspector: *а* – балкова конструкція; *б* – портативна; *в* – конструкція типу WebView [24, 25]

щення якості. Апаратна частина складається зі швидкісних промислових матричних камер із роздільною здатністю 0,3...0,8 мм, які синхронізовані з потужними стробоскопічними LED світильниками, які можуть бути розміщені як над полотном, так і під ним для отримання зображень дефектів під різним кутом освітлення. Такий підхід забезпечує підвищення якості розпізнавання та класифікації. Для обміну даними між оптичною системою та серверами обробки зображень застосовуються оптоволоконні кабелі для зниження впливу електромагнітних перешкод. Дана система використовує новітню технологію машинного зору для виявлення та класифікації дефектів на основі нейронних мереж [26]. Для визначення класу небезпеки дефектів застосовується технологія MIDA [27] від німецького виробника Schenk Vision. Дана техно-

логія використовує декілька джерел світла, серед яких може застосовуватися також інфрачервоне, для отримання серії зображень одного дефекту за різного освітлення і один прохід сканування. Такий підхід оцінювання якості полотна забезпечує надійність і високий відсоток розпізнавання та класифікації поверхневих дефектів.

Фінська компанія Proscemex розробила систему виявлення дефектів паперового полотна Proscemex Paper Web Inspection System (рис. 8). Дана система може бути представлена у восьми геометричних реалізаціях під конкретну виробничу задачу, зокрема:

- огляд полотна під високим кутом (рис. 8, *а*). Дана реалізація найкраще підходить для випадків, коли необхідно виявляти лише дефекти з однієї сторони поверхні. При такому варіанті камери встановлюються під кутом 90° до поверхні полотна, а освітлювальні пристрої – під кутом 60°;



Рис. 7. Автоматизована система Valmet IQ Web Inspection System [28]

- огляд полотна під низьким кутом (рис. 8, б). Дана реалізація найкраще підходить для виявлення дуже маленьких дефектів на поверхні полотна, таких як смуги та пропуски, і не замінє собою вище описану конструкцію. При такій реалізації кут нахилу камери та освітлювальних пристроїв відносно полотна складає 15...20°;
- огляд полотна методом пропускання світла (рис. 8, в). Дана реалізацію ґрунтується на встановленні освітлювальних пристроїв під прокатом полотна та пропусканні світла безпосередньо через матеріал виробництва. Така реалізація системи виявлення дефектів обґрунтована тоді, коли не важливо, з якого боку поверхні знаходиться дефект;
- огляд полотна під високим кутом і пропусканні світла (рис. 8, з). Дана реалізація забезпечує найвищий рівень виявлення дефектів за рахунок розширеної та надійнішої класифікації. Внаслідок двох незалежних вимірювань (відбиття та пропус-

кання) інтелектуальна камера може контролювати двокадрове пульсування світлового потоку. Сервери обробки аналізують зображення, отримані під час двох вимірювань за один прохід, тим самим підвищуючи загальний рівень розпізнавання та класифікації;

- огляд полотна з бічним освітленням (рис. 8, д). Дана реалізація системи поєднує в собі метод пропускання світла та бокового освітлення. За допомогою цих методів стає можливим виявлення дефектів, таких як зморшки та деформація поверхні полотна шляхом аналізу тіні. Для забезпечення необхідного ефекту тіні кут освітлення встановлюється дуже низьким. Таке перехресне освітлення усуває проблему підсвічування краю паперового полотна за рахунок того, що прожектори освітлюють ділянки від середини до країв полотна;

- 3D огляд виявлення дефектів (рис. 8, е). Дана система зазвичай монтується в безпосередній близькості до опорного рулону. Така конструкція дає змогу виявляти вм'ятини, а також великі дефекти з високою точністю розпізнавання та класифікації. При такій реалізації камера розташована під кутом 90° до поверхні прокату полотна, а освітлювальне обладнання – під кутом 10°.

Загалом така система може бути налаштована на виробництво газетного або журнального паперу, серветок або картону. Інтелектуальні камери Procemex Smart Camera даної системи дають змогу виявляти дефекти у моно або кольоровому режимі з роздільною здатністю 12 Мп. Також інтелектуальні камери виконують попередню обробку та класифікацію на основі інформативної про колір. Система здатна працювати з найвищою швидкістю до 700 мільйонів пікселів на секунду. Застосування стробоскопів за-

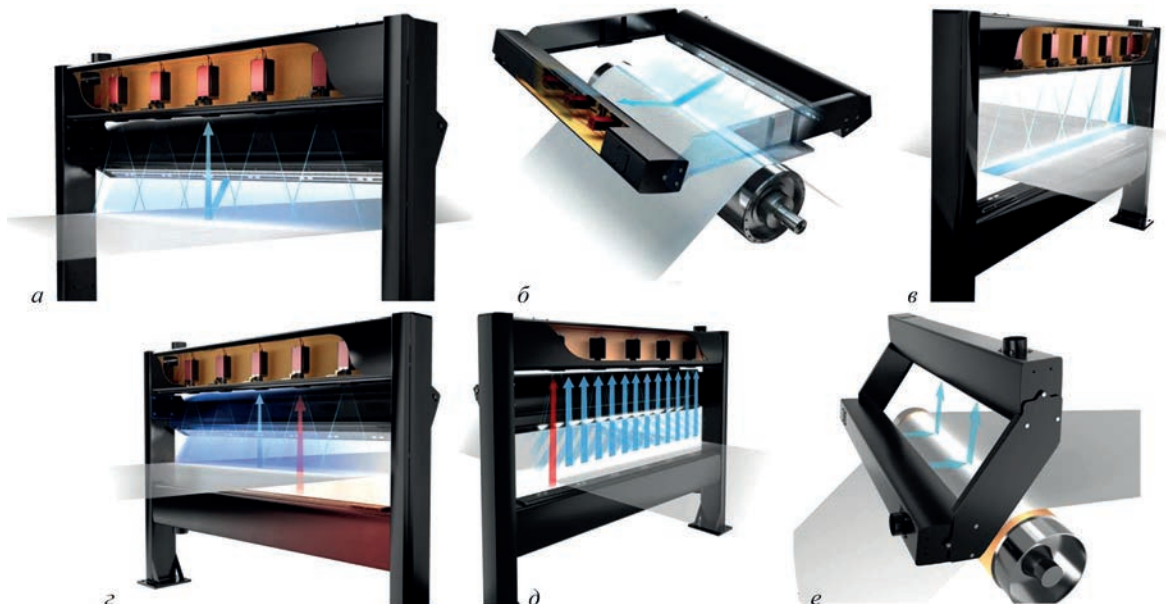


Рис. 8. Автоматизована система контролю Procemex Paper Web Inspection System [29]

мість метало-галогенних освітлювачів дозволяє в 15 разів зменшити споживання електроенергії та виділення тепла, а також продовжити термін експлуатації світлодіодів. Така технологія освітлення та застосування надчутливого датчика CMOS забезпечує час експозиції 5...20 мкс, що призводить до отримання чітких і чистих зображень [30].

Автоматизовані системи розпізнавання дефектів на ткацьких виробництвах. Застосування автоматизованих систем виявлення та класифікації поверхневих дефектів на ткацьких виробництвах дозволяє зменшити кількість браку на ранніх стадіях, тим самим підвищити якість і продуктивність. Підвищення продуктивності досягається швидким реагуванням на виявлені дефекти та прийняттям рішення про подальші дії. Таким чином, інтеграція модулів виявлення дефектів у вже існуючі ткацькі системи призводить до випуску високоякісної продукції з дотриманням усіх стандартів цієї галузі. До типових дефектів ткацького виробництва можна віднести зміщені, втрачені або сторонні волокна, масляні плями, відхилення від базової структури, зморшки та ін. [31].

Нідерландська компанія COMVIS розробила автоматизовану систему перевірки дефектності тканини Profiler (рис. 9) у двох варіантах: універсальний модуль (рис. 9, а) і модуль для ткацьких верстатів (рис. 9, б). Швидкість прокату такої системи сягає 100 м/хв. Апаратна частина представлена камерами лінійного сканування Areascan, джерелами світла, що представлені модулем власної розробки Profile Backlight для про-

зорих і напівпрозорих тканин, а також передніми ліхтарями для непрозорих тканин. Програмна частина забезпечує повністю автоматичну перевірку ткацького полотна за допомогою системи невидимих чорнильних марок або аплікатора етикеток. Модуль виявлення, розпізнавання та класифікації дефектів Teexplorer CORE за допомогою сучасних алгоритмів визначає всі відхилення або дефектні області, а також краї ткацького полотна [32, 33].

Також варто відзначити англійську компанію Shelton Vision, яка розробила систему пошуку дефектів ткацького виробництва WebSPECTOR (рис. 10). Швидкість прокату для такої системи сягає понад 100 м/хв. Апаратна частина представлена декількома камерами лінійного сканування, розміщеними по ширині полотна із вбудованими датчиками контролю кольору c-text color. У якості конфігурації освітлення в залежності від задачі можуть бути застосовані дифузійне верхнє або заднє освітлення, тінь під низьким кутом або тінь збоку під низьким кутом. Програмна частина системи включає в себе алгоритми машинного навчання для виявлення та класифікації дефектів за типом, а також визначення ступеня небезпечності того чи іншого дефекту в реальному часі. Використання карти дефектів призводить до зменшення кількості відходів, а також підвищення продуктивності виробництва [34].

Зведені технічні характеристики автоматизованих систем контролю дефектів тонколистових матеріалів для порівняння наведено у таблиці.

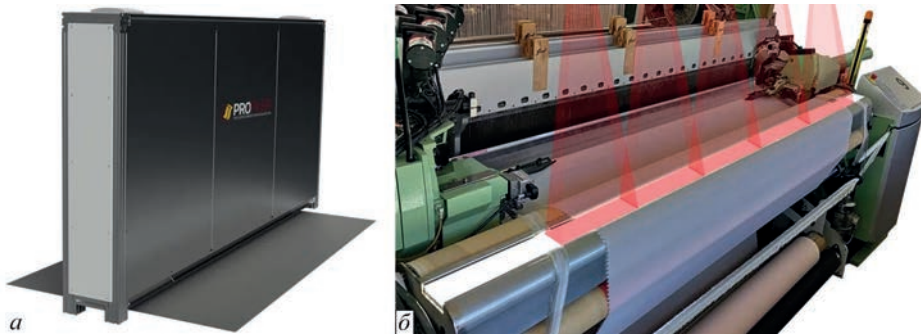


Рис. 9. Автоматизована система COMVIS Profiler [32, 33]



Рис. 10. Автоматизована система Shelton Vision WebSPECTOR [35, 36]

Зведені технічні характеристики автоматизованих систем контролю дефектів тонколистових матеріалів

Назва системи	Об'єкт контролю	Тип конструкції	Тип освітлення	Технологія програмної частини
Web Ranger	Метал, тканина, папір, плівка	Стационарна	LED прожектори	Нейромережева
SURCON 2D	Метал	Стационарна	LED прожектори	Нейромережева
SmartView	Метал, папір	Модульна	Лінійні світильники	Нейромережева
WebInspector	Метал, папір	Портативна, стационарна	Ксенонові або люмінесцентні прожектори	Нейромережева
Web Inspection System	Папір	Модульна	Стробоскопічні LED світильники	Нейромережева
Procemex Paper Web Inspection System	Папір	Стационарна, модульна	Стробоскопічні LED світильники	Нейромережева
Profiler	Метал, папір, тканина	Стационарна, модульна	LED прожектори	Нейромережева
Shelton Vision Web Inspector	Тканина	Стационарна	LED прожектори	Нейромережева

Висновки

За результатами аналізу функціональних можливостей автоматизованих систем контролю дефектів тонколистових матеріалів можна зробити висновок, що застосування таких систем призводить до підвищення продуктивності виробництва шляхом завчасного виявлення дефектів і зменшення кількості відходів. Оснащення такими системами автоматизованих ліній дозволяє зменшити вплив людського фактору на процес виробництва.

У процесі аналізу було визначено, що розглянуті системи Web Ranger і Profiler є універсальними, тобто здатні розпізнавати дефекти на поверхнях починаючи з паперу, завершуючи металевим прокатом і тканиною. Порівнюючи апаратну частину можна зробити висновок, що переважно застосовуються швидкісні промислові камери, але компанії Procemex і Wintriss Engineering Corporation оснащують свої системи інтелектуальними камерами, які можуть виконувати попередню обробку зображень і працювати як окремі модулі. У якості систем освітлення в найпростіших конфігураціях застосовується верхнє освітлення під високим кутом, а саме 90° до досліджуваної поверхні. Але системи SURCON, IQ Web Inspection System і Paper Web Inspection System мають конфігурації розміщення освітлення під високим або низьким кутом із використанням метода просвічування або поєднання декількох варіантів у залежності від матеріалу. У якості джерел освітлення зазвичай використовують LED світильники, проте в системах IQ Web Inspection System і Paper Web Inspection System застосовано стробоскопічні LED прожектори, що дозволяє зменшити енерговитрати, продовжити термін служби світлодіодів, а також підвищити якість зображення. Серед варіантів монтажу найчастіше застосовують стационарну конфігурацію безпосередньо на виробничій лінії. Проте система WebInspector має варіант портативної реалізації на діагностичному візку, а системи Profiler і

WebSPECTOR можуть бути використані як окремі модулі. У якості програмної частини всі розглянуті системи застосовують власне програмне забезпечення на базі нейронних мереж із використанням методів машинного навчання та схожі за функціональними можливостями. До типових функцій програмного забезпечення подібних систем можна віднести віддалене керування, карту дефектів, візуалізацію результатів, систему сповіщення та звітності та ін. Щодо цінової політики таких систем, то у відкритому доступі інформація відсутня. Для отримання інформації про вартість таких систем необхідно надіслати технічне завдання відповідальним особам для розрахунку.

