

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Видавець

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

Передплата 2026

Передплатний індекс 74475. Чотири випуски на рік.
Друкована версія: 1680 грн. за річний комплект з
урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

Електронна версія: 1680 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf). Передплата можлива на попередні
випуски за будь-який рік.

За зміст рекламних матеріалів видавець
відповідальності не несе.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

*Бабак В.П., Богачев І.В., Декуша О.Л., Ковтун С.І.,
Куц Ю.В., Созонов С.В.* Дослідження ультразвуково-
магнітострикційного методу ультразвукового
контролю. Частина 2. Удосконалення та експери-
ментальні дослідження магнітострикційного методу
ультра звукового контролю з малоапертурними пере-
творювачами 3

*Стороженко В.О., Мякий О.В., Орел Р.П.,
Мешков С.М.* Інфрачервона дефектоскопія сонячних
батареї з термогенеруючим шаром на базі варі-
зонних напівпровідників 13

Тороп В.М., Давидов Є.О., Рабкіна М.Д. Аналіз
результатів неруйнівного контролю аустенітних
зварних з'єднань енергоблоку № 3 Чорнобильської АЕС ... 17

*Недосєка С.А., Яременко М.А., Овсієнко М.А., Доли-
ненко В.В., Ващенко В.М.* Етапи відпрацювання
технології АЕ контролю процесів зварювання 36

Мазуренко М.І., Лисенко Ю.Ю. Математична модель
енергоефективного керування багатозональною
системою кондиціонування зі змінним потоком холодоагенту. 44

Михайлов С.Р. Спектральна відповідність рент-
генівського екрана до сенсора в рентгеноте-
левізійних системах 51

ІНФОРМАЦІЯ

Міжнародний Промисловий Форум 2026 59

Новини Українського товариства неруйнівного
контролю та технічної діагностики 62

Видання журналу підтримують:

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Recommended for publishing Editorial Board of the Journal.

Publisher

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

www.patonpublishinghouse.com/egn/journal/tdnk

Subscription 2026

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

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

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Babak V.P., Bohachev I.V., Dekusha O.L., Kovtun S.I., Kuts Y.V., Sozonov S.V. Investigation of ultrasonic magnetostriction method of ultrasonic control. Part 2. Improvement and experimental research of the magnetostriction method of ultrasound testing 3

Storozhenko V.O., Miahkyi O.V., Orel R.P., Meshkov S.M. Infrared termography of solar cells with a thermogenerating layer based on varizone semiconductors 13

Torop V.M., Davydov Ye.O., Rabkina M.D. Analysis of the results of non-destructive testing of austenitic welded joints of the 3th power unit of the Chernobyl NPP 17

Nedosieka S.A., Yaremenko M.A., Ovsiienko M.A., Dolynenko V.V., Vashchenko V.M. Stages of development of AE control technology for welding processes..... 36

Mazurenko M.I., Lysenko I.Y. Mathematical model of energy-efficient control of a multi-zone air conditioning system with variable refrigerant flow 44

Mikhailov S.R. Spectral correspondence of X-ray screen to the sensor in X-ray television systems 51

International Industrial Forum 2026 59

News of the Ukrainian society for non-destructive testing 62

INFORMATION

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 УЛЬТРАЗВУКОВОГО МАГНІОСТРИКЦІЙНОГО МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ

Частина 2. Удосконалення та експериментальні дослідження магніострикційного методу ультразвукового контролю з малоапертурними перетворювачами

В.П. Бабак¹, І.В. Богачев¹, О.Л. Декуша¹, С.І. Ковтун¹, Ю.В. Куц^{1,2}, С.В. Созонов¹

¹Інститут загальної енергетики НАН України. 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 172

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: y.kuts@ukr.net

У першій частині статті було проаналізовано сучасні тенденції використання магніострикційних ефектів у неруйнівному контролі та вимірювальній техніці. Аналіз публікацій з цієї проблематики засвідчив підвищення зацікавленості дослідників у поглибленому вивченні можливостей магніострикційних ефектів як основи для розроблення нових методів ультразвукового неруйнівного контролю (УНК). Було зазначено, що перспективним напрямом досліджень є створення методів та засобів УНК на основі малоапертурних магніострикційних перетворювачів (ММП). Такі перетворювачі дають змогу здійснювати контроль об'єктів складної геометрії, за сухого контакту з ММП та у широкому діапазоні температури об'єктів контролю. Дана стаття присвячена питанням розроблення засобів УНК із використанням ММП, для яких ґрунтується на ефектах Джоуля та Віллари, і дослідженню можливостей їх застосування в задачах УНК. Зокрема розглянуто особливості конструкцій ММП, їхні характеристики, особливості формування сигналів випромінюючих і приймаючих перетворювачів. Для проведення експериментальних випробувань використано оригінальну систему УНК із частотою сигналів 0,5 МГц, що дало змогу оцінити можливості розробленого методу УНК на тестових зразках у вигляді металевих пластин із дефектами у формі отворів різного діаметру та контролю дефектів зварних з'єднань. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 17.

Ключові слова: ультразвуковий неруйнівний контроль, магніострикційні ефекти, малоапертурні магніострикційні перетворювачі

Вступ. Ультразвуковий неруйнівний контроль (УНК) є загально визнаним як один із найінформативніших методів дослідження матеріалів і конструкцій [1, 2]. Цей вид контролю широко використовується в різних галузях промисловості, енергетиці, на транспорті тощо. Зокрема методи УНК є важливим інструментом для забезпечення надійності та безпеки авіаційної техніки, починаючи від створення та дослідження характеристик авіаційних матеріалів [3, 4] і до оцінювання якості конструкційних елементів авіаційної техніки в процесі експлуатації [5].

Прогрес у розвитку інформаційно-вимірювальних технологій та цифрового опрацювання сигналів дають змогу розкрити нові можливості цього виду контролю та розширювати сфери його застосування. Усе це сприяє тому, що питання розроблення та впровадження нових технологій УНК залишається галуззю наукових досліджень, яка динамічно розвивається. Останнім часом приділяється значна увага питанню вдосконалення методів УНК, що ґрунтуються на магніострикційних

ефектах [6–8]. У першій частині статті [9] було зроблено висновок, що в рамках цього напрямку досліджень перспективним питанням є розроблення методу та засобу УНК на основі малоапертурних магніострикційних перетворювачів (ММП).

Метою статті є взагальнення досліджень авторів, спрямованих на вдосконалення магніострикційного методу УНК за рахунок поліпшення конструкції ММП і покращення способів формування та опрацювання сигналів ММП, створення на цій основі лабораторного стенду та експериментальні дослідження можливостей цього методу.

Аналітична частина. Загальна характеристика ефектів Джоуля та Віллари. Під магніострикцією розуміють деформацію тіл при зміні їхнього магнітного стану, яка найбільш відчутно проявляється в тілах із феромагнітних матеріалів і феритів. У разі намагнічування тіл у зовнішньому знакозмінному магнітному полі виникає їхня механічна деформація – розтягування та стискання, що призводить до виникнення ультразвукових коливань. Сучасна теорія магнетизму дає таке пояснення цьому явищу: під впливом зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів перебудовуються, орієнтуючись у напрямку поля, що

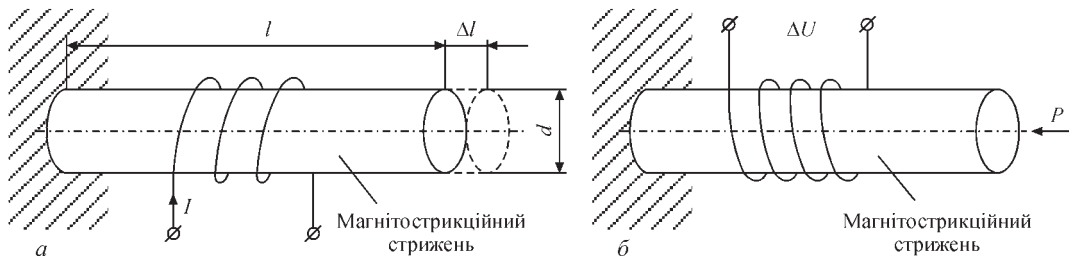


Рис. 1. Ілюстрація дії ефектів Джоуля та Віллари

викликає зміну міжатомних відстаней і, відповідно, викривлення кристалічної решітки матеріалу.

Фізичний ефект, відомий як ефект лінійної магнітострикції, було відкрито в 1842 р. відомим англійським фізиком Д.П. Джоулем [11]. Суть ефекту Джоуля ілюструє рис. 1, а. Якщо через котушку збудження, намотану на стрижень із магнітострикційного матеріалу завдовжки l і діаметром d , пропустити електричний струм I , то в стрижні виникне поздовжнє магнітне поле, під впливом якого останній змінить свою довжину на величину Δl . Однією з основних характеристик магнітострикційного матеріалу є відносна магнітострикція $\delta(B)$, яка визначається виразом:

$$\delta(B) = \Delta l(B) / l, \quad (1)$$

де B – магнітна індукція в стрижні.

Магнітострикція перетворює змінне магнітне поле в механічні коливання, які поширюються як ультразвукові хвилі. Згенеровані у такий спосіб ультразвукові коливання можна використовувати для неруйнівного контролю матеріалів. Коли ультразвукові хвилі поширюються через матеріал об'єкту контролю (ОК), вони відбиваються від дефектів або неоднорідностей, таких як тріщини чи пори. Магнітострикційний метод дає змогу отримувати відбиті від неоднорідностей хвилі або фіксувати зміни коефіцієнта акустичного тракту і в такий спосіб виявляти дефекти всередині матеріалу.

Магнітний стан феромагнетика визначається не тільки магнітним полем, але й зовнішніми пружними напруженнями, які діють на стрижень. Магнітопружний ефект, який називають зворотним магнітострикційним ефектом, виникає внаслідок взаємозв'язку між пружними напруженнями та зміною намагніченості матеріалу стрижня. Зворотним ефектом для лінійної магнітострикції є магнітопружний ефект або ефект Віллари (рис. 1, б), який був відкритий у 1865 р. італійським фізиком Е. Віллари [9]. Ефект пояснюється тим, що внаслідок дії механічних напружень у матеріалі стрижня змінюється його доменна структура, отже й намагніченість, внаслідок чого на електричній котушці з'являється електрорушійна сила (е.р.с.) ΔU . Цей

ефект використовується в ММП для приймання ультразвукових хвиль після поширення в ОК.

Для практичного використання розглянутих ефектів необхідно взяти до уваги той факт, що залежність між магнітною індукцією та механічною деформацією у магнітострикційному матеріалі має нелінійний характер [16], що потребує додаткових заходів для лінеаризації магнітострикції. Остання здійснюється шляхом створення постійної магнітної індукції в матеріалі стрижня, що можна виконати за допомогою постійних магнітів, або додатковою котушкою, яка живиться постійним струмом, або за рахунок залишкової намагніченості матеріалу стрижня. За одночасної дії постійної B_0 та змінної B_{\sim} магнітної індукції у стрижні виникають механічні коливання такої самої частоти, що й частота B_{\sim} (рис. 2, де H_0 та H_{\sim} – напруженості постійної та змінної складової зовнішнього магнітного поля відповідно).

Лінеаризація магнітострикції спрямована на виведення магнітомеханічної залежності магнітострикційного матеріалу з квадратичної зони, яка має місце в околі значення $B_0 = 0$. Якщо $B_0 \gg B_{\sim}$, між механічними та магнітними змінними існує співвідношення, близьке до лінійного. Саме ці два ефекти – Джоуля та Віллари покладені в основу створення ММП.

Формулювання вимог до ММП та їхня реалізація. Різні аспекти створення ММП розглядалися авторами в [13–15]. Нижче узагальнено вимоги до ММП, особливості їхньої конструкції та пов'язану з цим специфіку формування сигналів ММП.

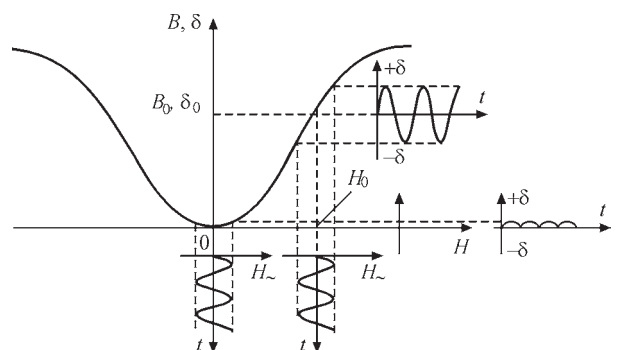


Рис. 2. Залежність відносної магнітострикції від підмагнічування матеріалу стрижня

Вимоги до ММП. При створенні ММП було необхідно вирішити низку завдань:

- підібрати магнітострикційний матеріал для хвилеводу;
- забезпечити малу апертуру перетворювача;
- вжити заходів до підвищення коефіцієнта електромагнітного перетворення;
- забезпечити лінеаризацію магнітострикції;
- мінімізувати шуми ММП-приймача;
- електрично узгодити перетворювачі з електронними блоками.

Компромiсним варіантом між забезпеченням найкращих магнітострикційних характеристик і можливостями практичної реалізації ММП є використання в якості матеріалу осердя сплаву пермендію 49КФ, який має один із найбільших серед інших матеріалів коефіцієнт магніто механічного зв'язку. Інші важливі характеристики цього матеріалу мають такі значення: щільність – $\rho_{II} = +8200 \text{ кг/м}^3$; модуль Юнга (поздовжньої пружності) – $Y^{10} = 2,05 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; швидкість поздовжньої хвилі – $c_l = 5200 \text{ м/с}$; відносна магнітна проникність – $\mu^* = 200$; коерцитивна сила – $H_c = 140 \text{ А/м}$; індукція насичення – $B_s = 2,4 \text{ Тл}$; питомий електричний опір – $\rho_{\text{ел}} = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; температура Кюри – $\theta = 980 \text{ }^\circ\text{C}$; раціональне поле підмагнічування – $H_{II} = (0,4 \dots 0,6) \cdot 10^3 \text{ А/м}$.

У представленій розробці використано пружні коливання частотою 0,5 МГц, для якої довжина хвилі у пермендію становить $\lambda_{II} = c_l / f = 5200 / 500000 = 10,4 \text{ мм}$. Під апертурою ММП розумітимемо діаметр його хвилеводу. Саме цей параметр визначає площу плоскої ділянки на поверхні ОК, що контактує з хвилеводом ММП, через яку передається/приймається енергія пружної хвилі. Діаметр осердя обраний рівним $d = 1 \text{ мм}$, що задовольняє умові $d_c \ll \lambda_{II}$, а відповідна площа контактної площадки – $0,785 \text{ мм}^2$. Власне це й дає підстави називати такі перетворювачі малоапертурними.

Підвищення коефіцієнта електромагнітного перетворення здійснюється за рахунок використання двосекційної котушки збудження з рознесенням секцій на відстань $\lambda_{II}/2$ (рис. 3) і включеними назустріч. У цьому випадку при живленні котушки ММП-передавача радіоімпульсним сигналом амплітуда сумарного струмового сигналу в середній частині подвоюється, що веде до збільшення у ~2 рази змінної складової магнітного поля у хвилеводі без збільшення амплітуди струму збудження. Побічним негативним наслідком такого прийому є збільшення тривалості радіоімпульсу.

Лінеаризація магнітострикції забезпечується за допомогою підмагнічування хвилеводу постійним магнітом (на рисунку не показаний). Оскільки електрична котушка на феромагнітному осерді являє собою антену, то котушка ММП-приймача також виконана двосекційною (рис. 3), що забезпечує зменшення впливу зовнішніх завад і шумів. Ефект заглушення шуму пояснює еквівалентна електрична схема (рис. 4), яка містить послідовно ввімкнені е.р.с. сигналу U_{c1} , U_{c2} та шуму $U_{ш1}$, $U_{ш2}$, які виникають у секціях котушки ММП-приймача та які навантажені на опір R_{II} . Схема складена з урахуванням включення назустріч секцій котушки та їх рознесенням у просторі на величину $\lambda_{II}/2$. Двосекційне виконання котушки ММП-приймача забезпечує не тільки додаткове збільшення корисного сигналу за рахунок синфазного включення е.р.с. U_{c1} , U_{c2} , але й значне заглушення шуму за рахунок протифазного включення е.р.с. $U_{ш1}$, $U_{ш2}$.

Експериментально було доведено, що використання багат шарових котушок ММП є малоефективним. Тому котушки ММП виконані одношаровими та містять усього декілька десятків витків, а їхній електричний імпеданс може становити 1...20 Ом. Узгодження низькоомного імпедансу ММП з високоомним імпедансом електронного блоку (зазвичай становить 50...8000 Ом) здійснюється за допомогою трансформаторів, які розташовуються у перетворювачі поблизу котушок ММП.