Список літератури/References

- Goebbels, K., Ferrano, G. (1988) Automation of surface defect detection and evaluation. Proc. SPIE 0849, Automated Inspection and High-Speed Vision Architectures, 22 March 1988. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.942832>
- Malamas, E.N., Petrakis, E.G.M., Zervakis, M. et al. (2003) A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image Vis. Comput.*, 21(2), 171–188. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00152-X)
- Norton-Wayne, L., Bradshaw, M., Jewell, A.J. (1992) Machine vision inspection of web textile fabric. *BMVC*, 1, 217–226. DOI: <https://doi.org/10.5244/C.6.23>
- Kumar, A. (2008) Computer-vision-based fabric defect detection: A survey. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 55(1), 348–363. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.1930.896476>
- Shao, X., Xia, X., Song, J. (2022) Design and research of metal surface defect detection based on machine vision. *11th International Conference of Information and Communication Technology*, 406–410. DOI Bookmark: <https://doi.org/10.1109/ICTech55460.2022.00087>
- Huotilainen, T., Laster, M., Riikonen, S. (2019) Real-time paper and paperboard quality analysis and classification based on paper formation or surface appearance in web inspection system. *Conference Paper-Con, May2019, Indianapolis, USA*.
- Bissessur, Y., Martin, E., Morris, A. (1999) Monitoring the performance of the paper making process. *Control Eng. Pr.*, 7(11), 1357–1368. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00105-7)
- Xiaoxin Fang, Qiwu Luo, Bingxing Zhou, Congcong Li and, Lu Tian (2020) Research progress of automated visual surface defect detection for industrial metal planar materials. *Sensors*, 20(8), 5136. DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00105-710.3390/s20185136](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00105-710.3390/s20185136)
- Luo, Q., He, Y. (2016) A cost-effective and automatic surface defect inspection system for hot-rolled flat steel. *Robot.*

- Comput. Integr. Manuf.*, **38**(C), 16–30. DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00105-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00105-7). 10.1016/j.rcim.2015.09.008
10. Singh, Swarit & Desai, Kaushal (2022) Automated surface defect detection framework using machine vision and convolutional neural networks. *J. of Intelligent Manufacturing*, **34**(4), 1995–2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01878-w>
 11. Francisco G. Bulnes, Ruben Usamentiaga, Daniel F. Garcia, Julio Molleda (2012) Vision-based sensor for early detection of periodical defects in web materials. *Sensors*, **12**(8), 10788–10809. DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00105-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00105-7). 10.3390/s120810788
 12. Telljohann, A. (2007) *Chapter 2. Introduction to building a machine vision inspection*. In: Handbook of Machine Vision; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 35–71.
 13. Basler, AG [Електронний ресурс]. Basler ace aca1920-48gm. <https://www.baslerweb.com/en/shop/aca1920-48gm/>
 14. Chang, C.A., Su, C.T. (1995) A comparison of statistical regression and neural network methods in modeling measurement errors for computer vision inspection systems. *Comput. Ind. Eng.*, **28**(3), 593–603. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(94\)00211-5](https://doi.org/10.1016/0360-8352(94)00211-5)
 15. Brzakovic, D., Vujovic, N. (1996) Designing a defect classification system: A case study. *Pattern Recog.*, **29**(8), 1401–1419. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(95\)00166-2](https://doi.org/10.1016/0031-3203(95)00166-2)
 16. Duan, X., Duan, F., Han, F. (2011) Study on surface defect vision detection system for steel plate based on virtual instrument technology. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Control, Automation and Systems Engineering, Singapore*. DOI: <https://doi.org/10.1109/IC-CASE.2011.5997625>
 17. (2014) Wintriss Engineering [Електронний ресурс]. *OPISIS Smart Vision*. <https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/crawler/weco.com/682af94e91931264471d0a90eb777fbd.pdf>
 18. Wintriss Engineering [Електронний ресурс]. *Metals Solution*. <https://www.weco.com/metals>
 19. (2020) IMS Messsysteme GmbH [Електронний ресурс]. *Optical measuring systems surcon 2D surface inspection for Cold Rolling Mills & Processing Lines*. <https://www.ims-experts.com/wp-content/uploads/2020/12/TIN-2D-Surface-Inspection-Systems-for-Cold-Rolling-Mills-and-Processing-Lines.pdf>
 20. IMS Messsysteme GmbH [Електронний ресурс]. *Surcon 2D surface inspection system*. <https://www.ims-experts.com/en/measuring-system/surface-inspection-system-surcon-2d-metal-service-centres/>
 21. (2019) AMETEK Surface Vision [Електронний ресурс]. *Metals surface inspection*. https://www.ameteksurfacevision.com/-/media/ameteksurfacevisionv2/documentation/industry-brochures/metals/ametek_surface_vision_metals_brochure_rev3_en.pdf
 22. AMETEK Surface Vision [Електронний ресурс]. *Surface Vision*. https://www.ameteksurfacevision.com/-/media/AmetekSurfaceVisionV2/Documentation/CaseStudies/AMETEK_Surface_Vision_Arania_Case_Study_Rev2_KO.pdf
 23. Strokina, N., Eerola, T., Lensu, L., Kälviäinen, H. (2011) Adaptive classification of dirt particles in papermaking process. *Image Analysis – 17th Scandinavian Conference, SCIA 2011, Ystad, Sweden*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-21227-7_68
 24. IBS Austria GmbH [Електронний ресурс]. *Camera based trouble shooting*. <https://www.ibs-ppg.com/en/products/detail/camera-based-trouble-shooting>.
 25. Papertech [Електронний ресурс]. *Web inspection*. <https://www.papertech.ca/web-inspection/>
 26. Valmet Corporation [Електронний ресурс]. *Valmet IQ Web inspection system*. <https://valmet.my.salesforce-sites.com/solutionfinderweb/sfc/servlet.shepherd/version/download/06858000026M9GAAU>
 27. Dr. Schenk GmbH [Електронний ресурс]. *MIDA – Superior defect detection and classification*. <https://www.drshenk.com/news-article/mida-superior-defect-detection-and-classification-15/>
 28. Dr. Schenk GmbH [Електронний ресурс]. *Paper inspection*. <https://www.drshenk.com/products/paper-inspection.html>
 29. Procemex [Електронний ресурс]. *Measurement geometries*. <https://www.procemex.com/web-inspection/measurement-geometries/#low-angle-web-inspection>
 30. Procemex [Електронний ресурс]. *Web inspection system*. <https://www.procemex.com/web-inspection/>
 31. Dr. Schenk GmbH [Електронний ресурс]. *Textile inspection*. <https://www.drshenk.com/products/structured-surfaces/textile-inspection.html>
 32. COMVIS – Company in vision [Електронний ресурс]. *Profiler™ for Looms*. <https://comvis.com/inspection-systems/profiler-for-looms/>
 33. COMVIS – Company in vision [Електронний ресурс]. *Profiler™ Fabric Inspection*. <https://comvis.com/inspection-systems/profiler-automatic-fabric-inspection/>
 34. Shelton Machines Ltd [Електронний ресурс]. *Machine vision solutions*. <https://www.sheltonvision.co.uk/visual-inspection-systems/machine-vision-solutions/>
 35. Indian Textile Journal [Електронний ресурс]. *Shelton vision: Beyond big data and tailored for textiles*. <https://indiantextilejournal.com/shelton-vision-beyond-big-data-and-tailored-for-textiles/>
 36. IndiaMART [Електронний ресурс]. *Fully automatic camera based inspection machine, for fabric checking*. <https://www.indiamart.com/proddetail/fully-automatic-camera-based-inspection-machine-23747914755.html>

AUTOMATED VISUAL CONTROL SYSTEMS FOR SURFACE DEFECTS IN THIN-SHEET MATERIALS (Review)

A.S. Novodranov, E.V. Shapovalov

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: artur19940731@gmail.com

Taking into account the speed of development in the production of thin-sheet materials, the use of automated systems for detecting surface defects in such products is becoming more and more relevant. This is due to the fact that an early-detected defect reduces the amount of waste and increases production efficiency by reducing equipment downtime. The purpose of the paper is to review modern automated systems for visual inspection of surface defects on thin-sheet materials, in order to evaluate their effectiveness, advantages, and limitations. The paper examines and analyzes the automated systems for searching for surface defects in various industries, including metal, paper and weaving rolled stock. It is shown that systems of this class are most often performed in a stationary configuration directly on machine tools or rolling machines, but there are systems that, in addition to their stationary implementation, have a portable version that is mounted on a diagnostic cart. The components of the hardware subsystem are considered, namely, the advantages of using intelligent cameras in comparison with linear scanning cameras are outlined. The advantages of using stroboscopic lighting in comparison with conventional LED floodlights have been determined. The software subsystem was considered, and it was also determined that the use of artificial intelligence methods, namely neural networks with machine learning, is a promising vector for development of such systems. 36 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: automated visual control, defects of thin-sheet materials, metal thin-sheet materials, automated control systems

Надійшла до редакції 05.02.2024,
Отримано у переглянутому вигляді 13.02.2024
Прийнято 21.03.2024

ПРИЧИННІ ФАКТОРИ ТА ПОХИБКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ДОСТОВІРНІСТЬ ОЦІНКИ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЕФЕКТІВ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ВИРОБІВ

В.О. Троїцький, В.Ю. Глуховський, В.А. Литвиненко

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

З метою підвищення достовірності оцінки теплофізичних і геометричних параметрів дефектів промислових об'єктів та виробів у процесі тепловізійного діагностування проведено аналіз причинних факторів та похибок, які впливають на результати процедури термографування. Визначено класи та вплив основних невизначеностей на параметри термографування. Бібліогр. 7, рис. 3.

Ключові слова: тепловізійний метод, причинні фактори, похибки, геометричні та теплофізичні параметри, неруйнівний контроль, промислові об'єкти, промислові димові труби

Вступ. Надійність системи контролю якості промислових об'єктів та виробів визначається функцією з виявлення та правильної оцінки кожного дефекту, вимірний параметр якого X дорівнює або перевищує значення X_0 , встановлене нормативно-технічною документацією. В результаті контролю у виробках, визнаних придатними, не повинно бути неприпустимих дефектів (за параметрами $X \geq X_0$), але при цьому мають бути забраковані лише ті об'єкти чи вироби, в яких є неприпустимі дефекти [1].

Відмовою системи контролю вважається невиконання нею своєї функції правильної оцінки придатності контрольованого об'єкту чи виробу. До відмов системи можна віднести випадки, коли за рахунок недобраковки до придатних виробів від-

носять ті, що містять неприпустимі дефекти. Іншою відмовою системи є перебраковка, тобто помилкове бракування виробу. Імовірності недобраковки та перебраковки часто використовують для оцінки працездатності системи контролю, її надійності, достовірності, ефективності.

Метою даної роботи є визначення загальної похибки із загальної кількості причинних факторів та похибок, що впливають на достовірність оцінки теплофізичних і геометричних параметрів дефектів промислових об'єктів та виробів на прикладі димових труб при їх діагностуванні тепловізійним методом [2, 3].

Методологія оцінки. Схематично процес визначення геометричних і теплофізичних параметрів дефектів багатошарової стінки димової труби

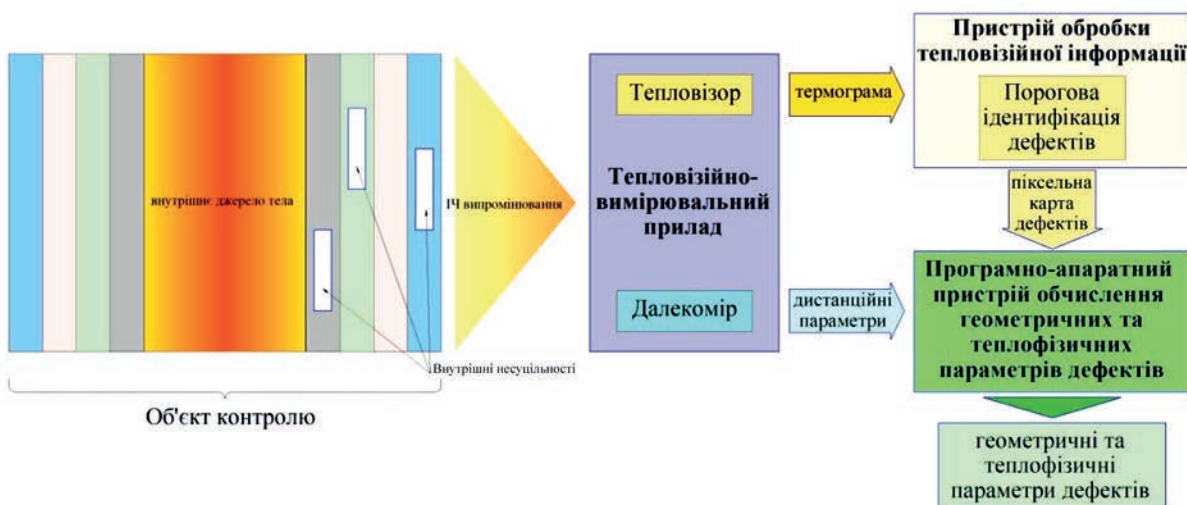


Рис. 1. Схема процесу визначення геометричних і теплофізичних параметрів дефектів при діагностуванні багатошарової стінки димової труби тепловізійним методом

Глуховський В.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-1969-495X>, Литвиненко В.А. – <https://orcid.org/0000-0003-3680-2198>
 © В.О. Троїцький, В.Ю. Глуховський, В.А. Литвиненко, 2024

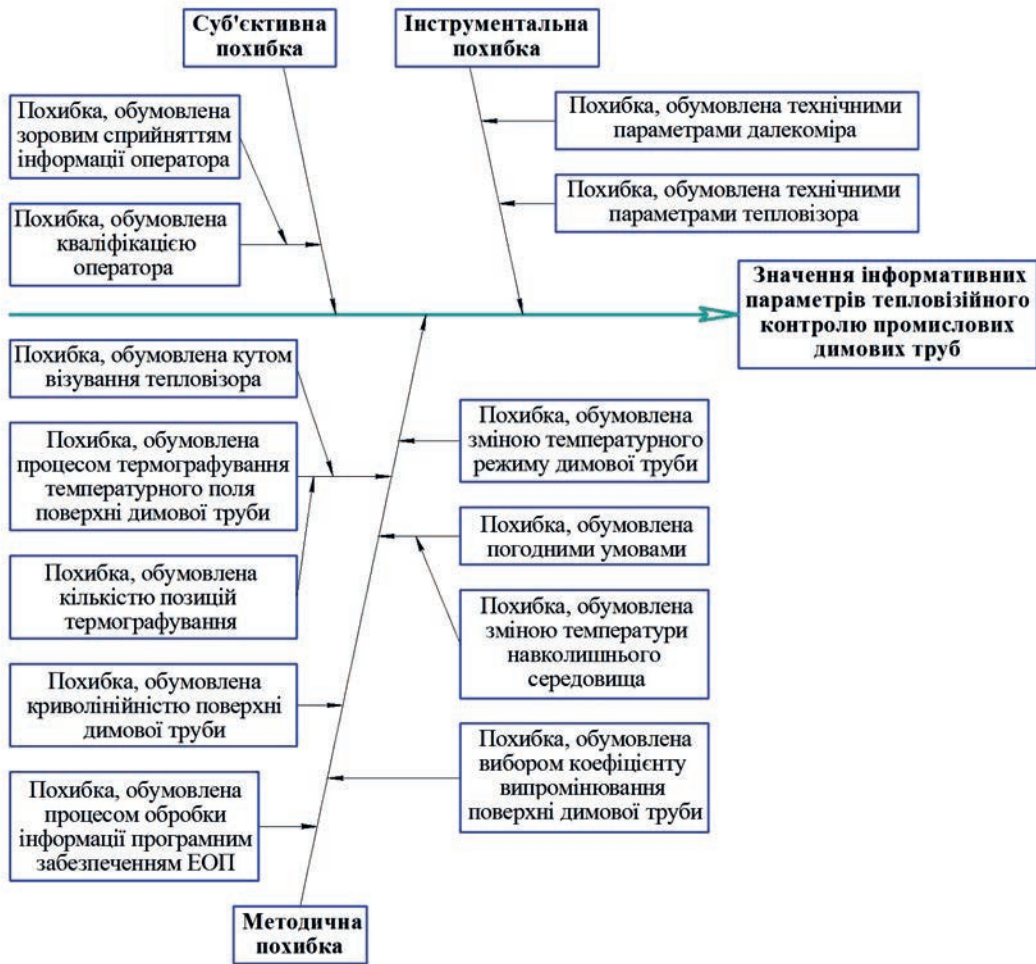


Рис. 2. Структурна схема причинно-наслідкової діаграми факторів та похибок, що впливають на кінцевий результат тепловізійного контролю

можна представити наступним чином (рис. 1), де в результаті процедури термографування поверхні виробу відбувається аналіз температурних полів з визначенням дефектних ділянок та обчисленням їх теплофізичних і геометричних параметрів.

Вплив причинних факторів на процедуру термографування температурного поля димової труби призводить до виникнення похибок, які, в свою чергу, впливають на достовірність порогової оцінки дефектів. Сукупність таких похибок можна умовно поділити на три класи: інструментальні, суб'єктивні та методичні.

Такий розподіл можна представити причинно-наслідковою діаграмою [4, 5], яка визначає взаємозв'язок між причинними факторами та похибками, які їх утворюють (рис. 2).

Горизонтальний вектор на діаграмі (рис. 2) позначає результат процедури термографування зовнішньої поверхні димової труби. Відгалуження від основного вектору є факторами похибок, що впливають на значення інформативних параметрів тепловізійного контролю.

Так, інструментальна похибка містить два причинних фактори, обумовлених параметрами техніч-

них засобів, а саме, технічними параметрами лазерного далекоміра та тепловізора.

Суб'єктивна похибка обумовлена, в основному, кваліфікацією оператора та його зоровим сприйняттям просторової інформації в процесі термографування.

Найбільший набір факторів похибок відноситься до методичної похибки, обумовлених процесом термографування температурного поля зовнішньої поверхні труби, погодними умовами під час термографування та процесом обробки отриманої інформації електронно-обчислювальним пристроєм (ЕОП) лазерно-термографічної системи.

Похибка, обумовлена процесом термографування зовнішньої поверхні димової труби, включає похибки, що виникають при визначенні геометричних параметрів термографування (дистанції контролю, кута візування та кута поля зору тепловізора) та кількості позицій термографування. Похибка, обумовлена погодними умовами, в основному пов'язана зі зміною температури навколишнього середовища та вологості в процесі термографування. До похибок, пов'язаних з параметрами димової труби, можна відне-

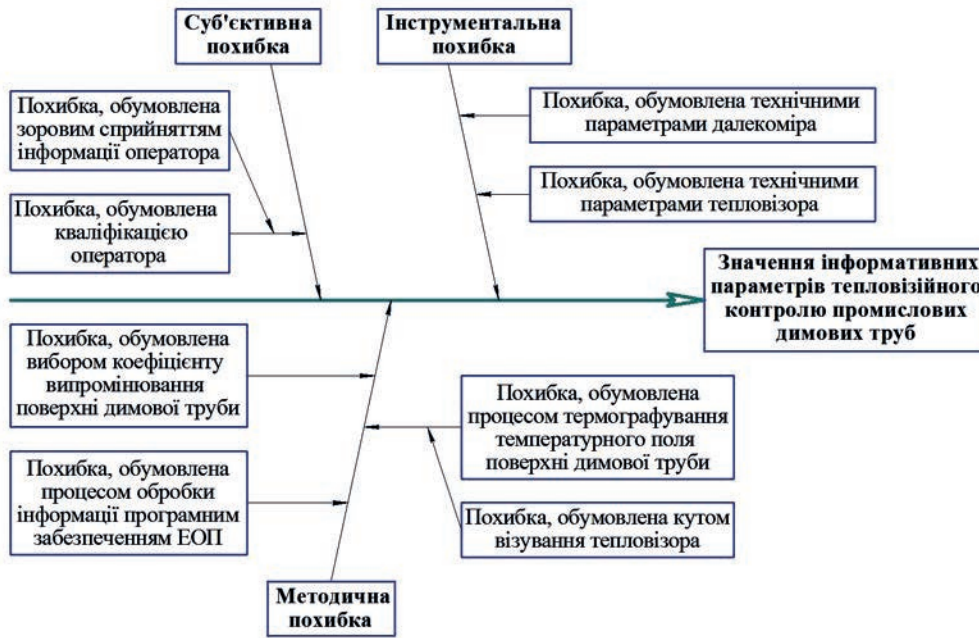


Рис. 3. Спрощена структурна схема причинно-наслідкової діаграми факторів та похибок, що впливають на кінцевий результат процесу термографування зовнішньої поверхні димової труби

сти похибки, пов'язані зі зміною температурного режиму всередині димової труби, вибором коефіцієнту випромінювання її зовнішньої поверхні та її криволінійністю.

Оцінку невизначеностей (непевностей) можна поділити на два типи:

- оцінка невизначеності за типом А – метод оцінювання невизначеності шляхом статистичного аналізу рядів спостережень, отриманих під час експерименту, що призводить до класичних в математичній статистиці оцінок: математичного очікування, дисперсії, кореляційного моменту;
- оцінка невизначеності за типом В – метод оцінювання невизначеності іншим способом, ніж статистичний аналіз, рядів спостережень.

Стандартну невизначеність за типом А отримують із функції щільності ймовірностей розподілу, що спостерігається, за частістю. Стандартну невизначеність за типом В, яку ще називають суб'єктивною ймовірністю, отримують із передбачуваної функції щільності ймовірностей, заснованої на впевненості в тому, що подія відбудеться [6].

Таким чином, на основі аналізу результатів термографування аномалій температурного поля на зовнішній поверхні димової труби визначено десять причинних факторів та обумовлених ними похибок, що можуть впливати на кінцевий результат. Визначивши малозначущі, загальну кількість факторів можна зменшити до семи, що спрощують структурну схему причинно-наслідкової діаграми (рис. 3).

Як малозначущі виключені похибки, обумовлені такими причинними факторами: зміною температурного режиму димової труби, зміною тем-

ператури навколишнього середовища, кількістю позицій термографування зовнішньої поверхні димової труби та криволінійністю її поверхні. Відмовитись від урахування наведених причинних факторів та похибок нам дозволяє те, що ми в своєму дослідженні при пасивному термографуванні зовнішньої поверхні димової труби розглядаємо її стаціонарне температурне поле, яке не змінюється в момент термографування. При цьому стаціонарне температурне поле можна розглядати як нестаціонарне, але у випадку, коли значення часу нагріву стінки труби прямує до нескінченності. При проведенні процедури термографування ми можемо враховувати вплив коливань температури навколишнього середовища. Вибір кількості позицій термографування поверхні труби більше трьох (чотирьох, п'яти) дозволяє також зменшити похибку при визначенні інформативних параметрів тепловізійного контролю.

Таким чином, у процесі діагностування димової труби тепловізійним методом можна обмежитись сімома основними причинно-наслідковими факторами та похибками, що впливають на результати термографування.

Суттєвий вплив при визначенні параметрів температурного поля несущільностей має суб'єктивна похибка, що пов'язана з кваліфікацією оператора-дефектоскопіста. Похибка може виникати в тому випадку, коли оператор не дотримується рекомендацій щодо початку роботи з тепловізором від моменту його увімкнення. Так, рекомендоване очікування після увімкнення тепловізора становить не менше ніж 20 хв, при цьому відхилення від еталонного значення температури

становить 0,4...1,1 °C [7]. У випадку, коли час очікування становить менше 20 хв, похибка вимірювання температури становить 0,3...1,8 °C відповідно. Важливо також використовувати сучасні тепловізори з високою чутливістю температури та роздільною здатністю.

Висновки

1. Вплив причинних факторів на процедуру термографування температурного поля димової труби призводить на виникнення похибок, які, в свою чергу, впливають на достовірність порогової оцінки дефектів.

2. Визначено три загальні групи невизначеностей, що виникають в процесі термографування поверхні димової труби та впливають на результати контролю, а саме: суб'єктивна, інструментальна та методична.

3. Встановлено, що суттєвий вплив при визначенні параметрів температурного поля несучільностей в процесі термографування має суб'єктивна невизначеність, що пов'язано з кваліфікацією оператора-дефектоскопіста.

4. Сукупністю причинних факторів можна керувати, як процесом, для оптимізації значень похибок з метою зменшення їх впливу на кінцевий результат термографування.

Список літератури

1. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. (2016) *Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник*. Ужгород, Видавництво УжНУ.
2. Бондаренко О.Г., Глуховський В.Ю. (2022) Розробка способу термографування зовнішньої поверхні димових труб дистанційним пасивним тепловізійним мето-

дом. *Техн. діагност. та неруйнів. контроль*, 3, 9–21. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.03>

3. Троїцький В.О., Бондаренко О.Г., Глуховський В.Ю. (2020) *Спосіб дистанційної пасивної теплової діагностики важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів*. Патент на винахід № 122355. Заявл. 27.06.2018. Опубл. 26.10.2020. Бюл. № 20.
4. Kauro Ishikawa (1985) *What is Totality Control? The Japanese Way*. Prentice-Hall.
5. Исикава К. (1988) *Японские методы управления качеством*. Москва, Экономика.
6. Демків І.Б. (2012) Вимоги щодо оцінки характеристик похибок (непевностей) вимірювання маси скраплених нафтових газів та їх інтегральних характеристик. (2012) *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 6, 14–20.
7. Вавилов В.П., Лариошина І.А. (2012) Методические погрешности тепловизионного энергоаудита строительных сооружений. *Вестник науки Сибири*, 5(6), 49–52.