Конструкція ММП. Конструкція ММП у цілому подібна до наведеної в [10–12] (рис. 5). Розміри хвилеводу: діаметр 1 мм, довжина 60 мм. У конструкції ММП поглинаюче навантаження 7 введено з метою виключення перевідбиття ультразвукових коливань від неробочого кінця хвилеводу. Решта елементів конструкції визначається вимогами до ММП, розглянутими раніше. Результати

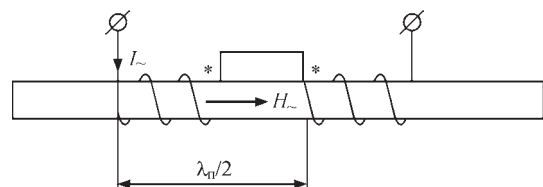


Рис. 3. Електричне підключення та розташування котушок на хвилеводі

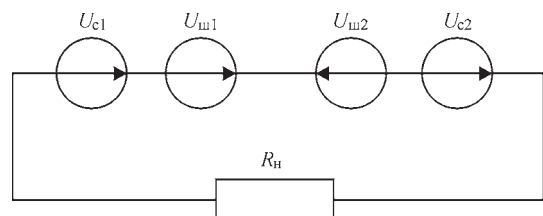


Рис. 4. Електрична схема формування е.р.с. у котушках ММП-приймача

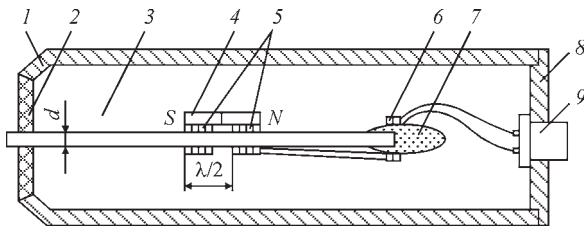


Рис. 5. Конструкція ММП: 1 – корпус, 2 – ультразвукове дзеркало, 3 – хвилевід, 4 – постійний магніт, 5 – електричні котушки, 6 – трансформатор, 7 – поглинаюче навантаження, 8 – кришка, 9 – роз'єм

вимірювання параметрів котушки ММП наведено в табл. 1.

Вимірювання виконувалось вимірювачем RLC імпедансу UNI-T UT-612. Згідно з даними табл. 1 модуль комплексного опору котушки ММП не перевищує 4,2 Ом, тобто являє собою низькоомне навантаження. Узгодження перетворювача з електронними блоками системи виконано за допомогою трансформаторів. Малі розміри контактної площадки, через яку вводяться ультразвукові коливання в ОК, визначаються діаметром хвилеводу, що дає змогу виконувати дослідження на ОК зі складною геометрією поверхні.

Формування сигналу ММП-випромінювача та його спектральний аналіз. З метою більш обґрунтованого формування вимог до електронних блоків розроблюваної апаратури було проведено аналіз сигналів ММП. В якості сигналу збудження прийнято радіоімпульс, отриманий із гармонічної напруги $\sin(2\pi ft)$, $t \in (-\infty, \infty)$ амплітудою 1 В і частотою $f = 0,5$ МГц, який представляється наступною моделлю:

$$u(t, \tau) = I(\tau) \sin(2\pi ft), \quad \tau, t \in (-\infty, \infty), \quad (2)$$

де T – період сигналу-носія ($T = 2$ мкс), $I(\tau)$ – індикаторна функція:

$$I(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau \in [0, 2T], \\ 0, & \tau \notin [0, 2T]. \end{cases} \quad (3)$$

У дискретному представленні сигнал (2) подається вибірками, отриманими із частотою дискретизації – 64 МГц (128 точок на період сигналу-носія), відповідно період дискретизації – 15,625 нс (рис. 6, а). Аналізована ділянка сигналу (2) обмежена інтервалом $4T = 8$ мкс.

З урахуванням того, що довжина однієї секції котушки збудження дорівнює $\lambda_{II}/4$ (тобто співставна з довжиною хвилі у хвилеводі), відносна магнітострикція хвилеводу $\delta(t)$ визначалась супер-

позицією сукупності дій одновиткових котушок із різним просторовим положенням. У розрахунковій моделі прийнято, що котушка збудження має 32 витки, а її довжина $\lambda_{II}/4 = 2,6$ мм. Враховуючи ці дані та беручи до уваги, що відносна магнітострикція $\delta(t)$ як функція часу формується одночасно сигналами двох секцій котушок збудження (рис. 3), її аналітичне представлення має вигляд:

$$\delta(t) = K_{мп} \left[\sum_{g=1}^{32} I \left(t - \frac{T}{128} g \right) \sin \left(2\pi f \left(t - \frac{T}{128} g \right) \right) - \sum_{g=1}^{32} I \left(t - \frac{T}{64} \left(1 + \frac{g}{2} \right) \right) \sin \left(2\pi f \left(t - \frac{T}{64} \left(1 + \frac{g}{2} \right) \right) \right) \right], \quad (4)$$

де $K_{мп}$ – коефіцієнт перетворення напруги у відносну магнітострикцію (у виконаних модельних експериментах прийнято $K_{мп} = 10^{-3} \text{ В}^{-1}$). Графік функції $\delta(t)$ представлено на рис. 6, б.

Деформація стрижня ММП (4) збуджує в ОК короткий ультразвуковий імпульс (хвильовий пакет), який поширюється в ОК і перетворюється у ММП-приймачі у відповідний електричний сигнал. Оскільки цей сигнал близький за формою до функції $\delta(t)$, для його аналітичного представлення можна використати модель вузькосмугового сигналу [18], яка в загальному вигляді та цифровій формі подання надається виразом:

$$u[j] = U[j] \cdot \cos(\Phi[j]), \quad j = \overline{1, J}, \quad (5)$$

де $U[j]$ – обвідна сигналу, $\Phi[j]$ – фаза сигналу (середня частота несучої радіоімпульсу близька до значення f).

Під час поширення ультразвукової хвилі в ОК її обвідна та фаза піддаються модуляції внаслідок неоднорідності характеристик матеріалу ОК та особливостям його геометрії, внаслідок чого функції $U[j]$ та $\Phi[j]$ набувають інформаційної змістовності. Крім того, інформаційним параметром може бути затримка τ сигналу (5) відносно сигналу збудження ММП-випромінювача (2).

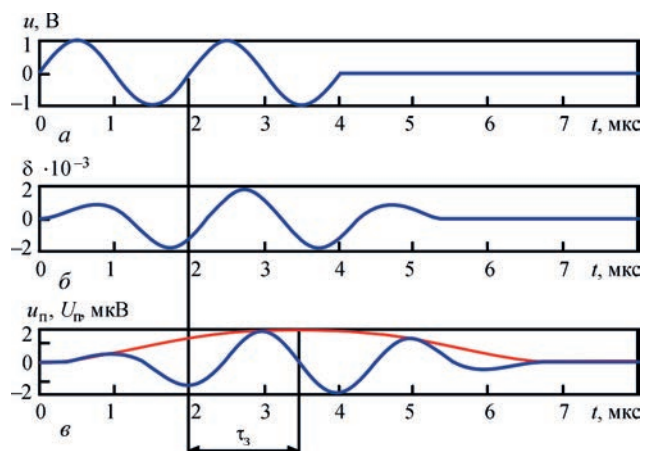


Рис. 6. Графіки модельних сигналів ММП

Таблиця 1. Параметри котушки ММП

Об'єкт вимірювання	Індуктивність, мкГн	Опір, Ом
Одна секція котушки ММП	12,3	0,38
Двосекційна котушка ММП	8,2	0,72

Формування сигналів ММП-приймача в акустичному тракту. Особливістю ММП-випромінювача є те, що він у першому наближенні може розглядатись як точковий випромінювач [16]. При взаємодії ММП з ОК в останньому можуть збуджуватись різні типи хвиль – поздовжні, поперечні, нормальні та ін., які мають різні властивості [17]. Практичне використання ММП потребує коректного врахування типу хвиль, умов їхнього збудження, дисперсії, швидкості їхнього поширення в ОК тощо. Для розроблення та обґрунтування методик контролю особливо важливим є врахування дисперсії хвиль, тобто залежності їхньої фазової швидкості c_ϕ від частоти. Під фазовою швидкістю розуміється швидкість переміщення в просторі фази гармонічного коливання [17]. Фазова швидкість виражається через частоту f , довжину хвилі λ та хвильове число $k = 2\pi/\lambda$ наступним чином:

$$c_\phi = f\lambda = 2\pi f/k = \omega/k. \quad (6)$$

Локалізований у часі та просторі хвильовий пакет (рис. 6, б) поширюється з груповою швидкістю $c_{гр}$. За відсутності дисперсії $c_{гр} = c_\phi$. Чим коротше хвильовий пакет, тим ширший його спектр. За наявності дисперсії різні частотні компоненти хвильового пакету поширюються з різними фазовими швидкостями, тому $c_{гр} \neq c_\phi$, що, зокрема, має місце у випадку використання нормальних хвиль.

Розглянемо два випадки поширення в ОК ультразвукової хвилі з дисперсією та без дисперсії швидкості.

1. ММП-випромінювач в ОК може збуджувати такі типи хвиль, що поширюються в ОК без дисперсії швидкості [16]:

– поздовжню хвилю (розтягання-стискання), що поширюється в середовищі зі швидкістю:

$$c_l \cong \sqrt{Y^{10}/\rho}; \quad (7)$$

– поперечну (зсувну) хвилю:

$$c_t \cong \sqrt{G/\rho}; \quad (8)$$

– поверхневу хвилю (хвилю Релея):

$$c_R \cong \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} c_t, \quad (9)$$

де G – модуль зсуву, ρ – густина речовини, ν – коефіцієнт Пуассона.

Для цих типів хвиль дисперсія швидкості не спостерігається.

За використання цих типів хвиль у ММП-приймачі пружні коливання середовища перетворення в напругу відбуваються в спосіб, аналогічний перетворенню в ММП-випромінювачах (тільки у зворотному напрямі). За відсутності дис-

персії швидкості сигнал на виході ММП-приймача $u_n(t) = u_n[jT_d]$, $j = \overline{1, J}$ та його обвідна $U_n(t) = U_n[jT_d]$, $j = \overline{1, J}$, за прийнятих у моделі значень $K_{мп} = 10^{-3}$ В та коефіцієнта акустичного тракту $K_{ат} = 1$, представлено на рис. 6, в (відповідно криві 1 та 2). Визначення обвідної сигналу відбувається за допомогою дискретного перетворення Гільберта (ДПГ) [19], що реалізується оператором \mathbf{H}_d . Останній дає змогу отримати Гільберт-образ вибірки $\tilde{u}_n[j] = \mathbf{H}_d(u_n[j])$.

Значення оцінок обвідної сигналу для всіх точок вибірки обчислюються як:

$$U_n[j] = \sqrt{u_n^2[j] + \tilde{u}_n^2[j]}, \quad j = \overline{1, J} \quad (10)$$

Аналіз сигналу ММП-приймача та його обвідної дає змогу зробити такі висновки:

– Максимальне значення амплітуди сигналу збільшилось у $\sim 3,4$ рази.

– Тривалість прийнятого сигналу збільшилась на один період і становить $3T$.

– Центр обвідної прийнятого сигналу змістився в часі на величину $\tau_3 \approx 0,75T$ (без урахування затримки в хвилеводах перетворювачів).

– Перша й остання півхвилі прийнятого сигналу мають збільшену на величину $0,125T$ тривалість.

Фрагмент спектру Фур'є $X(f)$ отриманої моделі сигналів ММП-приймача представлено на рис. 7 (інтервал між гармоніками спектру становить 125 кГц). Виявлені особливості модельних сигналів ММП-приймача необхідно враховувати при оцінюванні параметрів реальних сигналів.

2. ММП-випромінювач в обмежених середовищах – пластинах і шарах може збуджувати нормальні хвилі (хвилі Лемба). Пластиною вважається ОК, що має дві ненавантажені плоско-паралельні поверхні та товщину, яка є співставною з довжиною поперечної хвилі. Хвилі Лемба мають дисперсію швидкості [16, 20]. Наприклад, швидкість поширення фази гармонічної нормальної симетричної хвилі нульової моди вздовж поверхні пластини дорівнює:

$$c_{Ns_0} = \frac{\pi h}{\lambda} \sqrt{Y^{10}/\rho} \quad (11)$$

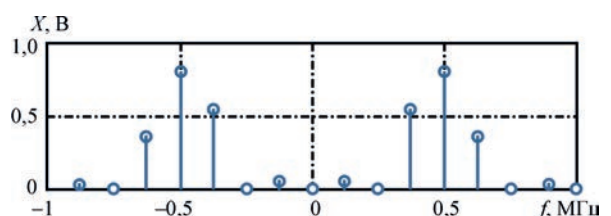


Рис. 7. Фрагмент спектру Фур'є сигналів ММП-приймача

Саме залежність швидкості c_{N_0} від довжини хвилі (отже й від частоти ультразвукових коливань) свідчить про дисперсію швидкості цих хвиль. У хвильовому пакеті, що поширюється в ОК, присутні коливання декількох складових із діапазону в околі несучої частоти ω (рис. 6). У такому хвильовому пакеті з достатньо вузьким спектром та за умови незначних відмінностей фазових швидкостей його гармонічних складових і не дуже великих відстаней форма обвідної хвильового пакету спотворюється не так помітно, а дисперсійні властивості середовища позначаються лише на швидкості переміщення у просторі обвідної, яка визначається груповою швидкістю хвилі [17]:

$$c_{гр}(\omega) = \frac{d\omega}{dk} \quad (12)$$

При цьому сама хвиля «біжить» всередині обвідної з фазовою швидкістю $c_{\phi} = \omega/k$ (6), яка відповідає частоті сигналу-носія (рис. 8).

Зв'язок між фазовою та груповою швидкостями хвильового пакету отримується шляхом диференціювання виразу (12) по k з урахуванням (6):

$$c_{гр}(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(c_{\phi}k)}{dk} = c_{\phi} + k \frac{dc_{\phi}}{dk} = c_{\phi} - \lambda \frac{dc_{\phi}}{d\lambda} \quad (13)$$

Співвідношення (13) підтверджує той факт, що за відсутності дисперсії маємо $c_{гр} = c_{\phi}$. У випадку нормальної дисперсії, тобто за виконання умови $c_{гр} < c_{\phi}$, і при поширенні хвильового пакету в просторі в його «хвостовій» частині виникатимуть усе нові максимуми та мінімуми, які зі зміною відстані x переміщатимуться в напрямку його головної частини.

Модульована хвиля (немонохроматична), на відміну від монохроматичної хвилі, має здатність передавати певну інформацію і ця передача здійс-

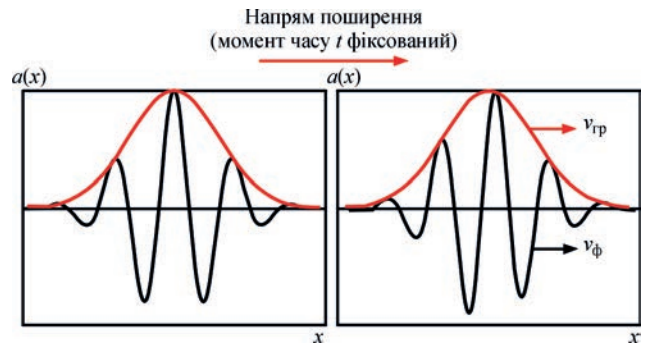


Рис. 8. Поширення хвильового пакету в дисперсійному середовищі

нюється зі швидкістю $c_{гр}$. Цей факт необхідно враховувати в методиках опрацювання сигналів ММП-приймача при використанні хвиль Лемба.

Експериментальна частина. Структура лабораторного стенду для дослідження магнітострикційного методу УНК з ММП. Структуру лабораторного стенду УНК з ММП наведено на рис. 9.

Стенд забезпечує формування сигналу ММП-випромінювача, первинне опрацювання сигналів ММП-приймача, виділення, аналіз і збереження інформаційних параметрів цих сигналів. Стенд складається із закріплених у спеціальному тримачі випромінюючого та приймаючого ММП, модуля формування та попереднього опрацювання сигналів ММП та апаратно-програмного модуля. До складу першого модуля входять: генератор радіоімпульсного сигналу, що забезпечує збудження акустичної хвилі у ММП-випромінювачі; підсилювач сигналів ММП-приймача (сенсора) та аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Оцифровані дані передаються в апаратно-програмний модуль, де відбувається формування вибірки інформативного сигналу, її фільтрація, оцінювання параметрів сигналу, відображення результатів та їхнє збереження.

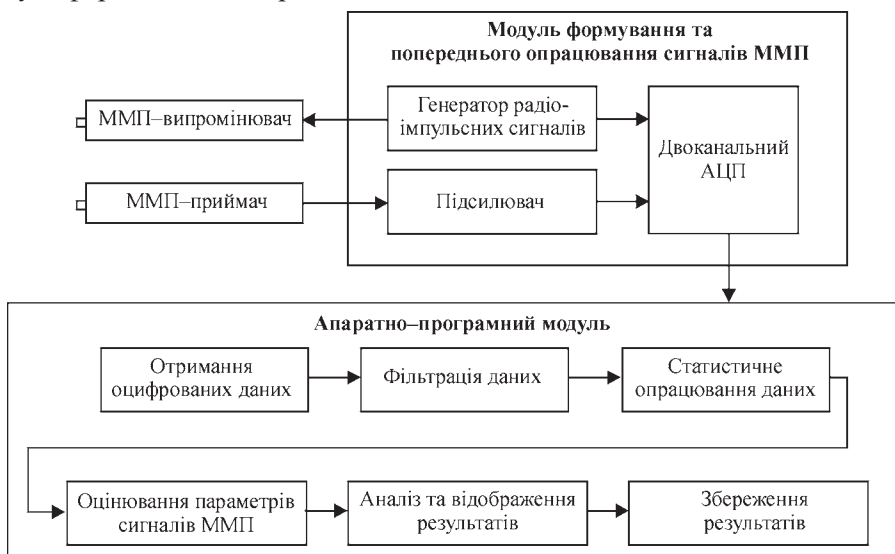


Рис. 9. Структура лабораторного стенду УНК з ММП

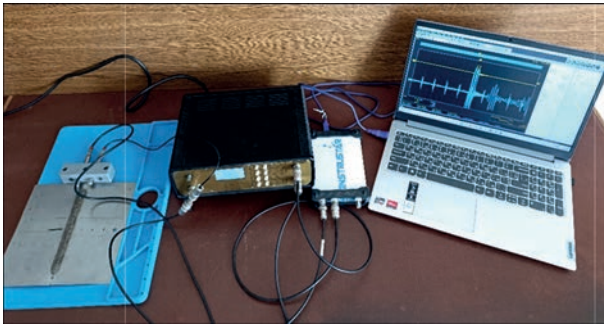


Рис. 10. Загальний вигляд лабораторного стану УНК з ММП

Таблиця 2. Основні технічні характеристики лабораторного стану

Робоча частота перетворювачів, МГц	0,5
Частота зондуючих імпульсів, Гц	1 ... 100
Напруга на випромінювачі, В	0 ... 10 на навантаженні 0,5 Ом
Форма зондуючих імпульсів	радіоімпульс
Коефіцієнт підсилення підсилювача	до 5000
Розрядність АЦП	12 дв. розрядів
Вхідний імпеданс АЦП	опір 1 МОм, ємність 25 пФ
Кількість каналів АЦП	2
Максимальна частота дискретизації АЦП	200 МГц
Джерело живлення системи	мережа 230 В, 50 Гц

Загальний вигляд лабораторного стану УНК з ММП і тестовий зразок наведено на рис. 10. Технічні характеристики лабораторного стану наведено в табл. 2.