References

1. Suslikov, L.M., Studenyak, I.P. (2016) *Nondestructive testing methods: Manual*. Uzhgorod, UzhNU [in Ukrainian].
2. Bondarenko, O.G., Glukhovskiy, V.Yu. (2022) Method of thermography of the outer surface of chimneys by remote passive thermal vision technique. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 3, 9–21. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.03> [in Ukrainian]
3. Troitskiy, V.O., Bondarenko, O.G., Glukhovskiy, V.Yu. (2020) *Method of remote passive thermal diagnostics of difficult-to-access and potentially dangerous industrial objects*. Pat. 122355., fill. 27.06.2018; publ. 26.10.2020 [in Ukrainian]
4. Ishikawa, K. (1985) *What is Totality Control? The Japanese Way*. Prentice-Hall.
5. Ishikawa, K. (1988) *Japanese methods of quality management*. Moscow, Ekonomika [in Russian].
6. Demkiv I.B. (2012) To the questions of estimation of correlation of the separate measuring and dynamic errors of descriptions of measuring of mass of the condensate petroleum gases in the pumping mode. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 6, 14–20.
7. Vavilov, V.P., Larioshyna, I.A. (2012) Procedural errors of TV energoaudit of buildings. *Vestnik Nauki Sibiri*, 5(6), 49–52 [in Russian].

CAUSAL FACTORS AND ERRORS AFFECTING THE RELIABILITY OF ASSESSMENT OF THERMOPHYSICAL AND GEOMETRIC PARAMETERS OF DEFECTS OF INDUSTRIAL FACILITIES AND PRODUCTS

V.O. Troitskiy, V.Yu. Glukhovskiy, V.A. Lytyvnenko

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

In order to improve the assessment reliability of defects thermophysical and geometric parameters of industrial objects and products in the process of IR thermography testing, an analysis of causal factors and errors that affect the results of the thermography procedure was carried out. The classes and the influence of the main uncertainties on the parameters of thermography are defined. 7 Ref., 3 Fig.

Keywords: thermal imaging method, causal factors, errors, geometric and thermophysical parameters, non-destructive testing, industrial facilities, industrial smoke pipes

Надійшла до редакції 21.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 13.03.20

Прийнято 22.03.2024

**INTERNATIONAL CONFERENCE
ON WELDING AND RELATED
TECHNOLOGIES**

07-10.10.2024
wrt2024.com.ua
Kyiv, Ukraine

ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА – СЬОГОДЕННЯ ТА ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ



У січні цього року відзначалась 90-та річниця заснування Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Самовіддана праця багатьох поколінь патонівців, які вкладали в улюблену справу свої знання, енергію та досвід, стали запорукою того, що сьогодні Інститут електрозварювання імені Євгена Оскаровича Патона Національної академії наук України – це потужний науково-технічний комплекс, у структуру якого входять науково-дослідний Інститут, дослідне конструкторсько-технологічне бюро, дослідний завод, низка науково-інженерних, учбовий та атестаційний центри.

Основна тематика робіт Інституту електрозварювання – це дослідження зварювальних і споріднених процесів, розроблення відповідних технологій та створення обладнання для їх практичної реалізації.

Сьогодні сфера досліджень та розробок нашого Інституту охоплює майже всі існуючі способи зварювання: від добре відомих та широко використовуваних способів дугового та контактнo-стикового зварювання до високотехнологічних процесів зварювання із застосуванням електронного променя та лазерного випромінювання; від зварювання та різання під водою до зварювання в космосі; від зварювання та обробки металів вибухом до зварювання живих тканин у медицині. Але працівники Інституту не зупиняються і постійно розширюють сферу своєї діяльності.

Сьогодні сфера досліджень та розробок нашого Інституту охоплює майже всі існуючі способи зварювання: від добре відомих та широко використовуваних способів дугового та контактнo-стикового зварювання до високотехнологічних процесів зварювання із застосуванням електронного променя та лазерного випромінювання; від зварювання та різання під водою до зварювання в космосі; від зварювання та обробки металів вибухом до зварювання живих тканин у медицині. Але працівники Інституту не зупиняються і постійно розширюють сферу своєї діяльності.

На початок цього року Інститут налічує 996 працівників, у т.ч. 522 наукових співробітників, серед них 227 кандидатів і докторів наук.

ІЕЗ успішно співпрацює з науково-дослідними інститутами НАН України, які входять до складу різних відділень – фізико-технічних проблем матеріалознавства, механіки, фізики та астрономії, ядерної фізики і енергетики, хімії, а також з багатьма установами Національної академії медичних наук України. Маємо тісні контакти з закладами вищої освіти України, які готують спеціалістів в галузі зварювання і споріднених технологій.

Інститут електрозварювання має плідну співпрацю з великими промисловими підприємствами України, зокрема, ДП «Антонов», ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка», ДП «НАЕК «Енергоатом», АТ «Укрзалізниця» тощо. Нашими партнерами є гіганти світового виробництва – Boeing, Airbus, Holland (USA), Plasser&Theurer (Austria), ProgressRailService (USA) та інші. Підтримуються широкі міжнародні зв'язки з провідними науковими центрами матеріалознавства і зварювання в США, Європі та Азії, довготривалі стосунки з низкою іноземних установ, які з року в рік зміцнюються через укладання та переукладання угод про виконання спільних проектів. Серед партнерів – Інститут зварювання та з'єднань Університету м. Аахен (Німеччина), Французький національний центр наукових досліджень (CNRS), Центр полімерних та вуглецевих матеріалів Польської академії наук, м. Забже (Польща), і багато інших. Деякі науковці є дійсними членами AWS (Американського зварювального товариства), виступають експертами Міжнародного інституту зварювання, входять до складу програмного комітету Програми ЄС «Горизонт Європа».

В останні роки в рамках програм Європейського Союзу реалізована низка спільних дослідницьких проектів, у т.ч. проекти з питань нарощування наукового потенціалу, проекти наукової мобільності в межах програми «Дії імені Марії Складовської-Кюрі». Окрім того, Інститут активно співпрацює з іноземними партнерами в рамках різноманітних білатеральних програм.

Особливо важлива співпраця з Міжнародним інститутом та Європейською федерацією зварювання, в яких Інститут є повноправним членом. Ці організації є провідними щодо розробки міжнародних стандартів в галузі зварювання. Науковці мають можливість брати безпосередню участь в розробленні стандартів та інших документів через роботу в комітетах, підкомітетах, робочих групах МІЗ та ЄФЗ. Це сприяє вирішенню таких основних завдань, як узгодження технічної політики України з технічною політикою, яку проводять закордонні партнери, використання міжнародних стандартів для поліпшення якості та конкурентоспроможності продукції України.

МІЗ проводить свої щорічні асамблеї, в яких Інститут представляє офіційна особа з певними повноваженнями, а також проводить міжнародні науково-технічні конференції. Науковці Інституту є постійними учасниками таких конференцій. Так, у Міжнародній конференції минулого року, що проходила в Сінгапурі, 16 наших науковців представили 17 доповідей, більша частина з яких була рекомендована для публікації в престижних наукових виданнях.

Протягом усієї своєї історії Інститут електрозварювання є яскравим прикладом комплексного підходу до розвитку науки і технологій, який було започатковано Євгеном Оскаровичем та розвинуто Борисом Євгеновичем Патоном. Суть такого підходу полягає в тому, що наш Інститут не обмежується проведенням лише фундаментальних досліджень, а націлений на комплексне вирішення реальних проблем економіки держави: від поглибленого теоретичного пошуку та експериментальних досліджень до впровадження отриманих науково-технічних результатів і розробок у промислове виробництво. І сьогодні наші розробки знайшли практичне застосування майже в усіх галузях економіки та в багатьох сферах повсякденного життя.

Прикладом таких розробок можна назвати технологію та мобільне устаткування для автоматичного контактнo-стикового зварювання оплавленням (КСЗО) залізничних рейок у заводських та польових умовах при будівництві та ремонті залізничних колій.

За останні роки було експортовано більше 95 мобільних рейкозварювальних машин для зварювання високоміцних рейок, зокрема, із натягом, на суму понад 32 млн. дол. США. Ці машини були виготовлені за ліцензійною угодою на Каховському заводі електрозварювального обладнання за документацією, розробленою в Інституті.

Результати новітніх досліджень удосконаленої технології КСЗ пульсуючим оплавленням заплановані до впровадження при будівництві та ремонті залізничних колій «Укрзалізниця», що вкрай важливо для вирішення проблем повсякденного відновлення України.

Традиційним напрямом робіт Інституту є розробка технологій зварювання труб – від металевих труб великого діаметру, які використовуються при будівництві магістральних трубопроводів, до неметалевих, зокрема полімерних. Так, інноваційну технологію та обладнання для зварювання поліетиленових труб зовнішнім діаметром до 250 мм при будівництві трубопроводів для водотопа газопостачання впроваджено на ТОВ «Свро-трубпласт» (м. Київ).

В цілому напрями теоретичних й експериментальних досліджень у галузі полімерного матеріалознавства (створення, дослідження і застосування біополімерів, композиційних матеріалів та наноматеріалів на їхній основі) розвиваються в Інституті дуже інтенсивно.

На особливу увагу заслуговують нові перспективні напрями досліджень з 3D друку виробів з антибактеріальною та противірусною активністю, полімерних матеріалів і виробів з них зі здатністю до самозаліковування та створення технологій їх хімічного зварювання, впливу за допомогою різноманітних фізичних полів на структуру і властивості полімерних матеріалів та їх зварних з'єднань.

Новітня технологія зварювання закладним елементом високотехнологічних полімерних композитів та листових виробів з них успішно пройшла випробування та використовується в авіакосмічній галузі на ДП «Антонов» та ДП «КБ «Південне ім. М.К. Янгеля».

Спільно з промисловими компаніями та інститутами НАН України проводяться роботи з дослідження впливу водню та його газових сумішей на поліетиленові труби з метою визначення можливості його транспортування по трубопроводах газотранспортних мереж України та Європи.

Ще одним традиційно важливим напрямом досліджень і розробок нашого Інституту є променеві, а саме електро-променеві та лазерні технології. В Інституті розроблено і успішно використовується високопродуктивне обладнання для електронно-променевого зварювання деталей газотурбінних двигунів великої потужності. Наприклад, для підприємства АТ «Мотор - Січ» розроблена технологія електронно-променевого зварювання корпусу камери середнього тиску газової турбіни, виготовленої з титанового сплаву.

Щодо лазерного зварювання, зокрема, у галузі вагобудування, науковці Інституту розробили установку для ручного напівавтоматичного лазерного зварювання. Вона необхідна для зварювання конструктивних елементів у важкодоступних місцях, де неможливо використовувати автоматичне зварювання або роботизовані комплекси. Цей інструмент успішно використовується на світових вагобудівних заводах.

Інститут виконує також розробку та виготовлення автоматизованих комплексів для лазерного, плазмового і гібридного зварювання, різання, наплавлення та інших технологічних процесів. Оригінальні багатокординатні маніпулятори, розроблені в ІЕЗ, оснащені високоякісними комплектуючими, завдяки чому мають високі показники точності, надійності та дозволяють вирішувати різноманітні

прикладні задачі. Створені комплекси знайшли своє успішне застосування у приладобудівній, хімічній, енергетичній та інших галузях промисловості.

Продовжує удосконалюватися технологічний процес плазмово-індукційного вирощування монокристалічних тіл обертання з тугоплавких металів. Уперше в світі вирощено експериментальні монокристалічні тиглі з вольфраму. Зокрема, отримано тиглі і зливки діаметром 85 мм з дезорієнтацією субблоків, що не перевищує 5 кутових градусів.

Розроблено обладнання, технологія та матеріали для одношарового антикорозійного електрошлакового наплавлення стрічками. Отримані результати використовуються при виборі матеріалів і технологій антикорозійного наплавлення деталей енергетичного та хімічного обладнання. Також створено технології і матеріали для дугового наплавлення сталевих валків гарячої прокатки різних станів, за допомогою яких можна отримувати на будь-якій складній поверхні наплавлений шар необхідної товщини з мінімальними допусками на механічну обробку.

Із початком широкомасштабного російського військового вторгнення переглянуті та актуалізовані основні напрями наукової діяльності Інституту. І тут у нас є два головні пріоритети. Перший, безумовно, це дослідження і розробки, пов'язані з підвищенням обороноздатності нашої країни.

Розроблені нашими спеціалістами технології зварювання типових з'єднань броньованих сталей високої твердості вітчизняного та закордонного виробництва дозволяють відмовитися від термічного оброблення корпусів легкоброньованої техніки та за рахунок цього суттєво скоротити час на її виготовлення і знизити собівартість виробу.

Розроблено та впроваджено ремонтно-зварювані технології для відновлення цілісності корпусів БТР та БМП, які зазнали бойових і експлуатаційних пошкоджень. За рахунок наплавлення останніх шарів шва спеціальними зварювальними матеріалами кулеустійкість зварних з'єднань підвищується до рівня кулеустійкості броньованих сталей.

Коротко відмітимо ще декілька прикладів наших новітніх розробок для потреб безпеки і оборони.

Технологія відновлення та зміцнення поверхні штоків віддачі артилерійських установок шляхом нанесення шару захисного покриття електродуговим напиленням. Технологія відновлення та зміцнення поверхні штоків гідравлічної системи основних стояків шасі літака шляхом нанесення газотермічного покриття. Технологія відновлення та зміцнення поверхні деталей бронетанкової техніки нанесенням газотермічних покриттів.

На кількох українських підприємствах, зокрема, ДП «Івченко-Прогрес», АТ «Мотор Січ» практично впроваджена технологія відновлення за допомогою мікроплазмового порошкового наплавлення деталей авіаційних газотурбінних двигунів з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів. На вітчизняних авіаремонтних підприємствах застосовується технологія продовження тривалості експлуатації робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів у 3-4 рази.

З використанням зварювання вибухом запропонована технологія створення високоміцних багатшарових композиційних матеріалів для застосування в якості броні.

Розроблена також технологія виготовлення біметалевої броні для захисту машин спеціального призначення.

За розробленою в Інституті спеціальною технологією дугового напівавтоматичного наплавлення відновлено партію зношених траків та пальців, які були випробувані в польових умовах та показали стійкість на рівні нових деталей.

Розроблені в Інституті лазерні технології сьогодні успішно використовуються і для зварювання та наплавлення малогабаритних соплових блоків рідинних ракетних двигунів, зразки яких пройшли успішну перевірку, згідно спеціалізованій програмі випробувань, розробленій у «КБ «Південне».

Створена технологія електронно-променевого плавлення титанових сплавів забезпечує отримання з вітчизняної сировини високоякісних зливок як традиційних промислових титанових сплавів, так і новітніх високоміцних титанових сплавів для авіаційної і ракетної галузей. Для практичної реалізації розроблених технологій на ДП «Науково-виробничий центр «Титан» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона» організовано промислове виробництво зливок титанових сплавів у складі п'яти електронно-променевих установок власної конструкції. Продукція підприємства у вигляді зливок титанових сплавів масою до 15 т постачаються як вітчизняним заводам (АТ «Мотор Січ» та інші), так і за кордон. У кооперації з підприємствами-партнерами (ДП «Південний машинобудівний завод», «УкрНДІспецсталь», ТОВ «Дніпропрес Сталь» та ін.), зі зливок титанових сплавів, отриманих методом електронно-променевого плавлення, організовано виробництво поковок, прутків та труб, якість яких повністю відповідає вимогам стандартів, що дозволило на теперішній час повністю забезпечити потреби підприємств оборонного комплексу України в напівфабрикатах з високоміцних титанових сплавів.

Для медичної галузі спеціалістами розроблено також нове покоління медичного обладнання, що поєднує зварювання живих тканин з використанням ВЧ струму та одночасного гемостазу і дезінфекції ран конвекційно-інфрачервоним опроміненням.

Другий пріоритетний нині напрям досліджень спрямований на повоєнну відбудову України та майбутню структурну модернізацію вітчизняної економіки на найвищому технологічному рівні. Тут дослідження і розробки спрямовуються на перспективний розвиток вітчизняної промисловості, створення нових високотехнологічних галузей. Серед них: інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах, 3D-технології, нові матеріали, технології та виробу медичного призначення, технології ремонту та відновлення інфраструктурних і промислових об'єктів тощо.

Затребуваною виявилася технологія технічної діагностики великогабаритних конструкцій (як-то телевізійні та електричні вежі, мости) з використанням безпілотного літального апарату для аерофотозйомки та побудови тривимірної моделі конструкції методом фотограмметрії. Вона дала змогу провести дистанційне обстеження руйнувань Київської телевежі після ракетного удару 1 березня 2022 р. і отримати дані про дефекти, візуалізувати пошкодження опорних елементів конструкції.

Науковці Інституту реалізували технологію одержання бездефектних і хімічно однорідних зливків перспективного титанового сплаву медичного призначення Ti-6Al-7Nb методом електронно-променевої плавки. Зливки мають дрібнозернисту структуру без жодних проявів зональної ліквідації. Така структура забезпечує якнайкраще поєднання механічних характеристик сплаву – високу міцність і пластичність, що задовольняють вимоги міжнародних стандартів для титанових сплавів медичного призначення і, саме головне, повністю відповідають комплексу механічних характеристик людських кісток.

За останні роки в Інституті створено цілу низку найсучаснішого обладнання для практичної реалізації технологій електронно-променевого, лазерного та плазово-дугового 3D-друку металевих виробів для потреб аерокосмічної галузі, медицини, військово-оборонного комплексу та інших галузей промисловості. Наприклад, оперативний 3D-друк деталей складної військової техніки дозволяє швидко здійснювати її ремонт у польових умовах.

Не дивлячись на складні умови сьогодення велика увага приділяється покращенню дослідної інфраструктури Інституту, зокрема, створенню спільних лабораторій.

Одна з них Міжнародна польсько-українська науково-дослідна лабораторія (ADPOLCOM). Її

створенню передувало багаторічне плідне співробітництво між Інститутом та Центром Полімерних та Вуглецевих Матеріалів Польської академії наук (м. Забже) на основі міжнародних договорів між двома академіями наук та білатеральних проектів.

Наукова та науково-технічна діяльність лабораторії зосереджена на фундаментальних та прикладних дослідженнях в сфері створення, комплексного вивчення та з'єднання різноманітних полімерних матеріалів, біоматеріалів, композитів та нанокompозитів для багатьох галузей людської життєдіяльності – від побутового використання, наприклад, екологічного біодеградабельного пакування, зокрема, харчових продуктів, до матеріалів і виробів медичного призначення, наприклад, полімерних імплантів тощо.

Нині в Інституті підготовлено майданчик для встановлення обладнання для нової дослідно-технологічної дільниці по проведенню науково-дослідних робіт та тестування передових розробок в галузі зварювальних і споріднених технологій. Розроблено технічний проект даної дільниці, узгоджено перелік і технічні вимоги до дослідно-технологічного обладнання, яке буде використовуватись на цьому майданчику.

Із самого початку повномасштабної агресії рф співробітники Інституту активно долучились до волонтерської та благодійної діяльності. Організували збір та передачу грошей і необхідних речей (води, медзасобів, засобів гігієни тощо) для потреб Територіальної оборони Києва та Збройних сил України.

Науковці Інституту виготовляють та передають на фронт власну розробку – медичні іммобілізаційні пневматичні шини для тимчасової фіксації травмованих частин тіла людини та її транспортування з мінімальною травматичністю. Також Інститут передає військовим зварювальні матеріали для проведення зварювання металоконструкцій у зоні бойових дій, а у медзаклади – апарати для зварювання живих тканин ПАТОНМЕД та інструменти для операції.

Більше 20 молодих науковців інституту організували у вільний від роботи час виробництво теплових печей (буржуйок) для військовослужбовців, які зараз воюють на сході та півдні України. До збору коштів на матеріали для цих печей, а це на сьогодні більше 300 тис. грн., активно долучились співробітники, волонтери та просто небайдужі українці.

На волонтерських засадах виконується ціла низка науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт для потреб ЗСУ. Нажаль, не про всі роботи, які Інститут виконував та виконує на потреби ЗСУ, можна зараз говорити відкрито. Але



Під час урочистих зборів, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 18 січня 2024 р.

вони постійно проводяться, і одним з важливих напрямів цих робіт є експертна діяльність. Наприклад, у минулому році науковці ІЕЗ виконали 11 робіт, пов'язаних з експертизою для військових інститутів та підприємств оборонного комплексу.

Відмічаючи внесок співробітників ІЕЗ у перемогу, неможна оминати увагою 19 колег, які з перших днів війни добровільно вступили до лав ЗСУ та ТРО, і наразі перебувають на військовій службі. Один з них був поранений, і в Інституті був організований збір коштів на його лікування. Один наш молодий колега був нагороджений сталевим хрестом.

Цими днями на адресу колективу нашого Інституту надійшло багато теплих привітань з нагоди ювілею. Зокрема, це привітання від Офісу Президента України, Міністерства освіти і науки України, Президії Національної академії наук України, АТ «Українська оборонна промисловість», Болгарського Союзу Зварювання, Фізико технологічного інституту металів і сплавів НАН України, Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України, Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Національного університету «Чернігівська політехніка», Інституту термоелектрики НАН України, Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Українського трубного заводу.

На урочистих зборах колективу з нагоди ювілею нас привітали президент Національної ака-

демії наук України академік Анатолій Загородній, голова Західного наукового центру НАН України та МОН України, директор Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка академік Зіновій Назарчук, голова Північно-Східного наукового центру НАН України і МОН України, генеральний директор НТК «Інститут монокристалів» академік Володимир Семиноженко, в.о. директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича член-кореспондент Геннадій Баглюк, перший заступник директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича академік Сергій Фірстов, директор Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля академік Володимир Туркевич, заступник директора Фізико-технологічного Інституту металів та сплавів доктор технічних наук Микола Тарасевич, голова Наукового комітету Національної ради України з питань науки та технологій Олександра Антонюк, начальник Центрального науково-дослідного Інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України генерал-майор Ігор Чепков, ректор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» академік Михайло Згуровський, ректор Національного університету «Чернігівська політехніка» доктор технічних наук Олег Новомлинець.

Співробітники Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона заслуговують на повагу суспільства за вірність патонівським традиціям, героїчну працю, яка допомагає зміцнювати обороноздатність України і наближає Перемогу. Патонівці внесуть значний вклад в справу повоєнного відродження та подальшого інноваційного розвитку рідної держави.

Ігор Кривцун, академік НАН України,
директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона



ВИСТАВКА «RAILWAY INTERCHANGE 2023»

01–04 жовтня 2023 р. в США, м. Індіанаполіс, відбулася виставка «Railway Interchange 2023», на якій були присутні понад 8500 відвідувачів з понад 40 країн, 750 експонентів/спонсорів-учасників і десятки засобів масової інформації. Це найкрупніший форум у залізничній галузі Північної Америки, аудиторією якої є висококваліфіковані особи, що приймають рішення з питань залізничного транспорту. «Railway Interchange» пропонує неперевершену можливість вивчити новітні технології, послуги та дослідження, представлені провідними членами Інституту залізничного постачання (RSI), Асоціації постачальників інженерно-технічного обслуговування залізниць (REMSA) і Асоціації постачальників залізничної галузі (RSSI), Асоціації залізничних інженерів та технічного обслуговування шляхів (AREMA) та інших партнерських асоціацій, де поєдналися нетворкінг, освіта та інновації в одному місці.

Компанія OKOndt GROUP втретє брала активну участь у цій виставці та представила свої

дефектоскопи для неруйнівного контролю залізничних рейок, зварних з'єднань, стрілочних переводів, елементів рухомого складу. Формат виставки дозволив OKOndt GROUP продемонструвати широкий асортимент продукції та переваги наших технологій. На стенді було представлено наступні пристрої: УДС2-77 і УДС2-73 – ультразвукові (однорельсовий і дворельсовий) дефектоскопи для безперервного контролю рейок, УСП-01 – комплект для контролю зварних з'єднань рейок (у складі скануючого пристрою та дефектоскопа Sonocon B), ETS2-77, ETS2-73 і Eddyson C – вихретокові дефектоскопи для контролю рейок, прилади для контролю елементів рухомого складу. Розробки OKOndt GROUP показали свій високий технічний рівень та конкурентоспроможність на світовому ринку, викликали широкий інтерес у відвідувачів виставки. Підсумком виставки стало встановлення нових ділових контактів із залізничними дорогами американського континенту.



Стенд OKOndt GROUP на виставці «Railway Interchange 2023»



**НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**

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



ОЛЕГУ МИХАЙЛОВИЧУ КАРПАШУ – 75 РОКІВ!



Правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики вітає з 75-річчям від дня народження Карпаша Олега Михайловича – доктора технічних наук, професора кафедри енергетичного менеджменту і технічної діагностики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, віце-президента УТ НКТД, заслуженого працівника газової промисловості України, академіка Української нафтогазової академії та Міжнародної академії стандартизації, заслуженого діяча науки і техніки України (2001), лауреата Державної премії України в галузі науки і техніки (2006), лауреата ордена «За заслуги» III ступеня (2010).

Багаторічний трудовий шлях О.М. Карпаша нерозривно пов'язаний зі створенням сучасних засобів і високоефективних технологій неруйнівного контролю і технічної діагностики нафтогазового бурового обладнання та інструменту, з розробленням нових методів і технологій визначення фактичного технічного стану металоконструкцій довготривалої експлуатації, впровадженням у виробництво стаціонарних і пересувних лабораторій для нафтогазовидобувної промисловості, з вихованням нових поколінь сучасних фахівців і молодих вчених. Він сформував власну наукову школу «Методи та засоби забезпечення технологічної

безпеки обладнання, споруд і конструкцій довготривалої експлуатації», а під його керівництвом було захищено 3 докторських і 17 кандидатських дисертацій.

Значним є внесок О.М. Карпаша у науково-технічну і педагогічну діяльність Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу на посаді проректора з наукової роботи (2001–2017 рр.) і завідувача кафедри технічної діагностики і моніторингу, яку він заснував і очолював до 2014 р. У різні роки О.М. Карпаш був заступником головного редактора науково-технічних журналів «Нафтогазова енергетика», «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ», «Науковий вісник ІФНТУНГ», членом редколегії журналів «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», «Методи і прилади контролю якості», «Ринок інсталяцій», «Machinery technology, Materials» (Болгарія), «Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research» (Франція), учасником численних міжнародних наукових проєктів.

У творчому доробку О.М. Карпаш має майже 400 публікацій, понад 50 патентів і авторських свідоцтв, 4 монографії, 10 підручників, більше 40 нормативних документів.

Шановний Олеже Михайловичу!

Щиро бажаємо подальших успіхів у Вашій багатогранній діяльності, реалізації всіх Ваших найсміливіших задумів і найзаповітніших мрій, незмінної удачі, міцного здоров'я та благополуччя. Нехай у Вашому житті завжди будуть присутні лише позитив, прекрасний настрій і чудові люди, робота приносить лише радість, а вдома завжди чекатимуть добробут, тепло і тишок!