Експериментальне дослідження можливостей магністрикційного методу УНК на тестових зразках. Проведено дослідження поширення ультразвукових хвиль у зразках сталі 3 у формі пластин різної товщини з розмірами 100×50×1 мм, 100×50×2 мм, 100×50×2,5 мм з метою встановлення залежності між товщиною пластин і характеристиками виміряного сигналу ММП-приймача. У випробуваннях проводилось визначення амплітуди сигналу у випадку його поширення в пластині на фіксовану відстань 25 мм, на якій встановлювались два ММП. Фрагменти отриманих сигналів і залежність максимального значення їхньої амплітуди від товщини зразка наведені відповідно на рис. 11, 12.

З аналізу наведеного на рис. 12 графіка встановлено, що амплітуда виміряного сигналу зменшується пропорційно збільшенню товщини досліджуваного зразка. Така залежність може бути використана для оцінювання корозійних уражень тонкостінних балонів і трубопроводів.

На тестовому зразку сталі 08кп розміром 200×200×0,5 мм (рис. 13), що містив штучні дефекти (отвори) різного діаметра (1, 2, 3 мм) було проведено дослідження поширення ультразвукових хвиль. Використовувався тінювий метод

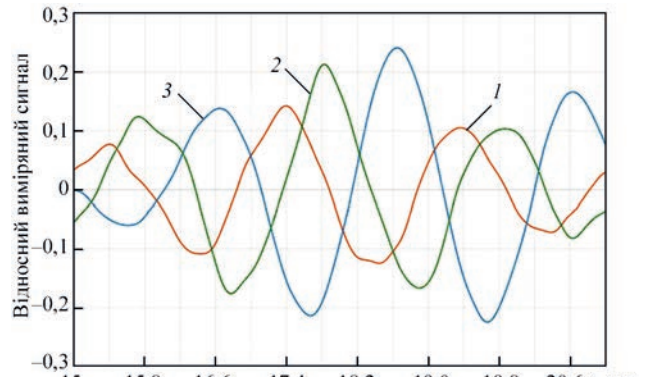


Рис. 11. Фрагменти сигналів ММП-приймача в досліді з пластинами із сталі 3 завтовшки: 1 – 2,5 мм, 2 – 2 мм, 3 – 1 мм

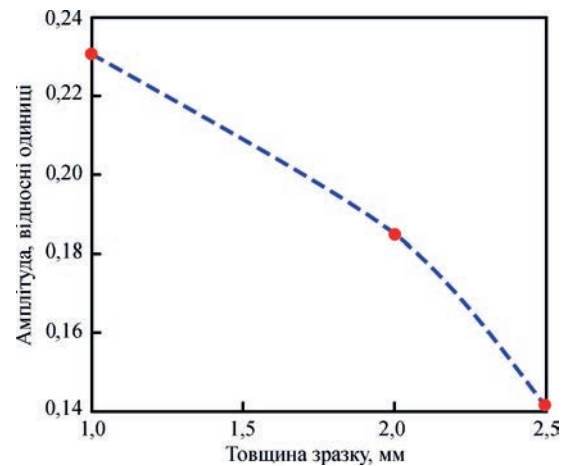


Рис. 12. Залежність максимальної амплітуди сигналу ММП-приймача від товщини зразка

УНК [2, 16], дефект розташовувався посередині між ММП-випромінювачем та ММП-приймачем, відстань між якими дорівнювала 25 мм.

Фрагменти отриманих сигналів ММП-приймача при прозвучуванні ділянок зразка з отворами різних діаметрів наведено на рис. 14, а на рис. 15 – залежність амплітуди сигналу від діаметра отворів.

Аналіз наведених на рис. 14, 15 даних засвідчив, що амплітуда виміряного сигналу зменшується пропорційно збільшенню діаметра отвору (1, 2, 3 мм). Цей результат є важливим для підтвердження можливості застосування тінювого методу із запропонованими ММП у задачі виявлення дефек-

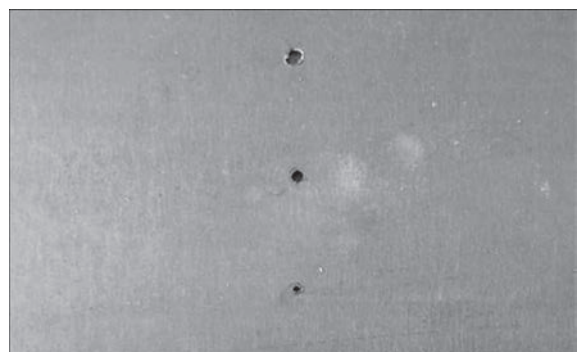


Рис. 13. Тестовий зразок сталі 08кп зі штучними дефектами – отворами діаметром 1, 2, 3 мм

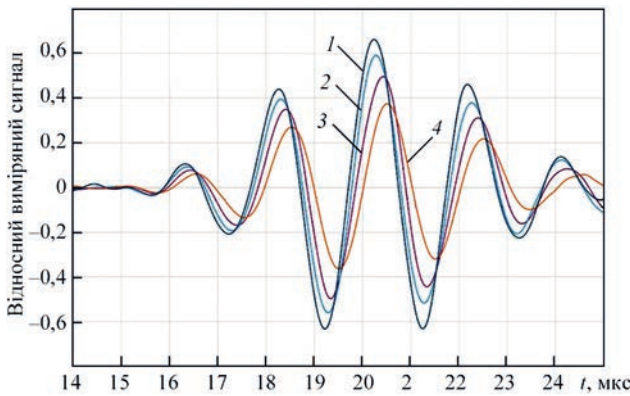


Рис. 14. Фрагменти сигналів ММП-приймача в зразку сталі марки 08кп з отворами різного діаметра: 1 – ізотропна, 2 – отвір 1 мм, 3 – отвір 2 мм, 4 – отвір 4 мм

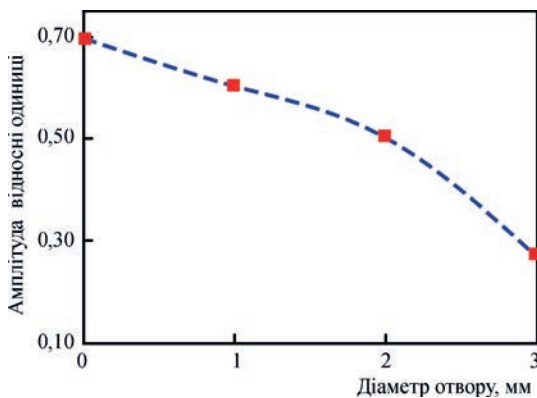


Рис. 15. Залежність амплітуди сигналу ММП-приймача від діаметра отворів

тив типу порожнин у тонких листах при розмірі дефектів менше за довжину хвилі у зразку, а також у задачі контролю зварних швів тонких листів. І в цьому випадку амплітуда сигналу ММП-приймача як інформаційна ознака виявилась чутливою до розмірів дефекту.

Апробація методу УНК із використанням ММП у задачі контролю дефектів зварних з'єднань металевих листів. Експериментальні дослідження було проведено на зразках тонких металевих листів зі зварним швом за відсутності

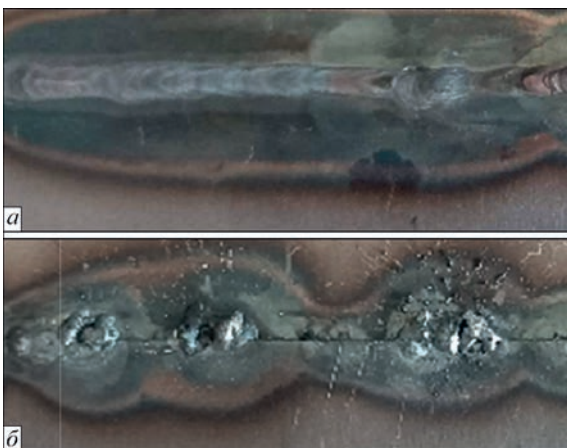


Рис. 16. Зразок зварного шва: а –ділянка без дефекту; б – ділянка з дефектом

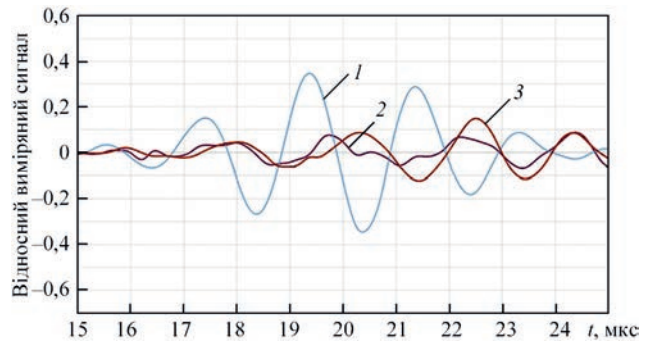


Рис. 17. Графіки сигналів ММП-приймача при контролі зварного з'єднання тонких металевих листів зразки зварного шва: 1 – без дефекту, 2, 3 – з дефектом

(рис. 16, а) та наявності дефекту (рис. 16, б). Використовувався тіньовий метод УНК. Фрагменти графіків сигналів ММП-приймача наведено на рис. 17.

За результатами експерименту встановлено, що ультразвуковий сигнал проходить бездефектну ділянку зварного шва, практично не змінюючи форми сигналу та без додаткового зменшення амплітуди. Натомість дефекти у шві суттєво зменшують амплітуду прийнятого сигналу (більше ніж у 2 рази), що є надійною ознакою наявності дефекту.

При викладенні результатів експериментальних досліджень частково наведено матеріали [20].

Висновки

На теперішній час, у зв'язку з появою та використанням нових конструкційних матеріалів і технологій виготовлення виробів, необхідністю виявлення дефектів виробів на ранніх стадіях розвитку, проблема створення інноваційних методів УНК матеріалів і виробів є актуальною у всьому світі. До кола нових перспективних методів УНК належить метод, що ґрунтується на використанні малоапертурних магніострикційних перетворювачів.

За результатами проведених модельних та експериментальних досліджень зроблено такі висновки.

1. Запропонований спосіб прямого та зворотного перетворення електричних та ультразвукових сигналів у ММП дає змогу підвищити ефективність перетворення, але разом з цим призводить до деформації ультразвукового сигналу та його додаткової затримки, що необхідно враховувати при опрацюванні сигналів ММП та оцінюванні їхніх інформативних параметрів – амплітуди, фази та затримки.

2. У дослідях на тестовому зразку у формі пластини зі сталі 08кп з отворами різного діаметра (1, 2, 3 мм) із застосуванням тіньового методу УНК встановлено обернено пропорційну залежність

амплітуди сигналу ММП-приймача від діаметра отвору.

3. Проведено експериментальні дослідження на зразках листової сталі 3 різної товщини (1, 2 та 2,5 мм), що дало змогу встановити залежність амплітуди сигналу ММП-приймача при поширенні ультразвукового коливання в зразку від товщини зразка: амплітуда сигналу зменшується обернено пропорційно товщині досліджуваного зразка.

4. Отримані результати контролю на зразках зварних з'єднань тонколистових матеріалів підтвердили можливість застосування методу УНК із використанням ММП у задачі виявлення дефектів у таких швах.

У подальшому планується проведення досліджень ефективності методу УНК з ММП для інших типів матеріалів і різних видів дефектів (тріщин, непроварів, розшарування тощо), а також дослідження особливостей використання затримки сигналів як інформаційної ознаки при використанні хвиль Лемба для розв'язання різних задач УНК.

Список літератури

1. Aquil Ahmad, Leonard J. Bond (2018) *Nondestructive evaluation of materials*, ASM Handbook, Vol. 17, Ninth Edition, American Society for Metals, ASM International.
2. Панасюк В.В. (2001) *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. Посібник. Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика*. Під ред. З.Т. Назарчука. Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
3. Панасюк В.В. (2007) *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Т.9: Міцність та довговічність авіаційних матеріалів та елементів*. Львів, Споллом.
4. Джала Р.М., Джала В.Р., Івасів І.Б. та ін. (2018) *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідниковий посібник у 8 т. Т. 4: Електрофізичні методи неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій*. Під ред. З.Т. Назарчука. Київ, Простір-М.
5. Коломіїтцев О.В., Комаров В.О. (2022) Економічний ефект і порівняння виявлення тріщин у силових елементах крила літака методами неруйнівного контролю. In: *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «International Scientific Innovations in Human Life»*, Manchester. <https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-international-scientific-innovations-in-human-life-13-15-aprelya-2022-goda-manchester-velikobritaniya-arhiv>
6. Kim, Y.Y., Kwon, Y.E. (2015) Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides. *Ultrasonics*, **62**, 3–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.015>
7. Vinogradov, S., Fisher, J. (2018) *Review of guided wave testing using magnetostrictive Transducers*. 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden. <https://www.ndt.net/article/ecndt2018/papers/ecndt-0486-2018.pdf>
8. Vinogradov, S., Cobb, A., Fisher, J. (2018) New magnetostrictive transducer designs for emerging areas of NDE. *Materials*, **11**, 755. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11050755>
9. Бабак В.П., Богачев І.В., Декуша О.Л., Ковтун С.І. та ін (2025) Дослідження ультразвукового магнітострікційного методу ультразвукового контролю. Частина 1. Застосування магнітострікційних ефектів в системах

вимірювання та неруйнівного контролю (Огляд). *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **3**, 5–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.01>

10. Carlin, B. (1960) *Ultrasonics, Chapter 4, Magnetostriction*. Second edition. McGraw-Hill Book Company Inc., 93–125.
11. Бабак В.П., Бабак С.В., Берегун В.С. та ін. (2015) *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія*. Під ред. В.П. Бабака. Київ.
12. Babak, V.P., Bogachev, I.A. (2016) Small aperture magnetostrictive sensors for non-destructive testing. *«NDT days 2016»*, *Sozopol, Bulgaria: Scientific Proceedings*, **1(156)**.
13. Bohachev, I.V., Babak, V.P., Zaporozhets, A.O. (2022) Novel small-aperture transducers based on magnetostrictive effect for diagnostic systems. *Tekhnichna elektrodynamika*, **3**, 69–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.069>
14. Bohachev, I.V., Kovtun S., Kuts Y. et al. (2023) Enhanced phase method of signal detection for ultrasonic magnetostriction defectoscopy of power equipment. *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*, **2(73)**, 72–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072>.
15. Цапенко В.К., Куц Ю.В. (2010) *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*. Київ, НТУУ «КПІ».
16. Crawford, F.S. (1966) *Waves*. Berkeley physics course. Vol. 3. McGraw-Hill.
17. Bendat, J., Piersol, A. (2010) *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons.
18. Poularikas, A. (2010). *Transforms and Applications Handbook*. CRC Press LLC.
19. Harb, M.S., Yuan, F.G. (2015) A rapid, fully non-contact, hybrid system for generating Lamb wave dispersion curves. *Ultrasonics*, **61**, 62–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.03.006>
20. Kovtun, S.I., Bohachev, I.V., Dekusha, O.L. et al. (2025) Experimental research of the magnetostrictive method of ultrasonic nondestructive testing. *Bulgarian Society for NDT Int. J. «NDT Days»*. Vol. VIII, Issue 2, 70–76. <https://www.bg-s-ndt.org/journal/vol8.html>

References

1. Aquil Ahmad, Leonard J. Bond (2018) *Nondestructive evaluation of materials*. ASM Handbook, Vol. 17, Ninth Edition, American Society for Metals, ASM International.
2. Panasyuk, V.V. (2001) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. book. Vol. 5: Non-destructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, PMI [in Ukrainian].
3. Panasyuk, V.V. (2007) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. book. Vol. 9: Strength and durability of aviation materials and components*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
4. Dzhala, R.M., Dzhala, V.R., Ivasiv, I.B. et al. (2018) *Technical diagnostics of materials and structures: Refer. book. In: 8 Volumes. Vol. 4: Electrophysical methods of non-destructive testing of defectiveness of structure elements*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Kyiv, Prostrir-M [in Ukrainian].
5. Kolomiitsev, O.V., Komarov, V.O. (2022) Economical effect and comparison of crack identification in load-bearing element of aircraft wing by methods of non-destructive testing. In: *Proc. of the 10th International Scientific and Practical Conf. on International Scientific Innovations in Human Life*, Manchester [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-international-scientific-innovations-in-human-life-13-15-aprelya-2022-goda-manchester-velikobritaniya-arhiv>
6. Kim, Y.Y., Kwon, Y.E. (2015) Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides. *Ultrasonics*, **62**, 3–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.015>
7. Vinogradov, S., Fisher, J. (2018) *Review of guided wave testing using magnetostrictive Transducers*. 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden. <https://www.ndt.net/article/ecndt2018/papers/ecndt-0486-2018.pdf>
8. Vinogradov, S., Cobb, A., Fisher, J. (2018) New magnetostrictive transducer designs for emerging areas of NDE. *Materials*, **11**, 755. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11050755>

9. Babak, V.P., Bohachev, I.V., Dekusha, O.L., Kovtun, S.I., Kuts, Y.V., Sozonov, S.V. (2025) Investigation of ultrasonic magnetostriction method of ultrasonic control. Part 1. Application of magnetostriction effects in measurement and non-destructive testing systems (Review). *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **3**, 5–14 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.01>
10. Carlin, B. (1960) *Ultrasonics, Chapter 4, Magnetostriction*. Second edition. McGraw-Hill Book Company Inc., 93–125.
11. Babak, V.P., Babak, S.V., Beregun, V.S. et al. (2015) *Information support of monitoring of heat-and-power engineering objects: Monography*. Ed. by V.P. Babak. Kyiv [in Ukrainian].
12. Babak, V.P., Bogachev, I.A. (2016) Small aperture magnetostrictive sensors for non-destructive testing. *«NDT days 2016», Sozopol, Bulgaria: Scientific Proceedings*, **1(156)**.
13. Bohachev, I.V., Babak, V.P., Zaporozhets, A.O. (2022) Novel small-aperture transducers based on magnetostrictive effect for diagnostic systems. *Technical Electrodynamics*, **3**, 69–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.069>
14. Bohachev, I.V., Kovtun S., Kuts Y. et al. (2023) Enhanced phase method of signal detection for ultrasonic magnetostriction defectoscopy of power equipment. *System Research in Energy*, **2(73)**, 72–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenegy2023.02.072>
15. Tsapenko, V.K., Kuts, Yu.V. (2010) *Fundamentals of ultrasonic non-destructive testing*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
16. Crawford, F.S. (1966) *Waves*. Berkeley physics course. Vol. 3. McGraw-Hill.
17. Bendat, J., Piersol, A. (2010) *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons.
18. Poularikas, A. (2010) *Transforms and Applications Handbook*. CRC Press LLC.
19. Harb, M.S., Yuan, F.G. (2015) A rapid, fully non-contact, hybrid system for generating Lamb wave dispersion curves. *Ultrasonics*, **61**, 62–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.03.006>
20. Kovtun, S.I., Bohachev, I.V., Dekusha, O.L. et al. (2025) Experimental research of the magnetostrictive method of ultrasonic nondestructive testing. *Bulgarian Society for NDT Int. J. «NDT Days»*. Vol. VIII, Issue 2, 70–76. <https://www.bg-sndt.org/journal/vol8.html>

INVESTIGATION OF ULTRASONIC MAGNETOSTRICTION METHOD OF ULTRASONIC CONTROL.

Part 2. Improvement and experimental research of the magnetostriction method of ultrasonic testing

V.P. Babak¹, I.V. Bohachev¹, O.L. Dekusha¹, S.I. Kovtun¹, Y.V. Kuts^{1,2}, S.V. Sozonov¹

¹General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 172 Antonovych Str., Kyiv, Ukraine, 03150,
E-mail: sveta_kovtun@ukr.net

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteyisky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: y.kuts@ukr.net

In the first part of the article, modern trends in the use of magnetostrictive effects in non-destructive testing and measurement technology were analyzed. An analysis of publications on this issue showed an increase in the researchers' interest in in-depth study of the possibilities of magnetostrictive effects as a basis for the development of new methods of ultrasonic non-destructive testing (UNT). It was noted that a new promising direction of research is the creation of NDT methods and tools based on small-aperture magnetostrictive transducers (MST). Such transducers make it possible to control objects of complex geometry, in dry contact with MST and in a wide range of temperatures of control objects. The article is devoted to the development of NDT tools using MST, the action of which is based on the Joule and Villari effects, and the study of the possibilities of their application in NDT problems. In particular, the features of MST designs, their characteristics, and the peculiarities of signal formation of emitting and receiving transducers are considered. For experimental tests, an original UNT system with a signal frequency of 0.5 MHz was used, which made it possible to evaluate the capabilities of the developed UNT method on test samples, which were metal plates with defects in the form of holes of different diameters, and by testing defects in welded joints. 20 Ref., 2 Tabl., 17 Fig.

Keywords: ultrasonic non-destructive testing, magnetostrictive effects, small-aperture magnetostrictive transducers

ORCID

Бабак В.П. – <https://orcid.org/0000-0002-9066-4307>, Ковтун С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-6596-3460>,
Богачев І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7781-5767>, Декуша О.Л. – <https://orcid.org/0000-0003-3836-0485>,
Куц Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>, Созонов С.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7584-4529>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

Ю.В. Куц

Інститут загальної енергетики НАН України. 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 172.

E-mail: y.kuts@ukr.net

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

В.П. Бабак, І.В. Богачев, О.Л. Декуша, С.І. Ковтун, Ю.В. Куц, С.В. Созонов (2026) Дослідження ультразвукового магніто-стрикційного методу ультразвукового контролю. Частина 2. Удосконалення та експериментальні дослідження магнітострикційного методу ультразвукового контролю з малоапертурними перетворювачами. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **02**, 3–12. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.01>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 20.02.2026

Отримано у переглянутому вигляді 09.03.2026

Підписано до друку 08.04.2026

Оприлюднено 30.06.2026

INFRARED THERMOGRAPHY OF SOLAR CELLS WITH A THERMOGENERATING LAYER BASED ON VARIZONE SEMICONDUCTORS

V.O. Storozhenko, O.V. Miahkyi, R.P. Orel, S.M. Meshkov

RTC «Thermocontrol» of Kharkiv National University of Radio Electronics. 14 Nauky Ave., 61166, Kharkiv, Ukraine.
E-mail: roman.orel@nure.ua

This study investigates the potential application of infrared thermography for integrity testing of modern solar cells with an additional thermogenerating layer based on varizone semiconductors (in particular, Si-Ge solid solutions). A comprehensive thermoelectric model of a multilayer structure has been developed and analysed, combining classical thermophysical equations with thermoelectric models of charge generation and transport in a varizone structure. Unlike standard approaches, the model accounts for the fact that the formation of a temperature signal from a defect is caused not only by a local change in thermophysical characteristics but also by a deterioration in heat dissipation due to the suppression (discontinuation) of charge carrier generation in the damaged zone. A classification of the main technological and operational defects is proposed, among which foreign inclusions (SiO₂ or Si impurities), thinning of the generating layer, and local thermal breakdown are identified. Through numerical modeling (using finite difference and finite element methods), quantitative parameters of the detectable signal in the form of a temperature contrast on the object's surface were established. It was shown that the magnitude of the temperature signal significantly depends on the type of defect: from fractions of a degree for local inclusions to tens of degrees in the case of thermal breakdown. The results show that the sensitivity of modern thermal imaging systems is sufficient for the reliable identification of the considered types of structural defects. It is noted that existing methods for suppressing interference can be applied to reduce the impact of interference on defect detection. Thus, the effectiveness of thermal inspection for the defect detection of solar panels with a thermogenerating layer is demonstrated. 12 Ref., 4 Fig.

Keywords: infrared thermography, solar panels, thermoelectric model, varizone semiconductors, generation defects

Introduction. Infrared thermography (a passive method of thermal non-destructive testing) is widely used for detecting defects in solar cells (or panels) [1, 2]. The method is based on the use of a thermal imager to detect «hot spots», i.e., cracks, short circuits, faulty diodes, etc.

Recently, advanced solar panels have been developed that utilize additional thermogenerating layers based on varizone semiconductors made of samarium sulfide, zinc oxide, and n-type A2B6 group semiconductors, as well as in films of a varizone-type continuous silicon-germanium solid solution Si_xGe_{1-x} [3, 4]. This significantly increases efficiency, however, as the complexity of the generating element increases, so does the likelihood of defects—structural disruptions that reduce or completely disrupt power generation.

Defects can arise during production, as well as during the installation and operation of photovoltaic power plants, affecting the service life or limiting the performance of the panels; most of these defects are process-related. That is, defects caused by poor design and improper use of the panels. They may also be mechanical damages caused by external influences. The integrity of individual panel layers may also be compromised, caused either by internal stresses within the cell or by the inhomogeneous distribution of impurities in the silicon material during the manufacturing process. If a de-

fect is present in a section of the photovoltaic panel, solar energy will not be converted into electrical energy.

In addition, defects may also arise in the additional thermoelectric layer, caused by the dispersion of Si and SiO₂ impurities in the Si_xGe_{1-x} solid solution, or by a change in layer thickness resulting from uneven solid solution precipitation [5, 6]. In such damaged areas, a temperature increase will occur, which can be detected using the thermography method, since, compared to intact panels, the temperature difference can reach tens of degrees Celsius, which can lead to thermal destruction, a «thermal» breakdown, and device failure.

Problem statement. The purpose of this work is to assess the possibilities of using infrared (thermal) flaw detection to detect the most characteristic defects in solar cells based on a multilayer varizone structure by constructing and analyzing its thermoelectric model.

Creation of the thermoelectric model. Here, a thermoelectric model is understood as a combination of a classical thermophysical model [7, 8] with a thermoelectric model describing the generation and propagation of charges in a varizone structure (Fig. 1) [2, 3].

The necessity of such a combination is explained by the fact that, in this case, the formation of a temperature contrast (a signal from the defect) on the surface of the specimen is caused not only by a local disturbance of the material's thermophysical properties but also by a deterioration in heat dissipation due to the suppression of charge carrier generation at the defect site.

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

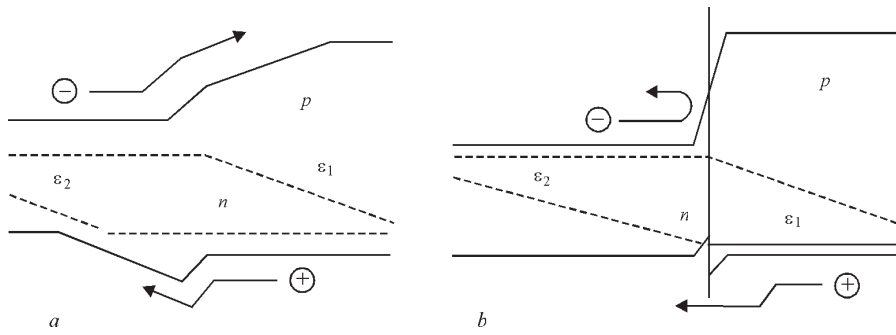


Fig. 1. Injection of charge carriers into a heterojunction under forward bias, taking into account the Fermi levels in the structure: *a* – in a smooth heterojunction in the presence of internal «pulling fields»; *b* – one-sided injection of holes in a sharp heterojunction

The total amount of energy in the specimen, which characterizes its temperature, is defined as the difference between the energy received from an external source and the energy expended on heat transfer to the environment and on the generation of thermo-EMF:

$$W_{ok} = W_q - (W_\alpha + W_\varepsilon),$$

where W_{ok} is the thermal energy of the specimen; W_q – energy supplied to the specimen from an external source; W_α – energy radiated by the body into the environment; W_ε – generation energy.

Accordingly, for a zone with a defect, generation will decrease or be absent altogether, and the value in parentheses will decrease, leading to a local increase in temperature in that region. This fact will manifest as a temperature contrast on the surface of the specimen, i.e., a signal from the defect.

The thermophysical part of the thermoelectric model (Fig. 2) graphically represents a multilayer plate with a local inhomogeneity (defect) in cylindrical coordinates [8, 9].

Its mathematical description is based on the non-stationary heat conduction equation [10]:

$$\text{div}(\lambda(\vec{r}, T)\nabla T(\vec{r}, t)) + q(\vec{r}, t) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (1)$$

where c – the specific heat capacity of the OK materials; $T(\vec{r}, \tau)$ – the space-time function of temperature; λ – the thermal conductivity coefficient of the OK materials; q – heat flux density from an external source (heater); ρ – density of the specimen materials.

This equation is solved together with equations, which describe the heat energy consumption in a system with varizone semiconductors for EMF generation and charge transport [11]:

$$\varepsilon = -\frac{\sigma_n}{e_p} \phi \frac{\sigma_n}{\sigma_n + \sigma_p} \left(\frac{dE_g}{dx} \left(1 - \frac{\theta_n}{\theta_p} \right) \frac{d\xi_{ng}}{dx} \right) dx, \quad (2)$$

$$j_k = -\sigma_k \left(\frac{d}{dx} \tilde{\varphi}_k + \alpha_k \frac{d}{dx} T_k \right), \quad (3)$$

where $\theta_k = \left(\frac{T_k - T_0}{T_0} \right)$ – the relative temperature difference of the k^{th} layer; E_g – the bandgap of the

semiconductor; σ_k – electrical conductivity of the substance of the k^{th} element; φ_k – electrochemical potential of the substance of the k^{th} element; α_k – thermo-EMF coefficient; T_k – temperature of the k^{th} element; $\delta\xi = \xi_k - \xi_{k0}$ – the state function;

$\xi_k = \xi_k(T_k, n_k) = T_k \ln \left(\frac{n_k}{N_k(T_k)} \right)$ – state function of the k^{th} layer, depending on temperature, concentration, and the number of free carriers; $\xi_{k0} = \xi_{k0}(T_0, n_{k0})$ – state function of the boundary layer; n_{k0} and n_k – equilibrium and non-equilibrium concentrations of charge carriers; α_k – thermo-EMF coefficient.

It should be noted that the temperature T_k appears in equation (3) in two terms: directly in α_k (the gradient of temperature T) and implicitly in $\tilde{\varphi}_k(T)$. In the case of $T_k = \text{const}$, the term $\alpha_k = 0$

The joint solution of equations (1), (2), and (3) was performed under mixed boundary conditions, which account for both heat transfer conditions at the interfaces and the generation and motion of charge carriers:

For $z = H$:

$$\frac{dE_g}{dx} = \frac{E_{gGe} - E_{gSi}}{H},$$

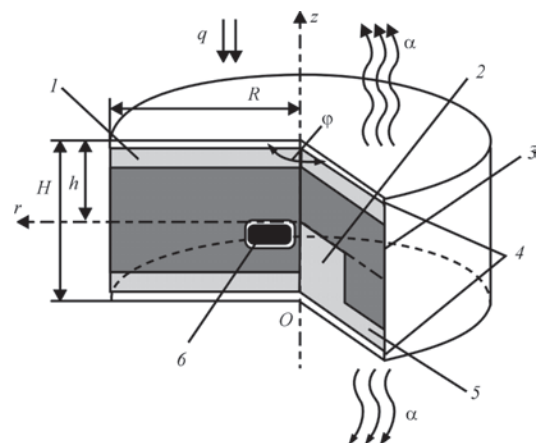


Fig. 2. Thermophysical part of the thermoelectric model of a panel with a graded-bandgap semiconductor: 1 – semiconductor 2, 2 – «thinning of the generating layer» defect, 3 – varizonal semiconductor (heterojunction), 4 – thermal contact, 5 – semiconductor 1, 6 – «foreign inclusion» defect

$$\lambda \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial r} = \alpha(T(\vec{r}, t) - T_{env}) - q(\vec{r}, t).$$

For $z = 0$:

$$\frac{dE_g}{dx} = \frac{dE_g}{dz}, \quad -\lambda \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial r} = -\alpha(T(\vec{r}, t) - T_{env}).$$

For $z = h$:

$$\frac{dE_g}{dx} = 0,$$

$$-\lambda_1(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_1(\vec{r}, t)}{\partial n} \right) = -\lambda_2(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_2(\vec{r}, t)}{\partial n} \right),$$

where $T(\vec{r}, \tau)$ – the space-time temperature function; λ – the thermal conductivity coefficient of the structural components; q – the heat flux density from an external source (heater); ρ – the density of the structural components; T_{env} – environment temperature.

Results of applying the thermoelectric model. The solution was obtained using the numerical (grid) finite difference method and the finite element method. Three most likely types of defects were considered (Fig. 1):

1. foreign inclusion caused by the dispersion of SiO_2 or Si;
2. thinning of the generating layer resulting from uneven condensation of the solid solution of a graded-bandgap semiconductor;
3. thermal breakdown, as an extreme case of thinning.

The purpose of the analysis was to estimate the magnitude of the useful signal from the defect, i.e., the temperature contrast (ΔT) on the monitored surface. A defect with a cross-sectional dimension $r_{def} = 5$ mm was chosen as an example. The shape of the temperature contrast over defects of the three types mentioned above was calculated and analysed. The results are shown in Fig. 3.

As can be seen from the graphs, for defects of the 1st and 2nd types, the gradient has a step-like shape well known in thermal non-destructive testing [8], whereas the 3rd type—thermal breakdown—leads to a temperature increase over a significant portion of the surface along r .

The effect of the defect's transverse dimension on the magnitude of the useful signal was also investigated (Fig. 4). As the results indicate, the magnitude of the useful signal varies for different defect types: it reaches a maximum value of tens of degrees for a breakdown, and approximately one degree for a local foreign inclusion.