Правління Українського товариства НКТД

ВІТАЄМО НОВИХ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЧЛЕНІВ УТ НКТД:

- **Базіла Костянтина Вікторовича**
д.т.н., професора кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Году Ольгу Юріївну**
к.т.н., старшу викладачку кафедри інформаційно-вимірвальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

- **Деречу Валерія Яковича**
начальника відділу неруйнівних методів контролю ДП «АНТОНОВ»
- **Єременка Володимира Станіславовича**
д.т.н., професора кафедри інформаційно-вимірвальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

- **Козерука Сергія Олександровича**
к.ф.-м.н., доцента кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Марчука Романа Миколайовича**
к.т.н., аспіранта Національного авіаційного університету
- **Мешкова Сергія Миколайовича**
к.т.н., доцента кафедри фізики Харківського національного університету радіоелектроніки
- **Мікосянчик Оксану Олександрівну**
д.т.н., професорку, завідувачку кафедри Національного авіаційного університету
- **Мнацаканова Рудольфа Георгійовича**
д.т.н., професора Національного авіаційного університету
- **Мокійчука Валентина Михайловича**
к.т.н., доцента кафедри інформаційно-вимірвальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Монченко Олену Володимирівну**
к.т.н., доцентку Національного авіаційного університету
- **Мягкого Олександра Валерійовича**
к.т.н., доцента кафедри фізики Харківського національного університету радіоелектроніки
- **Нижника Олександра Ігоровича**
к.т.н., асистента кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Орла Романа Петровича**
к.т.н., доцента кафедри фізики Харківського національного університету радіоелектроніки
- **Семак Інну Вікторівну**
старшу викладачку Національного авіаційного університету
- **Старовойта Ярослава Івановича**
к.т.н., асистента кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Тичкову Наталію Борисівну**
аспірантку кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Топтун Анну Володимирівну**
PhD, викладачку кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Трощинського Богдана Олександровича**
к.т.н., доцента Київського національного університету будівництва та архітектури

- **Філімонова Сергія Олександровича**
к.т.н., доцента кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Чубукіна Олександра Сергійовича**
к.т.н., доцента Харківського національного університету радіоелектроніки
- **Щербань Анастасію Павлівну**
к.т.н., доцентку кафедри інформаційно-вимірвальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Юцкевича Святослава Сергійовича**
к.т.н., доцента Національного авіаційного університету

Підтвердили членство в УТ НКТД на новий термін:

- **Близинок Олена Дмитрівна**
м.н.с. науково-дослідної частини Національного авіаційного університету
- **Бондаренко Максим Олексійович**
д.т.н., професор, завідувач кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Гальченко Володимир Якович**
д.т.н., професор кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Городжа Анатолій Дмитрович**
к.т.н., професор Київського національного університету будівництва та архітектури
- **Кубай Микола Михайлович**
керівник відділу ТзОВ «Кипер-Пласт», м. Львів
- **Пуларія Андрій Луарсабович**
к.т.н., доцент кафедри «Вагони та вагонне господарство» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро
- **Тичков Володимир Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Трембецька Руслана Володимирівна**
д.т.н., доцентка кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Туз Вячеслав Валерійович**
к.т.н., доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету
- **Ящеріцин Євген Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри безпеки праці та навколишнього середовища Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

ПРО МОЖЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПРОТЯЖНИХ ОБ'ЄКТІВ

В.О. Троїцький

зав. відділу неруйнівного контролю ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

Технологія низькочастотного далекодуючого УЗК за останній десяток років отримала розвиток у світі. Можна припустити, що за нею майбутнє в моніторингу технологічних трубопроводів. Ці трубопроводи в Україні зараз практично поступово руйнуються, не маючи регламентів та актуальної нормативної бази для їхньої діагностики. Ідея НЧ УЗК швидко просувається у розвинених країнах. В Україні дослідження з цього напрямку проводяться в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Окрім нових дефектоскопічних можливостей, у цій статті хочу поділитися думкою, як на основі особливостей проходження НЧ УЗ коливань оцінювати ступінь старіння металу об'єкта з тривалим терміном експлуатації.

Відомо, що з часом, залежно від того, як експлуатувався старий об'єкт, відбувається швидка або повільна деградація металу. З роками він поступово перетворюється на потерть, яка втратила властивості кристалічного тіла.

На основі оцінки дальності проходження НЧ УЗ коливань можна ввести бальність деградації металу. У новому металі УЗ коливання низької частоти поширюються на сотні метрів. У сильно деградованому металі, який вже втратив пружні властивості твердого тіла, ці коливання швидко загасають, майже не поширюються. За основу призначення балу повноцінності металу може бути взято мертву зону, властиву всім УЗ випромінювачам. Її довжина Δ залежить від геометрії труби та частоти УЗ коливань. Тоді, якщо УЗ коливання загасають лише на рівні протяжності цієї зони, тобто відстань проходження УЗ коливань $L \approx \Delta$, то якість металу як твердого тіла $Q = \frac{L - \Delta}{L}$ приблизно дорівнює нулю. Тобто це вже потерть, поцяткована міжкристалітною корозією, а не тверде тіло. Відповідно, для нового кристалічного металу $Q \approx 1$, коли відстань проходження НЧ коливань $L \gg \Delta$.

Старий метал є небезпечним. Труби зі старого металу є неприпустимими для експлуатації. Проведені нами експерименти на складах теплообмінних пунктів та на теплових трасах показали, що досить часто НЧ коливання повністю загасають, не пройшовши й кількох метрів, хоча ззовні труби вигляда-

ють як благополучні. При цьому не можна забувати про характер та тип ізоляції, заповнення труби, що впливають на ці оцінки. Описана вище оцінка деградації стосується труб без заповнення та без ізоляції.

Чи буде такий метод оцінки деградації нормований чи не буде, але ясно одне, що, перш ніж застосовувати НЧ діагностику, слід поцікавитися якістю металу, його віком, а також тим, чим заповнений трубопровід, наявністю на ньому ізоляції, її акустичними властивостями та ін. Усі ці обставини повинні бути відображені в стандартах на цей метод. Без урахування цих відомостей метод НЧ УЗК є ненадійним. Проте я вірю, що в нього є серйозне майбутнє, яке потрібно наближати.

Багато сил і часу витрачено нами на поширення НЧ УЗК для оцінки стану трубопроводів в Україні. Ейфорія, пов'язана з можливостями цього методу, пройшла. Зараз ми зрозуміли, яке місце цей вид контролю може зайняти під час діагностики протяжних об'єктів. Для того, щоб цей метод почав застосовуватися в Україні, потрібно мати нормативну базу.

Свого часу в американському журналі TNT, що видається для інженерів-практиків NDT, була оприлюднена цікава стаття під назвою «Альтернативні NDT технології для розшифрування пошкоджень, що відбулися на трубопроводі Прудхое на Алясці», що порівнює традиційні методи УЗК з НЧ УЗК.

У серпні 2006 р. велика нафтова компанія США пережила другий інцидент, пов'язаний з аварією на нафтопроводі, який призвів до порушення екологічно крихкої природи Аляски. Обидві аварії були результатом внутрішньої піттингової корозії на нафтопроводах у чотири нитки діаметром 0,85 м. Цими лініями транспортується більше 400000 барелів агресивної нафти щодня з Аляски в південні штати США. Після першої аварії всі чотири нитки нафтопроводу були перевірені загальновідомими традиційним ручним та автоматизованим УЗК. Проте з часом сталася повторна серйозна аварія на цьому трансконтинентальному нафтопроводі. Після другої аварії було зроблено негайне перекриття приблизно 3 % постачання нафти до 48-ми штатів доти, доки не буде виконаний повний повторний НК всього нафтопроводу. Інформація про потенційну небезпеку можливої екологічної катастрофи швидко

дійшла до національних засобів масової інформації. Уся громадськість США стала спостерігати за спеціалістами з НК, від оперативності яких залежали розміри збитків усієї країни. Незабаром після відключення чотириниткового нафтопроводу Міністерство транспорту США для пришвидшення запуску нафтопроводу видало припис про термінову розробку автоматизованого УЗК всіх чотирьох ниток нафтопроводів. Причому було вирішено контролювати тільки найнебезпечніші зони трубопроводів, тобто зону секторів від 4 до 8 год. Уряд США відмовився від досліджень верхньої частини нафтопроводу. Контроль за допомогою традиційного УЗК вимагав видалення поліуретанової ізоляції та ретельної підготовки під УЗ контроль поверхні труб. Для виконання цих робіт знадобилася велика кількість робітників. Для робіт з УЗК потрібно було близько 100 дефектоскопістів. Тому постало завдання знайти альтернативні методи та засоби для прискорення суцільного УЗК, які б за точністю були не гірші, ніж традиційні засоби. Треба було виявити внутрішні корозійні язви глибиною більше 50 % товщини стінки при співвідношенні геометричних розмірів у плані 3:1. Після другої аварії вимоги до НК посилювалися. Тепер вимагали забезпечення 100 % виявлення будь-якої несцільності. Для виконання традиційного УЗК кожна нитка трубопроводу була поділена на контрольовані ділянки по 0,3 км, що призвело до створення 52000 окремих НК ділянок. Труби перевірялися за допомогою ручного ультразвуку для визначення мінімальної та середньої товщини стінки в межах сегмента від 4 до 8 год., тобто у нижній порожнині нафтопроводу, де постійно присутня нафта з агресивними домішками. Кожна група з 108 фахівців перевіряла традиційним УЗК в середньому 283 сегменти за день. Був застосований ручний і традиційний автоматизований УЗ контроль (див. кн. «Мониторинг состояния конструкций»).

Швидкість автоматизованого УЗК була несподівано низькою (від 4,5 до 6,0 м) внаслідок необхідності додаткових уточнень і повільного ручного сканування. Якби не був терміново розроблений успішний альтернативний НЧ метод УЗК, то контроль 52000 ділянок зайняв би більше півроку, а саме близько 184 днів. Для 48-ми штатів США це було неприпустимо.

Тому незабаром крім традиційного УЗК з використанням п'єзоперетворювачів по зачищеній поверхні були проведені випробування електромагнітоакустичних перетворювачів (ЕМАП), які встановлювалися по осі трубопроводу в точці торкання опори труби, тобто у положенні 6 год. Так НЧ ЕМА технологія дозволяє виявляти утонення стінки на 30 %, починаючи з відстані 0,5 м від опори. Застосування ЕМАП дозволило зменшити витрати та час на проведення контролю за рахунок операцій зняття та повторного нанесен-

ня ізоляції. Далі виконувався вже АУЗК на основі ЕМАП через антикорозійне покриття завтовшки 4 і 8 мм. Випробування за допомогою ЕМАП по ізольованій трубі повністю еквівалентні контролю по зачищеній трубі, що суттєво прискорювало діагностику. Але збільшити продуктивність НК десятикратно дозволив метод НЧ УЗК.

Сьогодні НЧ ЕМАП технологія доволі поширена та стандартизована (ASTM E1816) на рівні з технологією п'єзоелектричного НЧ УЗК, але на той час технології ЕМАП контролю були абсолютно нові та не мали нормативної бази.

У підсумку польові випробування показали, що:

- команда з двох осіб за допомогою ЕМАП змогла перевірити 300 м за зміну;
- технологія НЧ ЕМАП дає широке зображення всього контрольованого сегмента (4...8 год.);
- після закінчення робіт з ЕМАП потрібно виконувати уточнюючі заміри товщини звичайним УЗ методом;
- НЧ ЕМАП продемонстрував 100 % виявленість ізольованого піттинга при втраті 25 % товщини стінки щодо розмірів дефекту в плані 3:1;
- результати НЧ ЕМАП, отримані на зачищеній поверхні, відповідають результатам на незачищеній трубі;
- НЧ ЕМАП дає рівень хибних сигналів менше 1 %.

НЧ ЕМАП дає результати краще, ніж автоматизований традиційний УЗК або ЕМАП при ізоляції. При цьому довжина ділянки об'єкта, проконтрольованої командою з двох осіб, що використовує ручний прилад для НЧ ЕМАП через допоміжні операції, не перевищувала 60 м за один день. При автоматизації та покращених кріпленнях датчиків НЧ ЕМАП (антени) продуктивність сканування підвищилася до 3 м/хв., тобто за робочий день вже контролювалося понад 1 км труби. Це був успіх НЧ ЕМАП.

До появи НЧ ЕМАП, альтернативного традиційним технологіям, сотні знімачів ізоляції, очищувачів ізоляції та техніків УЗК працювали одночасно 24 год. на добу. Нові альтернативні методи ЕМАП і НЧ ЕМАП були прийняті Міністерством транспорту США.

Дані аварії спонукали уряд США до пошуку нетрадиційних методів діагностики трубопроводів. Дивно, але ці процеси в США збіглися з тим, що робилося нами в Україні. Давно здобули популярність наші роботи з ЕМА і НЧ технологій. Проте обсяги застосування цих і інших технологій залежать від стану промисловості в країні.

Перші стандарти з НЧ далекодійного контролю почали з'являтися лише з 2009 р. (італійський стандарт UNI/TS 11317:2009, японський стандарт JIS-NDIS 2427:2010). Тоді ж на західний ринок стало виходити третє покоління цих систем контролю якості, які не потребують проведення сканування поверхні об'єкта.

Процес проходження НЧ акустичних хвиль чутливий до змін товщин стінок труби, характеру відкладень на її поверхні, корозії та інших несучільностей. Отримані при цьому луно-сигнали містять інформацію про дефекти та відстані до них від акустичної антени.

Проблема полягає не тільки в селектуванні відбитого сигналу, але і в його виявленні на тлі завад, які можуть бути співмірними або перевершувати відбитий сигнал від дефекту. Корисний сигнал від дефекту може маскуватися сигналами від зварних швів, фланців, колін труби, відгалужень. Луно-сигнал послаблюється при відбитті з далеких ділянок трубопроводів, а чутливість і точність довгохвильового методу контролю при цьому падає.

В Україні метод і системи НЧ УЗК можуть використовуватися для випадків:

- перетину доріг трубопроводами;
- проходження трубопроводу через суцільні конструкції;
- коли необхідний 100 % контроль обсягу;
- проведення контролю при використанні різних типів опор;
- контролю наявності корозії під ізоляцією (з мінімальним видаленням ізоляції);
- порівняння якості кільцевих монтажних зварних швів.

У відділі №4 ІЕЗ ім. Є.О. Патона є НЧ УЗК апаратура для виконання подібних задач. Нами

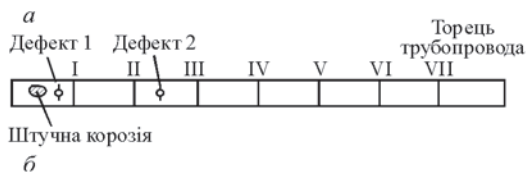
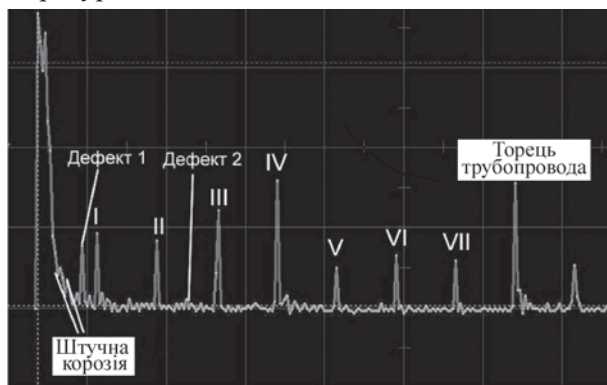


Рис. 1. Осцилограма (а) луно-сигналу на експериментальній ділянці трубопроводу (б) завдовжки 48 м. Римськими цифрами показано нумерацію швів трубопроводу

розроблено два діагностичні УЗ комплекси для визначення корозійного зносу трубопроводів діаметром до 330 і 630 мм з резонансною частотою 36 і 16,3 кГц.

Вони складаються з наступних блоків:

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

Порівняльні аналізи вимірів відстані, координат зварних з'єднань за допомогою рулетки та отриманих за допомогою НЧ УЗК за представленою на рис. 1 осцилограмою, показано в таблиці.

Розрахунок відстані до шва та дефектів виконувався за формулою $L = \frac{vt}{2}$, де t – час проходження відбитого луно-сигналу на осцилограмі, v – швидкість поширення ультразвуку для торсіонних коливань.

З таблиці видно, що точність виміру відстаней вздовж осі труби досить висока (не гірше 30 см) і не залежить від відстані до виявлених дефектів і зварних швів труби. Експериментально показано, що точність визначення дефектних ділянок знаходиться в межах роздільної здатності довгохвильового методу контролю. Цієї точності цілком достатньо для визначення місця шурфу, дефектної ділянки труби або відповідного місця розкриття ізоляції, для уточнення розмірів і глибини корозійного ураження труби та виконання ремонтних робіт.

Ще один висновок, який впливає з рис. 1, полягає в тому, що кільцеві монтажні шви V–VII приблизно рівної якості. Однозначно неякісним є шов IV.

Цікаві результати (рис. 2) отримані на відкритих ділянках газопроводу (труба Ø 330 мм, товщина стінки 8 мм). Вони показали потенційні можливості, успішність використання НЧ УЗ методу для обстеження протяжних ділянок трубопроводів до 150 м від місця встановлення антени.

Також розроблену в ІЕЗ ім. Є.О. Патона систему НЧ УЗК було випробувано на підземній ділянці газопроводу, покритого посиленою протикорозійною бризольною ізоляцією завтовшки 9 мм (рис. 3). Тут акустичні хвилі затухали практично відразу, не просуваючись у тіло труби.

Відбивач	Дефект 1	Зварний шов I	Зварний шов II	Дефект 2	Зварний шов III	Зварний шов IV	Зварний шов V	Зварний шов VI	Зварний шов VII	Торець
Розрахункова відстань до відбивача (за результатами УЗК), м	4,15	6,05	12,12	14,97	18,35	24,48	30,78	36,59	42,88	48,68
Відстань до відбивача, виміряна рулеткою, м	4,25	6,04	12,09	15,25	18,34	24,45	30,56	36,62	42,69	48,69

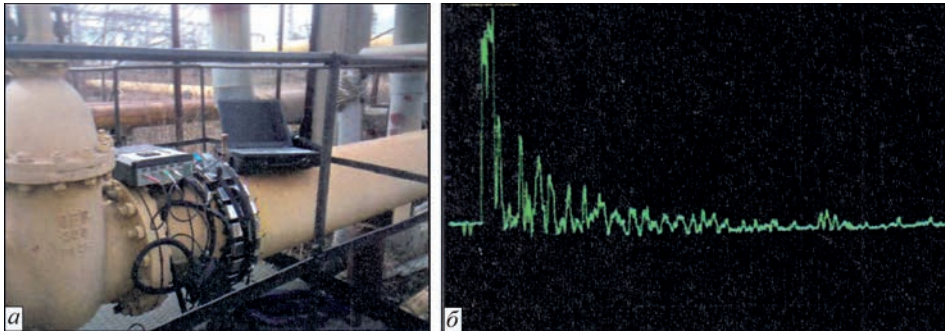


Рис. 2. Контроль наземної ділянки газопроводу завдовжки 150 м (а) та осцилограма (б) НЧ УЗ луно-сигналу

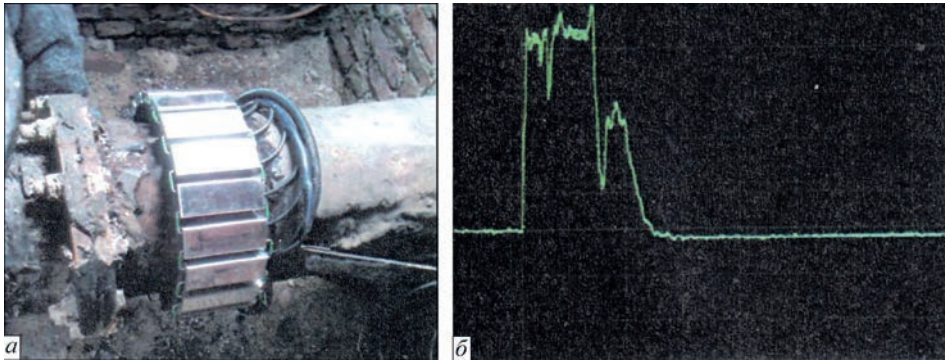


Рис. 3. Контроль підземної ділянки газопроводу з протикорозійною брізольною ізоляцією (а) та осцилограма луно-сигналу (б)

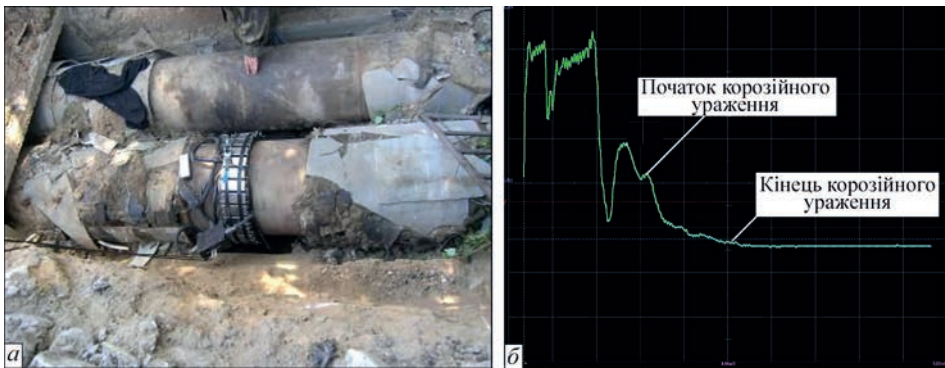


Рис. 4. Контроль підземної ділянки діючої теплотраси (а) та осцилограма луно-сигналу від корозійно ураженого трубопроводу (б)

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

Там же успішно проведено дослідження з виявлення корозійних уражень на підземних ділянках працюючої теплотраси (рис. 4). При гідравлічних випробуваннях теплотраси несподівано з'явився витік на одній з її ділянок. Після шурфування на відкритому трубопроводі нам дозволили встановити акустичну антену. Так було вияв-

лено ділянку з глибоким корозійним ураженням на відстані від антени порядку 6 м з точністю до 30 см, що потенційно могло бути зоною чергового прориву теплотраси. Тобто НЧ моніторингом було попереджено можливу аварію. Цей практичний досвід показав можливості НЧ УЗ методу для експлуатації старих труб з високим ступенем корозійних уражень. Причому інтерпретація результатів контролю у цьому випадку порівняно проста – сигнал на ділянці сильного корозійного ураження практично повністю загасає. Таким чином, на складі труб, що були у вживанні, вдалося розсортувати та обрати для подальшого застосування труби, в яких не було сильного поглинання НЧ УЗ коливань. Для нових труб без деградації металу такі дослідження робити не потрібно.

Принципові відмінності використовуваної техніки довгохвильового УЗК і самих підходів в інтерпретації результатів контролю вимагають спеціальної підготовки та сертифікації дефектоскопістів.

НОВИНИ В СФЕРІ СТАНДАРТИЗАЦІЇ

З 31 грудня 2023 р. згідно з Наказом №285 від 28.12.2022 р. в Україні набули чинності 20268 європейських нормативних документів, серед яких більше 70 складають стандарти з неруйнівного контролю.

З метою впорядкування бази діючих в Україні європейських і міжнародних стандартів з НК Технічним комітетом стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» було

визначено національні стандарти, які суперечать положенням щойно прийнятих, а також ті стандарти, європейські і міжнародні версії яких вже втратили чинність.

Відповідно до наданих ТК-78 рекомендацій ДП «УкрНДНЦ», що виконує функції національного органу стандартизації, Наказом № 309 від 13.11.2023 скасувало з 01 січня 2024 р. чинність таких національних стандартів з НК:

1	ДСТУ EN 1330-5:2008	Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 5. Терміни стосовно вихрострумowego контролю
2	ДСТУ EN 1330-9:2016 (EN 1330-9:2009, IDT)	Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 9. Терміни, які використовують в акустико-емісійному контролі
3	ДСТУ EN ISO 3452-1:2014	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи
4	ДСТУ EN ISO 3452-2:2014	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 2. Випробування дефектоскопічних матеріалів
5	ДСТУ EN ISO 10675-1:2017 (EN ISO 10675-1:2016, IDT; ISO 10675-1:2016, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 1. Сталь, нікель, титан та їх сплави
6	ДСТУ EN ISO 10675-2:2018 (EN ISO 10675-2:2017, IDT; ISO 10675-2:2017, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 2. Алюміній та його сплави
7	ДСТУ EN ISO 10863:2014	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування дифракційно-часового методу (TOFD)
8	ДСТУ EN ISO 10893-6:2015 (EN ISO 10893-6:2011, IDT; ISO 10893-6:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 6. Радіографічний контроль шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів
9	ДСТУ EN ISO 10893-7:2015 (EN ISO 10893-7:2011, IDT; ISO 10893-7:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 7. Цифровий радіографічний контроль шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів
10	ДСТУ EN 12543-2:2016 (EN 12543-2:2008, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристики фокусних плям у промислових рентгенівських системах, які використовують у неруйнівному контролі. Частина 2. Метод радіографії із застосуванням мікроканальної камери
11	ДСТУ EN 12668-1:2015 (EN 12668-1:2010, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 1. Прилади
12	ДСТУ EN 12668-2:2015 (EN 12668-2:2010, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 2. Перетворювачі
13	ДСТУ EN 12668-3:2015 (EN 12668-3:2013, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 3. Комбіноване обладнання
14	ДСТУ EN ISO 12718:2016 (EN ISO 12718:2008, IDT, ISO 12718:2008, IDT)	Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумовой. Словник термінів
15	ДСТУ EN 13477-2:2016 (EN 13477-2:2010, IDT)	Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Характеристика устаткування. Частина 2. Експлуатаційні показники
16	ДСТУ EN ISO 13588:2019 (EN ISO 13588:2019, IDT; ISO 13588:2019, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування автоматизованого методу фазованих решіток
17	ДСТУ EN 14096-1:2006	Неруйнівний контроль. Оцінювання цифрових радіографічних плівкових систем. Частина 1. Визначення, кількісні виміри параметрів якості зображення, стандартна контрольна плівка та контроль якості
18	ДСТУ EN 14096-2:2006	Неруйнівний контроль. Оцінювання цифрових радіографічних плівкових систем. Частина 2. Мінімальні вимоги
19	ДСТУ EN 14127:2014	Неруйнівний контроль. Ультразвукове вимірювання товщини
20	ДСТУ EN ISO 17405:2017 (EN ISO 17405:2014, IDT; ISO 17405:2014, IDT)	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Методика контролю покриттів, нанесених наплавленням, катанням та детонаційним напилюванням