Given that the sensitivity of the recording devices—thermal imagers—used in thermography is in the range of hundredths of a degree, it can be concluded that the application of the method under consideration to the

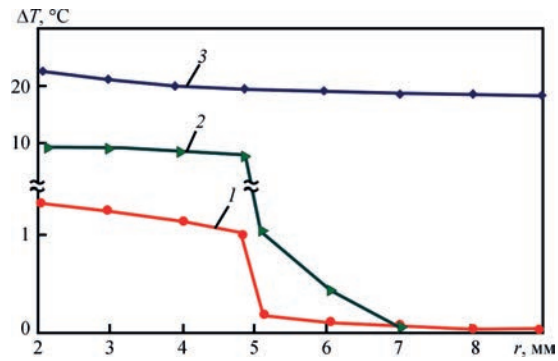


Fig. 3. Dependence of the temperature contrast above the defect on r : 1 – foreign inclusion defect (Si and SiO_2); 2 – thinning of the generating layer; 3 – «thermal breakdown» defect

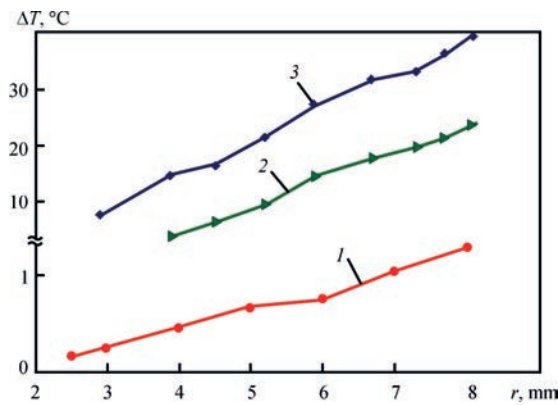


Fig. 4. Dependence of the temperature contrast above the defect on its transverse dimension for various types: 1 – foreign inclusion; 2 – thinning of the generating layer; 3 – «thermal breakdown»

task of detecting defects in panels with a thermogenerating layer is highly promising.

Any limitations in sensitivity that may arise due to interference characteristic of thermal inspection can be overcome using known methods of interference suppression [12].

Conclusions

1. It has been shown that the use of infrared thermography for defect detection in solar cells with a thermogenerating layer based on graded-bandgap semiconductors is fundamentally feasible, as it allows for the detection of various types of defects characteristic of this inspection object.

2. A thermoelectric model of the complex structure under consideration has been constructed and analysed, describing the mechanism for detecting a new type of defect—deterioration of heat dissipation due to disruptions in the generation and transport of charge carriers.

3. A quantitative estimate of the magnitude of the measured signal from various types of defects has been obtained, allowing for their subsequent classification during thermography.

References

1. Maldague, Xavier P.V. (2001) *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

2. Saidov, A., Leyderman, A.Y., Karshiev, A.B. (2019) Photothermovoltaic effect in a $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ variband solid solution. *Applied Solar Energy*, 55(1), 12–17. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X19010122>
3. Saidov, A.S., Usmonov, S.N., Saparov, D.V. (2019) Structural studies of the epitaxial layer of a substitutional solid solution $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ with nanocrystals. *Advances in Mater. Sci. and Engineering*, 2019, 195, 3932195. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3932195>
4. Saidov, A.S., Leyderman, A.Yu., Karshiev, A.B. (2016) The thermovoltic effect in variband solid Si_xGe_x ($0 \leq x \leq 1$). *Technical Physics Letters*, 42(7), 725–728. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785016070270>
5. Saidov, A.S., Leiderman, A.Yu. (2015) Electrophysical and optical properties of silicon produced by multiple remelting of metallurgical silicon by concentrated solar beams (Review). *Applied Solar Energy*, 51(3), 183–194. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X1503010X>
6. Saidov, A.S., Usmonov, S.N., Asatova, U.P. (2012) Growth of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ solid solution films and study of their structural properties and some of their photoelectric properties. *Semiconductors*, 46, 1088–1095. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782612080180>
7. Saidov, A.S., Usmonov, S.N., Saidov, M.S. (2015) Liquid-phase epitaxy of the $(\text{Si})_{1-x-y}(\text{Ge})_x(\text{GaAs})_y$ substitutional solid solution ($0 \leq x \leq 0.91$, $0 \leq y \leq 0.94$) and their electro-physical properties. *Semiconductors*, 49(4), 547–550. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106378261504020X>
8. Storozhenko, V., Myagkiy, A., Orel, R. (2016) Optimization of the procedure for thermal flaw detection in honeycomb structures by improving the accuracy of the interference function. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 5/5(83), 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79563>
9. Aziz, A. (2009) A similarity solution for laminar thermal boundary layer over a flat plate with a convective surface boundary condition. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.*, 14, 1064–1068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2008.05.003>
10. Pidkopai, V.M., Hanzha, A.M., Marchenko, N.A. (2014) Mathematical simulation and identification of actual heat losses caused by the damaged insulation of the pipelines of heating mains. *Visnyk NTU «KhPI»: Zbirnyk Naukovykh Prats. Seriia: Enerhetychni ta Teplotekhnichni Protsezy y Ustatkuvannia*, 12(1055), 83–89 [in Ukrainian]. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/8979>
11. Miahkyi, O.V., Orel, R.P., Meshkov, S.M., Storozhenko, V.O. (2024) Ways to increase the EMF of semiconductor elements based on thermoelectric effects. *Radiotekhnika*, 216, 103–107 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.30837/rt.2024.1.216.10>
12. Storozhenko, V.O., Miahkyi, O.V., Meshkov, S.M., Orel, R.P. (2025) Application of wavelet analysis and differential-integral graphical methods for thermogram processing in thermal nondestructive testing. *Technical Diagnostics and Non-destructive Testing*, 2, 18–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.02.03>

ІНФРАЧЕРВОНА ДЕФЕКТОСКОПІЯ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ З ТЕРМОГЕНЕРУЮЧИМ ШАРОМ НА БАЗІ ВАРІЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

В.О. Стороженко, О.В. Мягкий, Р.П. Орел, С.М. Мешков

НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки. 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.
E-mail: roman.orel@nure.ua

У роботі досліджено можливості застосування методу інфрачервоної дефектоскопії для контролю цілісності сучасних сонячних батарей з додатковим термогенеруючим шаром на основі варізонних напівпровідників (зокрема, твердих розчинів Si-Ge). Розроблено та проаналізовано комплексну теплоелектричну модель багат шарової структури, що поєднує класичні теплофізичні рівняння з термоелектричними моделями генерації та перенесення зарядів у варізонному середовищі. На відміну від стандартних підходів, у моделі враховано, що формування температурного сигналу від дефекту зумовлене не лише локальною зміною теплофізичних характеристик, а й погіршенням тепловідведення через припинення генерації носіїв заряду в зоні пошкодження. Запропоновано класифікацію основних технологічних та експлуатаційних дефектів, серед яких виділено сторонні вклучення (домішки SiO_2 або Si), потоншення генеруючого шару та локальний тепловий пробій. Шляхом чисельного моделювання (методами скінченних різниць і скінченних елементів) встановлено кількісні параметри корисного сигналу у вигляді температурного перепаду на поверхні об'єкта. Показано, що величина температурного сигналу істотно залежить від типу дефекту: від частки градуса для локальних вклучень до десятків градусів у разі теплового пробію. Встановлено, що чутливість сучасних тепловізійних систем є достатньою для надійної ідентифікації розглянутих типів порушень структури. Зазначено, що для зниження впливу перешкод на виявлення дефектів можуть застосовуватися існуючі методи їх придушення. Таким чином, показано ефективність застосування теплового контролю для дефектоскопії сонячних панелей з термогенеруючим шаром. Бібліогр. 12, рис. 4.

Ключові слова: інфрачервона дефектоскопія, сонячні панелі, теплоелектрична модель, варізонні напівпровідники, дефекти генерації

ORCID

V.O. Storozhenko – <https://orcid.org/0000-0002-7609-2955>, O.V. Miahkyi – <https://orcid.org/0000-0002-0442-5570>, R.P. Orel – <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>, S.M. Meshkov – <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

R.P. Orel

RTC «Thermocontrol» of Kharkiv National University of Radio Electronics. 14 Nauky Ave., 61166, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: roman.orel@nure.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

V.O. Storozhenko, O.V. Miahkyi, R.P. Orel, S.M. Meshkov (2026) Infrared thermography of solar cells with a thermogenerating layer based on varizone semiconductors. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 02, 13–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.02>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 20.04.2026

Отримано у переглянутому вигляді 28.05.2026

Підписано до друку 10.06.2026

Оприлюднено 30.06.2026

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ АУСТЕНІТНИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕНЕРГОБЛОКУ № 3 ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС

В.М. Тороп, Є.О. Давидов, М.Д. Рабкіна

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

Для підтримки необхідного рівня безпеки та надійності трубопроводів діаметром 325 мм (Ду 300) та товщиною стінки 16 мм на Чорнобильській АЕС було розроблено спеціальну програму діагностичних і ремонтно-відновлювальних робіт. Відповідно до цієї програми в період 1997–2005 рр. виконано значний обсяг радіографічного (RT), ультразвукового (UT), капілярного (PT) та візуально-вимірювального (VT) контролю зварних з'єднань трубопроводів Ду 300, виготовлених із аустенітної сталі 08X18H10T. Незважаючи на те, що з того часу минуло більше 20 років, методи неруйнівного контролю ґрунтуються на тих самих фізичних принципах і використовуються практично ті ж самі методологічні підходи до неруйнівного контролю (NDT). Тому аналіз результатів великого обсягу експлуатаційного контролю є дуже корисним для розуміння достовірності методів неруйнівного контролю, що використовуються у сучасній повсякденній практиці. Слід зазначити, що роботи з аналізу результатів контролю виконувалися у рамках самостійного завдання, а не спеціально для оцінки та порівняння методів NDT, тому викладений у статті аналіз є об'єктивним, ретроспективним і незаангажованим, тобто відображає можливий результат, а не бажаний. Бібліогр. 28, табл. 5, рис. 17.

Ключові слова: достовірність неруйнівного контролю (NDT), аустенітні зварні з'єднання, радіографічний (RT), ультразвуковий (UT), капілярний (PT), візуально-вимірювальний (VT) контроль, реальні розміри тріщини

Вступ. 26 квітня 2026 р. виповнилося 40 років від катастрофічного вибуху, що стався на 4-му енергоблоці Чорнобильської АЕС (ЧАЕС). Відтоді й до теперішнього часу продовжується виконання колосального об'єму різнопланових робіт щодо ліквідації наслідків аварії [1]. Трубопроводи контуру багаторазової примусової циркуляції (КМПЦ) Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС (опускні – ОТ, напірні – НТ та трубопроводи системи аварійної зупинки реактора – САОР) виготовлені зі сталі 08X18H10T відповідно до вимог ТУ 14-3-197-73. Розмір труб 325×16 мм. Трубопроводи на енергоблоці № 3 ЧАЕС введено в експлуатацію у квітні 1981 р. На момент проведення експлуатаційного контролю в період середнього планового ремонту 1997 р. (СПР-97) реакторна установка енергоблоку № 3 відпрацювала 99000 год, при цьому кількість повних циклів (розігрів–розхолодження) становила 52, кількість виконаних гідровипробувань – 17 (тиск гідровипробувань 103 кгс/см²).

У процесі експлуатації енергоблоку №3 ЧАЕС з 1981 р. контроль за станом зварних з'єднань (ЗЗ) трубопроводів виконувався відповідно до вимог інструкції АІЕ-10-89, в якій передбачено регламентний обсяг контролю: три зварні з'єднання опускного трубопроводу (ОТ) від кожного барабан-сепаратора після 45000 год експлуатації. Передбачений радіографічний контроль (РТ) зварних

з'єднань проводився гаммаридом типу 192/120 з розміром фокусної плями 3,5×3,5 мм із використанням плівки РТ-1. З початку експлуатації й до 1997 р. дефектів типу тріщин не виявлено.

Проблематика. З проблемою міжкристалітного корозійного розтріскування під напругою (МКРПН або IGSCC) зварних з'єднань трубопроводів, виготовлених із аустенітних нержавіючих сталей, вперше зіткнулися на атомних електростанціях (АЕС) із реакторами BWR західні країни та Японія на початок 70-х років ХХ ст. [2]. Перші публікації щодо проблеми МКРПН у зварних з'єднаннях трубопроводів контуру реактора BWR були здійснені «Групою дослідження проблем тріщин у трубопроводах» під егідою національної регуляторної комісії (NRC) США в 1975–1977 рр. [3]. Кількість пошкоджень, що спостерігалися на трубопроводах реакторної установки типу BWR у початковий період прояву механізму МКРПН ілюструє рис. 1 [2].

21 липня 1997 р. енергоблок № 3 Чорнобильської АЕС було зупинено для проведення середнього планового ремонту. До початку середнього планового ремонту енергоблоку № 3 у 1997 р. (СПР-97) було відомо, що в аналогічних трубопроводах Ду 300 КМПЦ виявлено протяжні дефекти типу тріщин і дефекти зварювання, що не виявлялись під час монтажу та регламентного експлуатаційного контролю трубопроводів (табл. 1). Тому керівництвом ЧАЕС було ухвалено рішення про проведення додаткового обсягу неруйнівного

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

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

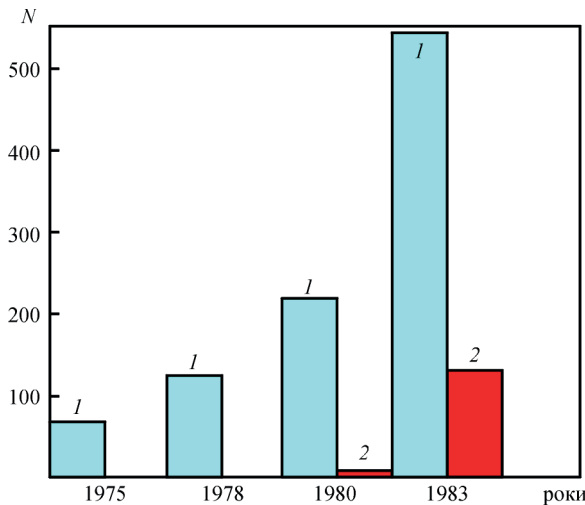


Рис. 1. Кількість виявлених пошкоджень на трубопроводах реакторів BWR у початковий період спостереження за дією механізму МКРПН (IGSCC) [2]: 1 – для всіх трубопроводів, 2 – для всіх трубопроводів діаметром більше 20” (510 мм), N – кількість випадків МКРПН у всьому світі

контролю. За результатами цього контролю виявилося, що кількість ЗЗ з неприпустимими дефектами становила близько 20 % від загальної кількості проконтрольованих ЗЗ. Враховуючи цей факт і керуючись вимогами Норм і Правил, прийнятих в ядерній енергетиці України, головним інженером ЧАЕС було прийнято рішення про проведення 100 % радіографічного контролю (RT) всіх зварних з’єднань трубопроводів Ду 300 КМПЦ (ОТ, НТ і САОР).

Практика використання радіографічного контролю трубопроводів Ду 300 КМПЦ під час СПР-97. 23 жовтня 1997 р. на енергоблоці № 3 ЧАЕС було закінчено 100 % радіографічний контроль ЗЗ трубопроводів Ду 300 КМПЦ, який виконували відповідно до вимог ГОСТ 7512-82 [4] та ПНАЕ Г-7-017-89 [5], а оцінка якості проводилась за ПК 1514-72 [6] для 1451 зварних з’єднань, що становить практично 100 % від усього об’єму ЗЗ трубопроводів Ду 300. Експлуатаційний RT проводився з використанням приладу виробни-

цтва США «Амертест» із джерелом J_r-192. Розмір фокусної плями 1,5×1,5 мм. Використовувалася плівка типу Д-4 (виробництво Бельгії). Досягнута чутливість по дротяному зразку № 3 при просвічуванні через дві стінки становила 0,32, а в канавочному зразку № 1 – 0,2. Загалом метод RT має ряд особливостей, що ускладнюють достовірний контроль:

- необхідність випорожнення трубопроводів;
- просвічування через дві стінки;
- необхідність просвічування з кількох напрямків для виявлення тріщин різної орієнтації;
- наявність природного радіаційного фону.

Безпосередньо в ГОСТ 7512-82 [4] зазначається, що при радіографічному контролі не виявляють непровари і тріщини, площа розкриття яких не збігається з напрямом просвічування і/або величина розкриття яких менша за 0,1 мм. Очевидно, що ці особливості методу RT можуть бути причиною помилок у пошуку дефектів.

У табл. 2 та на рис. 2 наведено результати експлуатаційного радіографічного контролю зварних з’єднань трубопроводів Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС. Таким чином, у період СПР-97 у результаті 100 % RT було виявлено 268 дефекти. Як впливає з наведених даних у табл. 1 і 2, дефектність трубопроводів, що розглядаються, є різною для різних АЕС, причому максимальний рівень дефектності перевищує 37 % для НТ ЛАЕС-3, у той час як для НТ ЧАЕС-3 він становить 18 %. Зазначимо, що близько 90 % дефектних ЗЗ ОТ ЛАЕС належали до заводських швів, тоді як на ЧАЕС більшість дефектів (99,5 %) виявлено у монтажних стиках. Спільним для ЧАЕС та ЛАЕС є підвищена дефектність ЗЗ в області компенсаційних петель, розташованих у приміщеннях барабан-сепараторів (54 % від усіх дефектів, виявлених на ОТ ЧАЕС-3). Якщо не брати до уваги можливу відмінність у виявленні дефектів і режимах експлуатації на різних АЕС, то найбільш вірогід-

Таблиця 1. Результати неруйнівного контролю зварних з’єднань трубопроводів Ду 300 на аналогічних енергоблоках реакторів РБМК у 1997 р.

Трубопроводи АЕС	Кількість проконтрольованих ЗЗ за:		Кількість виявлених тріщин N		Дефектність, %	
	RT	UT (методика контролю)	NRT	NUT	NRT/RT, %	NUT/UT, %
ОТ САЕС-1	46	217 (МЦУ-7-97)	2	11	4,3	5,1
ОТ КАЕС-1	445	445 (МТ-34-70-023-86)	5	34	1,1	7,6
ОТ КАЕС-2	64	44 (МТ-34-023-86)	1	1	1,6	2,3
ОТ ЛАЕС-3	495	123 (ТИ-ЛМ-2-96)	175	101	35,3	82,1
НТ ЛАЕС-3	484	–	163	–	33,7	–
САОР ЛАЕС-3	82	–	32	–	39,0	–
ОТ ІАЕС	264	–	60	–	22,7	–

Примітка: ОТ САЕС-1 – опускні трубопроводи енергоблоку № 1 Смоленської АЕС ;ОТ КАЕС-1 і ОТ КАЕС-2 – опускні трубопроводи енергоблоку № 1 і 2 Кольської АЕС відповідно; НТ ЛАЕС-3 і САОР ЛАЕС-3 – напорні трубопроводи і трубопроводи САОР енергоблоку № 3 Ленінградської АЕС відповідно; ОТ ІАЕС – опускні трубопроводи Ігналінської АЕС.

Таблиця 2. Результати експлуатаційного радіографічного контролю, виконаного у період СПР-97 на трубопроводах Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС

Трубопроводи	Число проконтрольованих зварних з'єднань	Число швів з дефектами	Тип дефекта	
			Тріщина	Дефект зварювання
Опускні (ОТ)	768	134 (17 %)	98 (13 %)	36 (5 %)
Напорні (НТ)	496	89 (18 %)	79 (16 %)	10 (2 %)
Трубопроводи САОР	187	45 (24 %)	31 (17 %)	14 (7 %)
Всього	1451	268 (18 %)	208 (14 %)	60 (4 %)

ною причиною суттєвої відмінності в дефектності може бути відмінність в якості виготовлення 33. З табл. 2 випливає, що на ЧАЕС-3 виявлених дефектів типу тріщин приблизно в 3,5 рази більше, ніж дефектів зварювання (усадка кореня шва, непровари, шлакові включення тощо).

У своєму листі № 07/2-11/1295 від 10.10.1997 р. адміністрація ядерного регулювання України (АЯРУ), посилаючись на те, що «... відповідно до вимог п. 11.7.1 ПНАЕ Г-010-89 [7] експлуатація трубопроводів зі зварними з'єднаннями, що мають тріщини, неприпустима; відповідно до вимог п. 9.1.6 ПНАЕ Г-7-008-89 [8] при виявленні тріщин і свищів в основному металі та зварних з'єднаннях обладнання та трубопроводів, вони повинні бути негайно відключені» рекомендувала ЧАЕС «...вжити негайних технічних та організаційних заходів щодо усунення виявлених дефектів до виходу блока № 3 із ППР-97».

Тому всі 268 дефектні 33 були відремонтовані в період ремонтної кампанії 1997–1998 рр., з них 208 тріщиновмісних 33 і 20 33 із дефектами зварювання, шляхом вирізки дефектного зварного з'єднання з наступною вставкою відрізка труби у відповідності до вимог п. 9.11 ПНАЕГ-7-009-89 [9], а 40 33 із дефектами зварювання відремонтовано за розробленою в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України технологією ТИЦ 104.0260-97 (виправлення локальної дефектної ділянки шляхом місцевої вибірки та подальшого її заварювання згідно з пп. 9.6 та 9.13 ПНАЕГ-7-009-89 [9]). Зазначимо, що у разі

усунення дефектного 33 шляхом врізання котушки була досягнута продуктивність праці 1 дефект за 2 доби при роботі 65 слюсарів та 16 зварників, а при ремонті за технологією ТИЦ 104.02.0260-97 – 1 дефект за 0,5 доби. При цьому технологія ремонту врізанням котушок передбачає появу двох нових 33, виконаних ручним дуговим зварюванням в умовах СПР, замість видаленого одного, виготовленого в заводських або монтажних умовах.

Загальна чисельність ремонтного персоналу в 1997 р. перевищила 2000 людей. Колективна доза персоналу (ремонтного та оперативного) перевищила 1300 бер, із них ремонтного персоналу – 1238 бер, а додаткові фінансові витрати оцінювалися у 10 млн грн (5,5 млн доларів США). Аналогічно за оцінкою Смоленської АЕС витрати на підготовку, контроль та ремонт зварних з'єднань у кількості 1244 одиниць на першому енергоблоці склали під час планово-профілактичного ремонту (ППР), що проводився з 28.08.1997 р. по 05.02.1998 р., понад 3,8 млн доларів США. При цьому втрати від недовироблення електроенергії та тепла не враховувалися.

Результати ультразвукового контролю трубопроводів Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС. Під час проведення СПР-97 паралельно з РТ, проводився УТ за методикою МТ-34-70-023-86 [10] на 126 33. У протоколах наради фахівців ЧАЕС зазначається, що у перевірених 126 33 виявленість дефектів методом УТ становила лише 48 % у порівнянні з РТ. На початку робіт із виконання неруйнівного контролю 33 трубопроводів Ду 300 УТ розглядався як додатковий (факультативний), що пояснюється цілком зрозумілими фізичними особливостями УТ. Наприклад, стандарт ISO 17635-2018 [11] для контролю аустенітних матеріалів рекомендує серед методів РТ та УТ вибирати рентген. На французьких АЕС експлуатаційний контроль аустенітних зварних швів також проводиться переважно на основі радіографічних методів [12]. Фахівці ЧАЕС використовували метод РТ як основний, а ультразвук як допоміжний.

У СПР-97 ультразвуковий контроль проводився дефектоскопом УД-2-12 із використанням стандартних перетворювачів типу П121-5,0-70-002 та П121-5,0-50-002 із кутами введення променя 70°

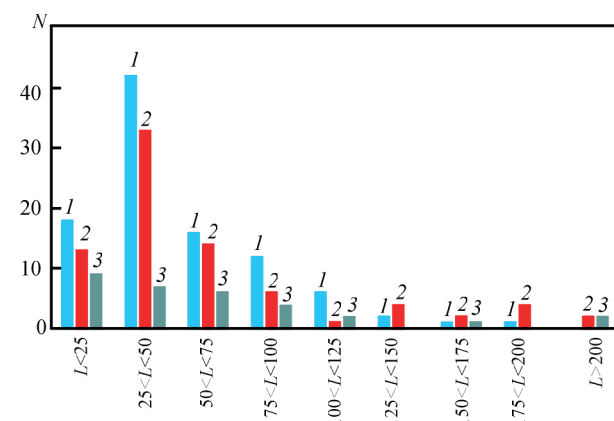


Рис. 2. Гістограма протяжності тріщин за результатами експлуатаційного РТ у період СПР-97: 1 – ОТ, 2 – НТ, 3 – САОР, N – кількість виявлених РТ тріщин завдовжки L, мм

та 50° відповідно. Налаштування дефектоскопа виконувалася на зразках, виготовлених відповідно до рекомендацій методик МТ34-70-023-86 [10] та ТИ-ЛМ-2-96. Пошук та орієнтація відбивачів, закладених у контрольних зразках, проводився на рівні пошукової чутливості, обраної на 6 дБ вище за контрольну. Для зручності фіксування результатів рівень контрольної чутливості встановлювався на рівні 28 дБ. З метою вирішення проблеми контролю аустенітних ЗЗ на той час різними організаціями були розроблені та впроваджені на АЕС методики ручного ультразвукового контролю:

МТ-34-70-023-86 [10] (ВТИ, ЕМП) – поперечні хвилі, спеціальний похилий п’єзоелектричний перетворювач (ПЕП);

Методика ВНИИАЭС – поздовжні хвилі, спеціальні роздільно-сумісні ПЕП 45°, 60° і 70°;

ТИ ЛМ 2 – 95 (ЛАЕС – ЦНИИКМ «ПРОМЕТЕЙ») – поперечні хвилі МВВ70N2;

Методика МГТУ ім. Баумана – поперечні хвилі, спеціальний роздільно-сумісний ПЕП;

МЦУ-7-97 [13] (НПО «ЦНИИТМАШ») – головні хвилі, спеціальний роздільно-сумісний ПЕП;

МЦУ-5-99 (НПО «ЦНИИТМАШ»). Методика ультразвукового контролю ЗЗ трубопроводів із аустенітної сталі енергоблоків типу РБМК-1000: поперечні хвилі, спеціальний хордовий ПЕП.

Деяке уявлення щодо результативності застосування різних методик УТ із визначення тріщиноподібних дефектів в аустенітних ЗЗ ілюструє рис. 3.

Як впливає з рис. 3, МЦУ-7-97, розроблена ЦНИИТМАШ у 1997 р. і яка пройшла успішну апробацію на енергоблоках рф і Латвії, мала кращі кількісні показники у порівнянні навіть із автоматизованими системами, що використовували складні алгоритми та методи обробки (наприклад, Авгур). Тому АЯРУ рекомендувала (№07/2-11/1343 від 16.10.1997 р. та №07-11/1511 від 21.11.1997 р.) Чорнобильській АЕС провести експертний УЗК (УТ) ЗЗ ОТ та НТ Ду300 КМПЦ за методикою МЦУ-7-97. У період із 04 по 08 грудня 1997 р. за методикою МЦУ-7-97 було про-

контрольовано 135 ЗЗ ОТ і виявлено протяжні відбивачі в 19 ЗЗ, що склало 14 % дефектності, які раніше були проконтрольовані РТ і були визнані бездефектними (хибнонегативний результат або недобраковка за РТ). Крім того, було проконтрольовано 45 ЗЗ НТ, у яких раніше РТ було виявлено неприпустимі дефекти. За результатами експертного УТ у 6-ти ЗЗ відбивачів не виявлено, що становить недобравку до 13 %. Аналіз результатів РТ ЗЗ НТ показав, що в шести ЗЗ радіографічний контроль виявив ділянки з несучільностями завдовжки 30 мм і менше.

Виходячи з високих рівнів ризику, адміністрацією ЧАЕС було ухвалено рішення про виконання 100 % ультразвукового контролю ЗЗ, які пройшли РТ із позитивними результатами. У період з 04.12.1997 р. по 12.02.1998 р. проведено 100 % УТ контроледоступних ЗЗ ОТ, НТ та трубопроводів САОР за методикою МЦУ-7-97, при якому виявлено 183 ЗЗ із різною довжиною несучільностей (табл. 3). З них, на підставі розрахункових обґрунтувань:

70 ЗЗ призначено до ремонту та відремонтовано;

113 допущено до експлуатації на один календарний рік.

Зазначимо, що методика МЦУ-7-97 була спеціально розроблена для виявлення тріщин, що розвиваються від внутрішньої поверхні зварного з’єднання (від кореня). Контроль за цією методикою заснований на використанні поздовжніх хвиль із кутом, близьким до першого критичного. Застосовується спеціальний перетворювач типу тандем. На ЧАЕС методика пройшла спеціальну процедуру атестації в НАЕК «Енергоатом» та була затверджена АЯРУ. У доступних нам документах відсутні докладні відомості про те, як саме проводилася атестація. Однак можна з упевненістю сказати, що така робота проводилася, оскільки у листі заступника керівника АЯРУ від 20.03.1998 р. щодо атестації методики МЦУ-7-97 було зроблено такі зауваження:

– розташування та протяжність дефектів у зварних з’єднаннях трубопроводів 2РГ-2 ст. 4 та 2РГ-22 ст. 6, зафіксовані в результаті атестаційних випробувань двома незалежними бригадами дефектоскопістів, не ідентифікуються;

– не виконаний руйнівний контроль цих зварних з’єднань, передбачений «Програмою атестації...» на підтвердження атестації;

– результати УЗК, отримані під час використання методики МЦУ-7-97, не можуть бути підставою для визначення міцності та залишкового ресурсу трубопроводів розрахунковим шляхом, як це запи-

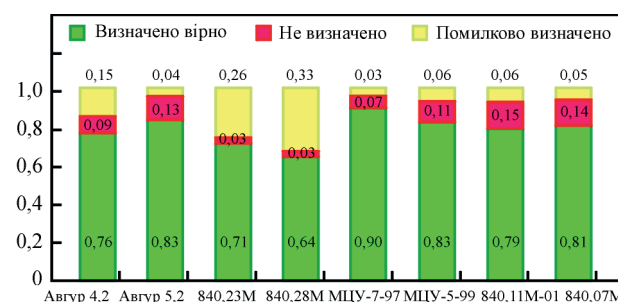


Рис. 3. Порівняння результативності застосування різних методик УТ [14]

Таблиця 3. Результати експлуатаційного ультразвукового контролю, виконаного за методикою МЦУ-7-97 у період СПР-97 на 33 трубопроводів Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС, що пройшли РТ із позитивними результатами

Трубопроводи	Число проконтрольованих ЗЗ	Число ЗЗ з відбивачами (дефектність у %)
Опускні (ОТ)	640	82+6 ⁹ (14 %)
Напорні (НТ)	362	93 (26 %)
Трубопроводи САОР	143	8 (5,5 %)
Всього	1145	183+6 ⁹ (16,5 %)

Примітка: *) додані ЗЗ, що були вирізані в 1997 р. з метою відпрацювання методики МЦУ-7-97.

сано у п. 3 «Протоколу засідання атестаційної комісії...», оскільки методика МЦУ-7-97 не дозволяє визначати глибину тріщини.

Для усунення зауважень АЯРУ негайно було вирізано та обстежено в лабораторії металів ЧАЕС зварні з'єднання трубопроводів 2РГ-2 ст. 4 та 2РГ-22 ст. 6, про що свідчать Протоколи №№ 8414, 8415 від 27.03.1998 р. Котушки завдовжки 150 мм зі зварним швом посередині були розрізані за розміткою на 17 темплетів за допомогою дискової фрези завширшки 3 мм. Ширина темплетів становила 45...52 мм, рахуючи по внутрішній поверхні труби, а товщина відповідала товщині стінки труби 16 мм. Вирізані темплети з можливими (передбачуваними) дефектами піддавалися долому за схемою триточкового вигину. Максимальне зусилля змінювалося в межах 3...20 тс залежно від ширини темплету та розмірів дефекту.

На рис. 4, а наведено схему розташування тріщин, що були виявлені контролерами при атестації УТ методики МЦУ-7-97, а також розташування по довжині ЗЗ (ст. 4 2РГК-2), їхню нумерацію та фактичну (реальну) довжину тріщин у доломах відповідних темплетів за результатами VT (нумерація темплетів у обведених цифрах від 1 до 17), де співвідношення номера тріщини та її довжини наступне: № 1 – 45 мм, № 2 – 26 мм, № 3 – 86 мм,

№ 4 – 192 мм, № 5 – 131 мм, № 6 – 33 мм, № 7 – 182 мм, УТ – 300 і 20 мм.

Після долому темплетів №№ 2–5 виявлені дві паралельні кільцеві тріщини, що перериваються, та є симетричними щодо осі ЗЗ (рис. 4, б). Довжина тріщини на темплеті № 2 складала 45 мм за максимальної глибини 12 мм, на темплеті № 3 – 26 мм за максимальної глибини 7,5 мм, на темплеті № 3–5 – 86 мм за максимальної глибини 11 мм.

Після долому темплетів №№ 5–9 виявлено тріщину завдовжки 192 мм і з максимальною глибиною 10 мм, на темплеті № 10–12 – тріщину завдовжки 131 мм і з максимальною глибиною 10 мм, на темплеті № 14 – тріщину завдовжки 33 мм і з максимальною глибиною 11 мм і на темплеті №№ 15–17 – тріщину завдовжки 182 мм і з максимальною глибиною 11 мм. Уявлення про форму тріщин, виявлених у ст. 4 напірного трубопроводу 2РГК-2, ілюструє рис. 5, де співвідношення номера тріщини та її довжини наступне: № 1 – 45 мм, № 2 – 26 мм, № 3 – 86 мм, № 4 – 192 мм, № 5 – 131 мм, № 6 – 33 мм, № 7 – 182 мм.