21	ДСТУ EN ISO 17640:2018 (EN ISO 17640:2017, IDT; ISO 17640:2017, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролювання та оцінювання
22	ДСТУ EN ISO 17640:2019 (EN ISO 17640:2010, IDT; ISO 17640:2010, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролювання та оцінювання
23	ДСТУ CEN ISO/TR 25107:2015 (CEN ISO/TR 25107:2006, IDT; ISO/TR 25107:2006, IDT)	Неруйнівний контроль. Настанови щодо програм навчання методам неруйнівного контролю
24	ДСТУ ISO 18490:2017 (ISO 18490:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Оцінювання гостроти зору для персоналу неруйнівного контролю
25	ДСТУ ISO 15549:2015 (ISO 15549:2008, IDT)	Неруйнівний контроль. Вихрострумний контроль. Загальні вимоги
26	ДСТУ ISO 17643:2018 (ISO 17643:2015, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Вихрострумний контроль зварних швів аналізуванням у комплексній площині
27	ДСТУ ISO 18563-1:2015 (ISO 18563-1:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація ультразвукового обладнання з фазованими антенними решітками. Частина 1. Прилади
28	ДСТУ ISO 18563-3:2017 (ISO 18563-3:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Визначення характеристик і верифікація ультразвукового обладнання з фазованими антенними решітками. Частина 3. Комбіновані системи

Навчальний посібник «МОНІТОРИНГ СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ (ВВЕДЕННЯ В ПРОФЕСІЮ)»

Видавництво НВФ «Інтерсервіс», форма А4, 962 кольорових ілюстрацій



Перша частина книги присвячена основам дефектоскопії, вона цікава починаючим фахівцям, а інші – являють собою навчальні плакати та оригінальні статті, запозичені з провідних професійних журналів США, Англії, Німеччини та інших країн.

Представлено багато матеріалів за новими технологіями НК. В останні роки почав широко застосовуватися рухомий рентген-телевізійний контроль (РТК). Дефектоскопісти України навчилися виготовляти недорогі, портативні, дистанційно керовані РТК-перетворювачі, за допомогою яких можливо виконувати моніторинг технічного стану будь-яких об'єктів, виготовлених з будь-яких ма-

теріалів. Портативні РТК-перетворювачі можуть бути створені на основі мініатюрних ПЗЗ-матриць або на основі флюороскопічних екранів та оптикоелектроніки високої роздільної здатності, яка використовується в астрономії. Обидва рішення дозволяють виконувати НК у реальному часі без затратних матеріалів. Такі РТК-технології з часом зменшать застосування УЗК і повністю витіснять плівкову радіографію. У книзі описані оригінальні рішення з магнітного, капілярного та інших методів неруйнівного контролю.

Автор ділиться багаторічним досвідом Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, інших організацій НАН України, авторів доповідей на наукових конференціях Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики.

У книзі представлені основи неруйнівного контролю якості металоконструкцій, газо- та нафтопроводів, елементів залізничного транспорту, продукції машинобудування, посудин високого тиску, композиційних матеріалів, а також 120 технологій та навчальних плакатів з моніторингу стану конструкцій.

Під керівництвом проф. В.О.Троїцького, завідувача відділу ІЕЗ ім. Є.О. Патона, виконано чимало робіт з оцінки якості різних споруд, розроблено багато методик радіаційних та інших методів оцінки стану матеріалів.

*Приймаються заявки на замовлення книги:
ndt@paton.kiev.ua, larimart@ukr.net, usndt@ukr.net*

ЦЕНТР СЕРТИФІКАЦІЇ ПРИ УТ НКТД СЕРТИФІКУЄ ПЕРСОНАЛ З НК В ІЗРАЇЛІ

Одна з провідних фірм Ізраїлю, що працює в галузі неруйнівного контролю, – MOREX 71 LTD, – замовила в Центрі сертифікації при УТ НКТД атестацію персоналу з рентгеновського, магнітного, ультразвукового, вихрострумового, капілярного та візуального контролю. Всього мали пройти ресертифікацію згідно з вимогами EN ISO 9712 сімнадцять фахівців, у тім числі, два – на третій кваліфікаційний рівень.

Чому фірма Ізраїлю звернулась за послугами із сертифікації персоналу до ОСП з України?

По-перше, ЦС при УТ НКТД понад два десятиліття успішно працює в галузі сертифікації персоналу в Україні та в багатьох сусідніх країнах. Ми маємо Атестат про акредитацію від Національного агентства з акредитації України, яке, в свою чергу, є членом Європейської кооперації з акредитації (EA), Міжнародного форуму з акредитації (IAF) та підписантом Багатосторонніх Угод про взаємне визнання у сфері «сертифікація персоналу». Таким чином, акредитація, що надається НААУ у вищевказаній сфері, є еквівалентною акредитації, що надається національними органами з акредитації – підписантами угод у більш ніж 80 країнах світу.

По-друге, цінова пропозиція ЦС при УТ НКТД за сертифікацію персоналу вигідно відрізняється від пропозицій інших європейських ОСП.

По-третє, йдучи назустріч побажанням замовника, ми готові працювати в режимі виїзної екзаменаційної сесії. Крім того, в умовах сьогоденної обстановки в Ізраїлі, європейські фахівці з атестації не проявляють бажання там працювати.



Фірма MOREX 71 LTD

Таким чином, два фахівці ЦС при УТ НКТД Юрій Посипайко і Віктор Глуховський поїхали у відрядження до колег Ізраїлю. З Києва через мережу Інтернет їм допомагали в роботі Валентин Литвиненко, Роман Пастовенський та Андрій Шекеро.

Фірма MOREX 71 LTD надає послуги з неруйнівного контролю на всій території країни, працюючи на підприємствах нафтохімічної, аерокосмічної, атомної промисловості, у суднобудуванні, трубопровідному, автомобільному та залізничному транспорті, на технічних базах військово-морських сил тощо. Центральний офіс фірми розташований в містечку Евен Єгуда біля Тель-Авіва, північний – в містечку Кір'ят Біялик біля Хайфи, а південний – в місті Беер Шева.

Наші фахівці відвідали всі три філіали фірми, організовуючи екзаменаційний процес та знайомлячись з роботою кандидатів на ресертифікацію. У вільний час вони мали змогу ознайомитися з життям в Ізраїлі та відвідали Тель-Авів і Єрусалим.



Під час проведення сертифікації

ЛИСТ ГОЛОВИ МІЖНАРОДНОГО КОМІТЕТУ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ DR. SAJEESH K BABU ЩОДО ЗАПРОВАДЖЕННЯ ОБМЕЖЕНЬ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЙ І ГРОМАДЯН РФ



діяльність регулюється австрійським законодавством, а тому санкції, згадані в Регламенті, застосовуються до ICNDT та її діяльності.

Виконавчий орган ICNDT, щодо обов'язків, визначених Статутом ICNDT, статті 8.2 «...нагляда-ти за виконанням політики, схваленої Міжнародним комітетом, відповідно до цього Статуту», відповідно до Регламенту ЄС, вважає «Регламент про санкції проти росії» як достатньо «серйозні підстави» та вирішив наступне:

- Надання будь-яких послуг ICNDT російським товариствам-членам, будь-яким російським організаціям та будь-якими особам з російським громадянством тимчасово припиняється з негайним набранням чинності.
- Протягом терміну цього припинення представникам, делегатам і експертам з росії або з російським громадянством не дозволяється відвідувати засідання ICNDT, включаючи засідання Генеральної асамблеї та робочих груп.
- Членам ICNDT та членам спільноти ICNDT заборонено обходити санкції відповідно до чинного положення.

Відповідно до вищезазначеного, необхідно призупинити членство російського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики (RSNTTD) в ICNDT та будь-які технічні послуги, включаючи реєстрацію в ICNDT MRA Schedule 1, і, отже, усі переваги членства, включаючи послуги зі зв'язків з громадськістю, пов'язані з покращенням іміджу членів та їхніх стосунків із широким загалом та іншими установами, включаючи виставкові зони на заходах, що проводить ICNDT.

Негайне введення цих заходів у дію необхідне для забезпечення узгодженості з міжнародними партнерами, а також створить подальший тиск на російський уряд з метою термінового припинення війни в Україні. Заходи діятимуть доти, доки санкції не будуть скасовані або зняті, і ICNDT бажає, щоб умови дозволили російській спільноті NDT, організаціям і громадянам повернутися до спільноти ICNDT.

Від імені Міжнародного комітету з неруйнівного контролю (ICNDT),
Dr Sajeesh K Babu
Президент ICNDT

Переклад

Шановні представники товариств-членів ICNDT, колеги!

ICNDT і Регламент про санкції проти росії

ICNDT уважно стежить за ситуацією щодо санкцій проти росії, введених Європейським Союзом та ін. З часом Положення було посилено, щоб обмежити широкий спектр послуг та обмін інформацією з росією застосовно до будь-якої організації, що базується в Європейському Союзі. У Статуті ICNDT зазначено, що ICNDT є асоціацією з місцем розташування у Відні і, таким чином, її

КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ І ВИСТАВОК З НКТД

23–26 квітня 2024	Німеччина, Штутгарт	36 th Control – Trade Fair for Quality Assurance (Торговий ярмарок із забезпечення якості)	P.E. Schall GmbH & Co. KG
27–31 травня 2024	Південна Корея, Інчхон	20 th World Conference on Non-Destructive Testing (20 th WCNDT) (20-а Всесвітня конференція з НК)	Korean Society for NDT
10–13 червня 2024	Німеччина, Потсдам	11 th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024) (Європейський семінар з моніторингу структурного здоров'я)	German Society for NDT
10–14 червня 2024	Созопіль, Болгарія	International Conference NDT Days 2024 Щорічна конференція Болгарського товариства з НК	Bulgarian Society for ND
11-13 червня 2024	Канада, Оттава	NDT in Canada 2024 (Щорічна конференція Канадського інституту НК)	Canadian Institute for NDE
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	Беляни 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
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 PAN- NDT) (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



ЧАС ЦИФРОВОЇ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОЇ РАДІОГРАФІЇ (БЕЗ R-ПЛІВКИ). РТК – ЦЕ ПРОСТО, ЯКІСНО, ШВИДКО, ДЕШЕВО!

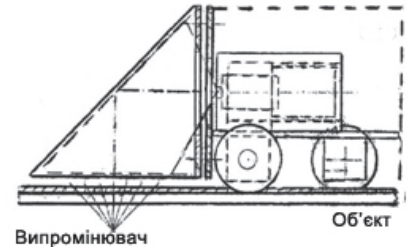
Технологія РТК



Надійно

Цифрову діагностику можна проводити за будь-яких погодних умов! Холод, спека, сніг або дощ – наші прилади працюють завжди! Не потрібні витратні матеріали, проявочні пристрої

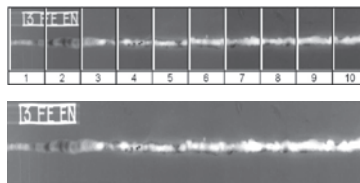
Рухомий РТК-перетворювач на магнітних колесах



ШВИДШЕ

Скорочено у рази час контролю порівняно з плівковою радіографією. Ефективно перевіряти рухомі об'єкти, можна поєднувати з плівковою радіографією

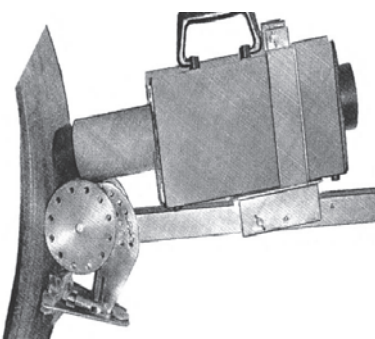
По'єднання окремих цифрових РТК-зображень в одну радіограму об'єкта практично будь-якої форми



ДЕШЕВШЕ

Вартість рентгенотелевізійної радіографії набагато нижча за вартість контролю з використанням плівкової радіографії або інших променевих носіїв інформації

R-апарат на магнітних колесах, що переміщується по поверхні об'єкта по точках виконання експозицій

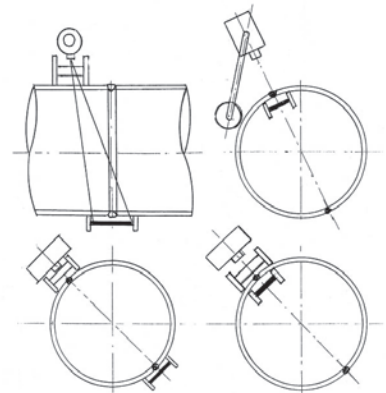


Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, відділ №4

Україна, 03038, м. Київ-38, а/с 20
тел.: (044) 205-22-15, 200-80-57,
(050) 334-33-22
e-mail: ndt@paton.kiev.ua
web: paton.org.ua

Рухомий РТК кільцевих та поздовжніх швів трубопроводів



Для виконання рентгенотелевізійного контролю певного об'єкта Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (відділ №4) розробляє технологію, постачає цифрові перетворювачі, навчає та атестує спеціалістів за правилами міжнародної системи сертифікації (EN ISO 9712)