Аналогічні дослідження проведено для 2РГК-22 ст. 6. На рис. 6 наведено схему розташування тріщин, що були виявлені контролерами УТ при атестації методики МЦУ-7-97, а саме, зафіксовано несучільності завдовжки $L = 40$ мм, $\Omega: (3^{45}, 4^{10})$; $L = 180$ мм, $\Omega: (6^{20}, 8^{00})$ і $L = 90$ мм, $\Omega: (9^{00}, 10^{00})$, а також їхнє роз-

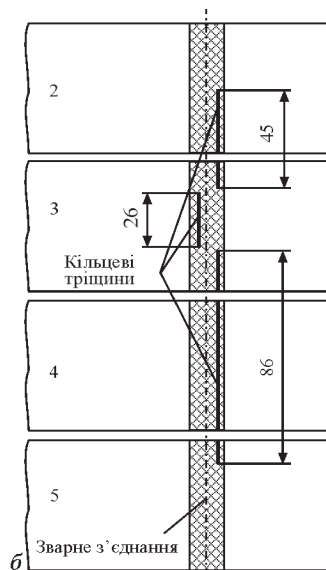
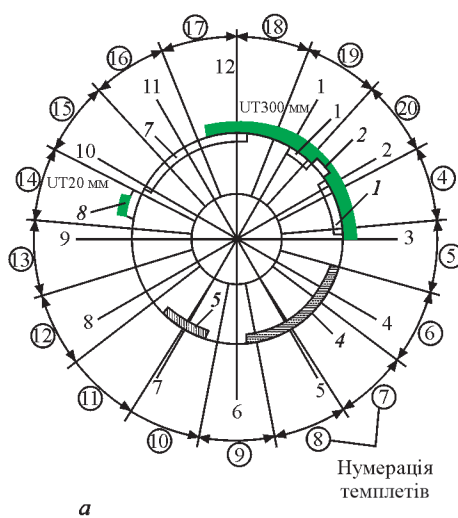


Рис. 4. Схема розташування тріщин при атестації УТ методики МЦУ-7-97 (а) і схема розташування виявлених тріщин у темплеті №№ 2–5 (б)

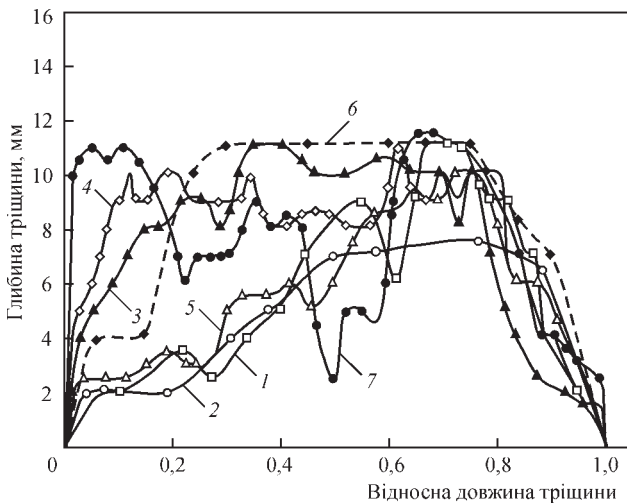


Рис. 5. Форма тріщин, виявлених у ст. 4 напірного трубопроводу 2РГК-2

ташування по довжині 33 (ст. 6 2РГК-22), їхню нумерацію (від 1 до 8) та фактичну (реальну) довжину тріщин, що були заміряні при VT у дологах відповідних темплетів (нумерація в обведених цифрах від 20 до 36). Тут співвідношення номера тріщини та її довжини наступне: № 1 – 305 мм, № 2 – 73 мм, № 3 – 55 мм, № 4 – 36 мм, № 5 – 75 мм, № 6 – 18 мм, № 7 – 76 мм, № 8 – 36 мм, УТ – 40, 180, 90 мм

Після долому темплетів №№ 20–26 виявлено дві паралельні кільцеві тріщини, що перериваються, і є симетричними щодо осі 33 (рис. 7, а). Довжина тріщини на темплетях №№ 20–22 склала 73 мм за максимальної глибини 10 мм, на темплетях №№ 20–26 – 305 мм за максимальної глибини також 10 мм, на темплетях №№ 25 і 26 – 55 мм за максимальної глибини 7 мм.

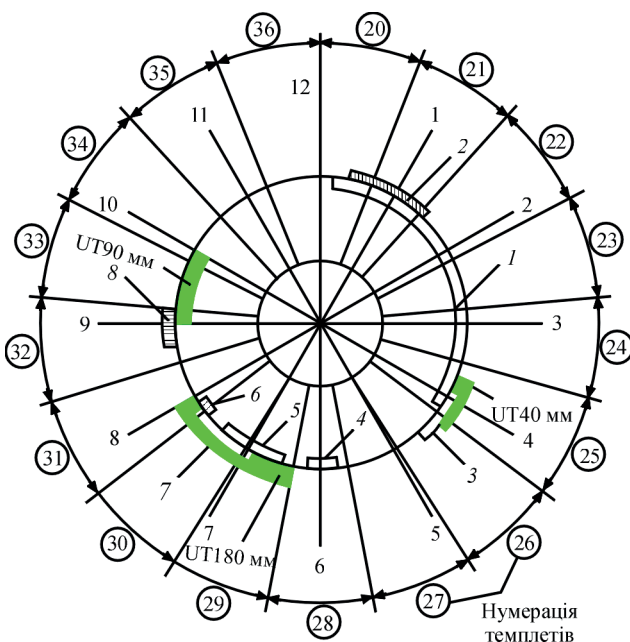


Рис. 6. Схема розташування тріщин, що були виявлені контролерами УТ при атестації методики МЦУ-7-97

Після долому темплетів №№ 29–31 також виявлено дві паралельні кільцеві тріщини, що перериваються, і є симетричними щодо осі 33 (рис. 7, б). Довжина тріщини на темплетях №№ 29, 30 склала 75 мм за максимальної глибини 6,5 мм, на темплетях №№ 29–31 – 76 мм за максимальної глибини 7,5 мм і темплетях №№ 30 і 31 – 18 мм за максимальної глибини 9 мм. Після долому темплетів №№ 28 і № 32 у кожному з них виявлено тріщину завдовжки 36 мм, максимальної глибини 8 і 7,5 мм відповідно.

Уявлення про форму тріщин, виявлених у ст. 6 напірного трубопроводу 2РГК-22, ілюструє рис. 8, де співвідношення номера тріщини та її довжини наступне: № 1 – 305 мм, № 2 – 73 мм, № 3 – 55 мм, № 4 – 36 мм, № 5 – 75 мм, № 6 – 76 мм, № 7 – 18 мм, № 8 – 35 мм.

Якщо порівнювати розташування та довжину несутцільностей, виявлених контролерами УТ при атестації методики МЦУ-7-97, з фактичним розташуванням і розмірами тріщин, визначеними ві-

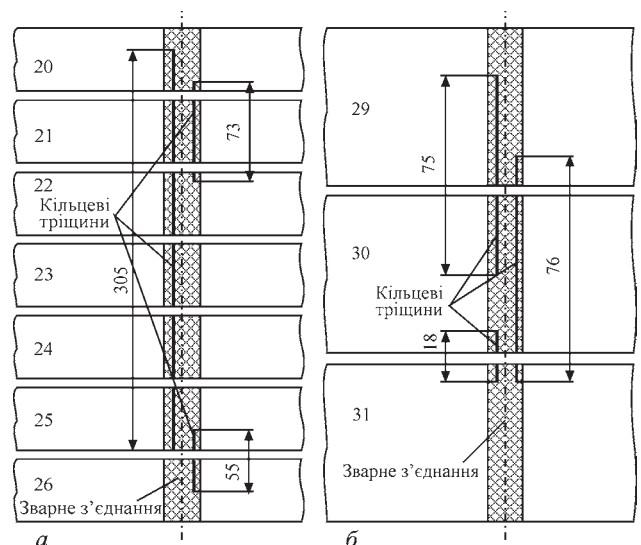


Рис. 7. Схема розташування тріщин у темплетях: а – №№ 20–26, б – №№ 29–31

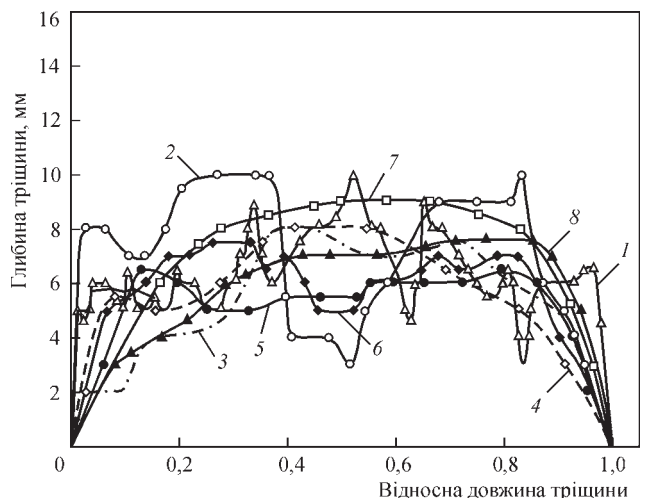


Рис. 8. Форма тріщин, виявлених у 33 (ст. 6 напірного трубопроводу 2РГК-22)

зуально-вимірювальним контролем (VT) (рис. 4, а), то для 2РГ-2 ст. 4 несучільність протяжністю $UT = 300$ мм підтверджується фактичними (реальними) тріщинами $VT = 45$ (1) + 26 (2) + 86 (3) + 182 (7) = 339 мм, а $UT = 20$ мм – фактичною тріщиною $VT = 33$ мм. Недобраковка (хибно-негативний результат – дефект є, але метод його не виявив) за довжиною несучільностей становить $11,5$ і 39 % відповідно при вельми коректному визначенні місця розташування дефектів. При цьому реальні тріщини завдовжки 192 (4) і 131 (5) мм залишилися непоміченими контролерами UT, хоча максимальна глибина цих тріщин досягала 10 мм або $62,5$ % від товщини стінки труби.

Аналогічне порівняння можна виконати й для 2РГК-22 ст. 6 (рис. 6). Несучільність протяжністю $UT = 40$ мм підтверджується фактичною тріщиною $VT = 55$ мм (3), $UT = 180$ мм – фактичними тріщинами $VT = 75$ (5) + 18 (6) + 76 (7) = 169 мм, а $UT = 90$ мм – фактичною тріщиною $VT = 36$ мм (8). Недобраковка (хибно-негативний результат) за довжиною несучільності становить 27 % для тріщини завдовжки 55 мм (3), а перебраковка (хибно-позитивний результат – дефект відсутній, а метод вказує на його наявність) для тріщин завдовжки 169 і 36 мм (8) становить 6 і 60 % відповідно при досить коректному визначенні місця розташування дефектів. При цьому реальні тріщини завдовжки 305 (1), 73 (2) і 36 (4) мм залишилися непоміченими контролерами UT, хоча їхня максимальна глибина досягала 10 , 10 і $7,5$ мм, що становила до $62,5$ % від товщини стінки труби.

Після затвердження МЦУ-7-97 усі роботи з контролю зварних з'єднань трубопроводів енергоблоку № 3 ЧАЕС проводилися за цією методикою, хоча до неї вносилися певні вдосконалення. Так, наприклад, відповідно до п.п. 1.3.1 і 4.2.1 методики МЦУ-7-97 оцінка якості проводиться за першим із серії ехо-сигналів, відбитих від несучільності (за ехо-сигналом головної хвилі). Однак у світовій практиці UT для оцінки допустимості дефектів, як правило, використовується другий ехо-сигнал (так званий Self-tandem) як найінформативніший.

У цьому випадку другий сигнал зазвичай має більшу амплітуду. При контролі в СПР-97 проходило освоєння методики МЦУ-7-97, і оператори-дефектоскопісти, очевидно, проводили оцінку зварних з'єднань строго за методикою. А вже при повторному контролі в СПР-99 оцінка якості зварних з'єднань, в окремих випадках (при малих амплітудах першого ехо-сигналу), проводилася за другим сигналом, що підтверджується результатами експертного контролю. Так, у зварних з'єднан-

нях 1РГК-3 ст. 10, 1РГК-17 ст. 10, 1РГК-16 ст. 12, 1РГК-18 ст. 12, 1РГК-14 ст. 11 та ін. амплітуда другого сигналу на $6...8$ дБ була більшою від амплітуди першого ехо-сигналу, за яким у відповідності до методики МЦУ-7-97 повинна була проводитись оцінка якості зварних з'єднань. При цьому довжина несучільностей, виміряна за першим сигналом, значно менша від протяжності, виміряної за другим сигналом. Так, протяжність (довжина) дефекту в зварному шві 1РГК-14 ст. 11, виміряна за другим сигналом, становить 40 мм, а за першим – тільки 20 мм, протяжність несучільностей у зварних з'єднаннях 1РГК-3 ст. 10, 1РГК-17 ст. 10, 1РГК-16 ст. 12, 1РГК-18 ст. 12, 1РГК-14 ст. 11 – не більше 10 мм, тобто несучільності є точковими. З іншого боку, слід зазначити, що амплітуди перших ехо-сигналів від відбивачів, не зафіксованих до СПР-99, становлять $4...6$ дБ щодо рівня бракування, тобто близькі до пошукового рівня (у даній інструкції пошуковий рівень відрізняється від бракувального на 6 дБ).

Крім того, слід враховувати, що значний вплив на відтворюваність (повторюваність результатів) контролю мають умови проведення контролю:

- якість підготовки поверхні зварного з'єднання;
- точність виготовлення СЗП (стандартного зразка підприємства);
- температура при налаштуванні та проведенні контролю.

Відповідно до нормативно-технічної документації [7, 10, 13] при проведенні ультразвукового контролю допускається похибка вимірювання амплітуди ± 2 дБ. Тому в зварних швах, у яких виявлені відбивачі з перевищенням над пошуковим рівнем до 2 дБ, що знайдені при контролі в 1999 р., могли не фіксуватися під час проведення контролю в 1997–1998 р.р. як з об'єктивних, так і з суб'єктивних причин. Відбивачі ж з амплітудою ехо-сигналу, що перевищує на 2 дБ пошуковий рівень, мали б бути зафіксовані при попередньому контролі.

Різниця амплітуд сигналів від паза завглибшки 2 мм на різних СЗП становила 2 дБ. Відмінність зумовлена тим, що паз виконується в зварному з'єднанні і, природно, амплітуда сигналу залежить від режимів зварювання та розташування паза у зварному шві. Амплітуда ехо-сигналу головної хвилі, відбитої від паза, має нелінійну залежність від його глибини. За глибини паза близько 6 мм ця характеристика має локальний мінімум. При цьому амплітуда сигналу знижується до амплітуди сигналу від паза завглибшки 2 мм, тобто до пошукового рівня та при подаль-

шому збільшенні глибини паза амплітуда знову збільшується.

Слід зазначити, що з кінця 1970-х по 1990-і р.р. було реалізовано міжнародну програму дослі-

джень PISC (Program for the Inspection of Steel Components). Це була серія великомасштабних міжнародних проєктів (PISC I, PISC II, PISC III) щодо оцінки ефективності ультразвукового контр-

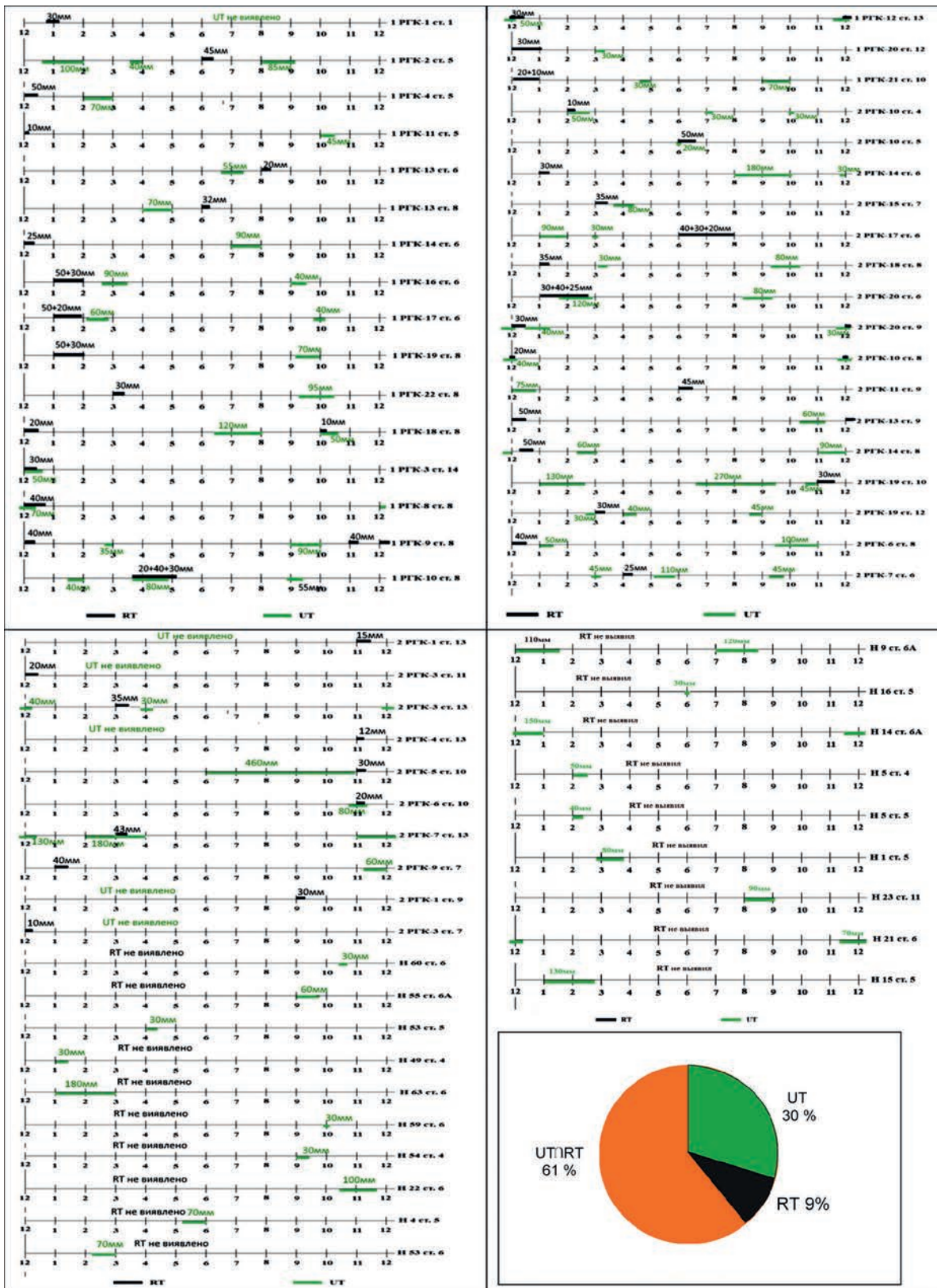


Рис. 9. Розміри та розташування несущальностей, виявлених RT і UT на опускних трубопроводах (позначені нитки (H) і стики (ст.) 33), а також напірних трубопроводах (позначені 1РГК для першого розподільного групового колектора (РГК) і 2РГК – для другого, із зазначенням номера 33 (ст.)

олу (UT) відповідальних конструкцій, особливо в атомній енергетиці [15]. Дослідження PISC допомогли розробити міжнародні стандарти та методики моделювання ультразвукових сигналів, що призвело до значного підвищення якості промислової дефектоскопії, надійності, достовірності й точності виявлення дефектів у сталевих посудинах під тиском і трубопроводах.

Для виявлення внутрішніх (підповерхневих) несучільностей (дефектів) у металевих зварних з'єднаннях практично використовують лише два методи неруйнівного контролю – RT і UT. Найпростіший і найдоступніший спосіб збільшення якості контролю зварних з'єднань – це застосовувати послідовно обидва методи RT і UT. На розгортках зварних з'єднань (рис. 9) нанесені розміри та розташування несучільностей, виявлених RT і UT в ЗЗ ОТ та НТ КМПЦ енергоблоку №3 ЧАЕС у період СТР-97. Із 64 запроTOCOLьованих несучільностей 39 тріщиноподібних дефектів виявлено методами RT і UT ($UT \cap RT$), лише UT – 19 дефектів і лише RT – 6 дефектів.

Як впливає з рис. 9, збіг у виявленні (фіксації наявності є або немає) несучільностей за даними спільного контролю $UT \cap RT$ становить 61 % від загальної кількості запроTOCOLьованих дефектів. Це – досить високе значення, яке свідчить про хорошу результативність застосовуваних методів неруйнівного контролю (NTD) в аустенітних ЗЗ. У той же час, збіг результатів спільного контролю $UT \cap RT$ щодо виявлення як розташування, так і протяжності виявлених несучільностей становить лише 11 % (7 з 64, 1РГК-8 ст. 8, 1РГК-10 ст. 8, 1РГК-12 ст. 13, 2РГК-6 ст. 10, 2РГК-10 ст. 5, 2РГК-10 ст. 8, 2РГК-20 ст. 9) при повністю відсутній інформації щодо глибини дефектів. При цьому лише RT виявив 9 % і лише UT за методикою МЦУ-7-97 – 30 % від кількості фактичних дефектів. І хоча формально ультразвуковий контроль не виявляє 9 % дефектів, у той час як рентгенівський



Рис. 10. Загальний вигляд зварного з'єднання приварювання днища 1РГК-8, ст. 177, розрізаного на темплеті. Верхня частина темплетів звернена у бік труби РГК, нижня – у бік днища

RT не виявляє 30 %, слід пам'ятати, що UT не гарантує виявлення несучільностей на тлі відбиття від перевищення проплаву (посилена в кореневій частині шва). Метал аустенітних зварних швів вирізняється дендритною або колоніальною структурою зерен, орієнтованих у напрямку тепловідводу під час кристалізації. Така текстура формує просторово змінну анізотропію пружних властивостей матеріалу, що істотно впливає на поширення ультразвукових хвиль, а крупнозерниста структура зумовлює [16]:

- відхилення ультразвукового променя;
- зміну швидкості поширення хвиль залежно від напрямку;
- підвищене затухання сигналу;
- утворення структурного шуму.

Так, наприклад, у напірному трубопроводі 1РГК-8, ст. 177 ультразвуковим контролем (UT) був виявлений відбивач завдовжки 468 мм. З метою визначення фактичних розмірів дефекту була вирізана «котушка». Після її дезактивації та відповідної розмітки «котушка» розрізалася на темп-

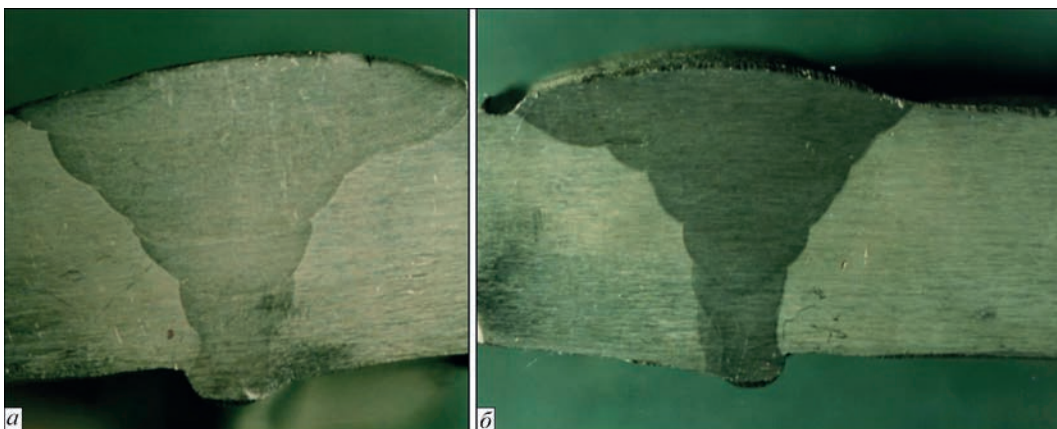


Рис. 11. Профіль ЗЗ ст. 177 напірного трубопроводу 1РГК-8 у місцях різку темплету № 8 (а) та № 10 (б)

лети дисковою фрезою (товщина фрези 3 мм). Нумерація темплетів, що показана на рис. 10, використовувалася для ідентифікації фактичних розмірів при візуально-вимірному (VT) контролі. Виявлений УТ відбивач розташований у районі темплетів №№7–11, тоді як темплети №№6–11 охоплюють майже половину кола труби.

На рис. 11 показано профіль 33, виявлений на поверхнях різку темплетів за допомогою їх шліфування та подальшого травлення реактивом (1 частина HNO_3 + 2 частини HCl (царська горілка)), що дозволяло виявити контури та структуру зварного з'єднання в області кожного різку, а також тріщини, якщо вони були присутні. Як впливає з наведеного фото на рис. 11, в районі 33 ст. 177 напірного трубопроводу 1РГК-8 у місцях різку темплету №8 (рис. 11, а) та № 10 (рис. 11, б) у зварному шві та зоні термічного впливу поблизу лінії сплавлення (тобто у місцях, де зазвичай розвиваються тріщини МКРПН або IGSCC) тріщиноподібних дефектів не виявлено.

Факт наявності відбитого сигналу та відсутність тріщин може бути пояснений наявністю у шва великої викривленої поверхні у кореневій області (перевищення проплаву), що виступає понад 3 мм над внутрішньою поверхнею труби. Зрозуміло, що проблеми з помилками є як у рентгена, так і ультразвуку: рентген схильний пропускати тріщиноподібні дефекти, а ультразвуком важко відокремити кутовий відбивач, що утворений тріщиною, від перевищення проплаву. Крім того, аустенітні матеріали через особливості формування структури 33 мають знижену контролепридатність для ультразвуку, оскільки анізотропна та крупнозерниста структура металу шва призводить до викривлення траєкторії ультразвукових хвиль, значного розсіювання сигналу та зниження співвідношення сигнал/шум. В аустенітних трубопроводах Ду 300 ці фактори посилюються через:

- значну товщину стінки;
- складну геометрію багатопрохідного зварного шва та технологію його зварювання (MMA, TIG, SAW);
- обмежений доступ до поверхні контролю;
- наявність залишкових напружень.

Сучасний розвиток неруйнівного контролю пов'язаний з впровадженням високотехнологічних ультразвукових методів, здатних забезпечити підвищену ймовірність виявлення дефектів (Probability of Detection, POD [17–19]) у складних структурно-неоднорідних матеріалах, зокрема аустенітних зварних швах.

Одним із найперспективніших підходів є використання ультразвукового контролю з фазованими решітками (Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT), який забезпечує електронне керування напрямком і фокусуванням ультразвукового пучка, що дозволяє підвищити чутливість до дефектів різної орієнтації та геометрії [20–23]. Завдяки можливості формування секторних сканів і використання багатоканальних перетворювачів PAUT забезпечує повнішу інформацію про форму та розміри дефектів у порівнянні з традиційними одноелементними перетворювачами. Дослідження показують, що застосування фазованих решіток дозволяє зменшити ймовірність пропуску дефектів і підвищити повторюваність результатів контролю.

Важливим доповненням до PAUT є метод дифракції часу прольоту (Time of Flight Diffraction, TOFD), який базується на реєстрації дифрагованих хвиль від вершин тріщин [24]. На відміну від традиційного амплітудного методу, TOFD забезпечує точніше визначення координат дефектів і меншою мірою залежить від їхньої орієнтації, що сприяє підвищенню достовірності оцінювання геометричних параметрів дефектів. Водночас відомі обмеження TOFD, зокрема наявність «мертвих зон» поблизу поверхні та донної частини зварного шва, які компенсуються комбінованим застосуванням PAUT та інших методів ультразвукового контролю.

Перспективним напрямом підвищення інформативності ультразвукового контролю є застосування алгоритмів SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) та повноматричного захоплення сигналів (FMC), що дозволяють покращити просторову роздільну здатність зображення та зменшити вплив шумів. Порівняльні дослідження методів реконструкції, таких як Total Focusing Method (TFM), Reverse Time Migration (RTM) та Full Waveform Inversion (FWI), показують підвищення точності виявлення та класифікації дефектів за рахунок використання повної інформації про хвильове поле [25].

Для оптимізації параметрів контролю та аналізу взаємодії ультразвукових хвиль із дефектами широко використовується моделювання методом скінченних елементів (Finite Element Method, FEM). Чисельне моделювання дозволяє враховувати складну геометрію зварного шва, анізотропію матеріалу та особливості поширення хвиль, що сприяє підвищенню достовірності результатів контролю та створенню моделей POD. Застосування FEM дозволяє дослідити вплив частоти, кута введення хвиль і конфігурації перетворювачів

на чутливість методу та обґрунтувати вибір оптимальних параметрів контролю [12, 16].

Таким чином, результати сучасних досліджень підтверджують, що комплексне застосування методів PAUT, TOFD, низькочастотного ультразвуку, SAFT-реконструкції та чисельного моделювання поширення хвиль забезпечує підвищення ймовірності виявлення дефектів у зварних з'єднаннях аустенітних сталей порівняно з традиційними методами ультразвукового контролю, що дозволяє зменшити невизначеність результатів контролю та підвищити обґрунтованість оцінки технічного стану аустенітних трубопроводів.

Візуально-вимірний контроль (VT) реальних розмірів тріщини на доломах темплетів. З метою визначення фактичних похибок неруйнівних методів контролю, що застосовувались у СПР-97, було проведено візуально-вимірний контроль (VT) реальних розмірів тріщини на доломах темплетів.

Як правило, після дезактивації котушки, на якій експлуатаційним RT1 (просвічуванням через дві стінки) та/або UT згідно з методикою МЦУ-7-97 були виявлені протяжні несучільності, у лабораторних умовах на вирізаній котушці виконувалася контрольне панорамне гамма-просвічування через одну стінку RT2 або/та капілярний контроль РТ і розмітка дефектних ділянок. Вирізані «котушки» трубопроводів з дефектними зварними з'єднаннями завдовжки до 180 мм розрізалися на темплети завширшки по хорді 15...50 мм і піддавалися долому на випробувальній машині за схемою триточкового згину з навантаженням посередині прольоту (по осі зварного шва). Після долому темплетів проводилися вимірювання довжини (з

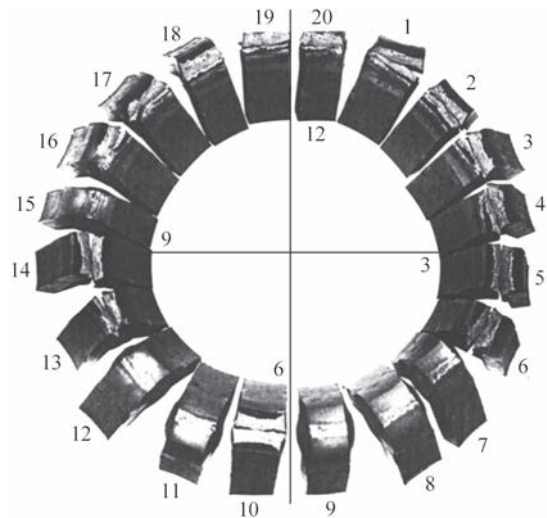


Рис. 12. Розташування темплетів, вирізаних із котушки Н15 ст. 5

урахуванням ширини різа фрези 3 мм) та глибини дефектів. Вимірювання проводили з кроком 5 мм по осі шва. Похибка вимірювань була не більше ± 1 мм за довжиною дефекту та $\pm 0,5$ мм за його глибиною. У табл. 4 наведено результати за довжиною і місцезнаходженням несучільностей, виявлених експлуатаційним RT1, UT, контрольною панорамною просвіткою RT2 і прямими вимірами VT.

На прикладі опускного трубопроводу Н-15 ст. 5 (рядок № 8 у табл. 4) проілюструємо обсяг виконаних досліджень з ідентифікації розташування та визначення розмірів тріщиноподібних дефектів. За результатами експлуатаційного RT1 (просвічування через дві стінки у складі обладнання) неприпустимих дефектів не виявлено (ДНО). Ультразвуковий контроль за методикою МЦУ-7-97 виявив відбивач з амплітудою $A_{бр} + 8$ дБ, що відповідає несучільності $L = 130$ мм, яка розташована на ци-

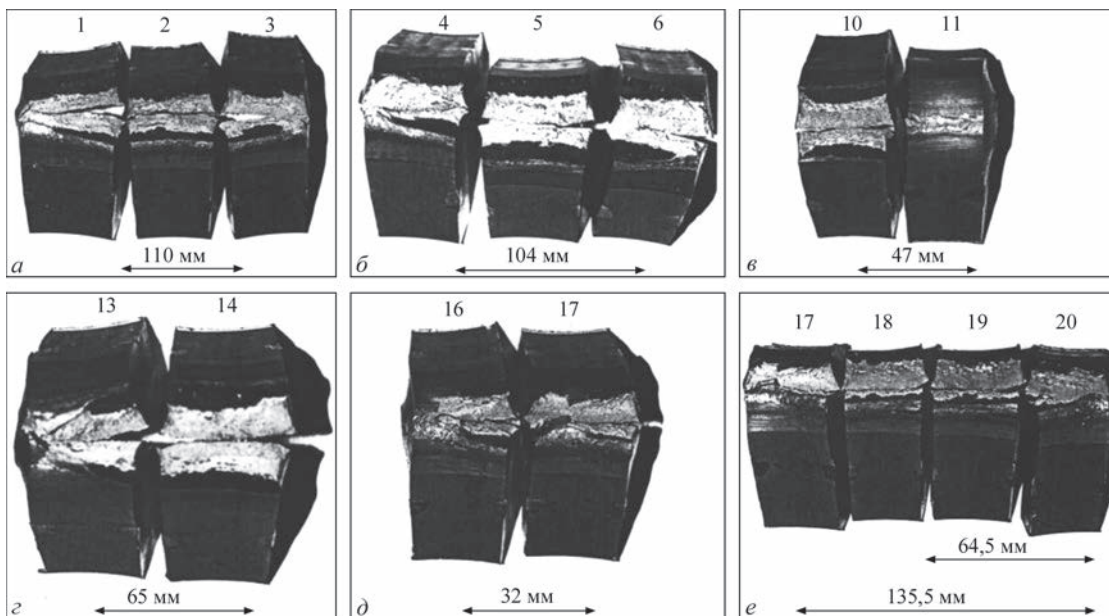


Рис. 13. Фото зруйнованих темплетів із виявленими тріщинами

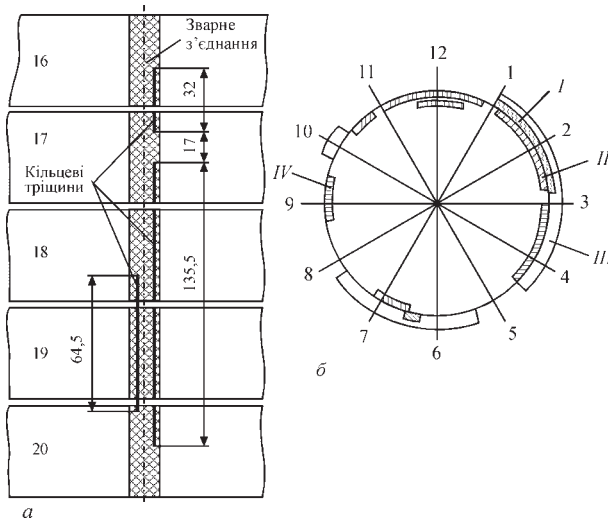


Рис. 14. Схема розташування тріщин у темплетях №№ 16–20 (а) і схема розташування дефектів в 33 ст. 5 ОТ Н-15 (№ 8 у табл. 4), виявлених різними методами (б): I – УТ, L = 130 мм; II – РТ, L = 25 мм; III – РТ2, L = 265, 187, 40 мм; IV – VT, L = = 135, 110, 104, 64,5, 62, 47, 32 мм

ферблаті годинника $\Omega:(1^{00}, 2^{50})$. Після вирізки та дезактивації котушки завдовжки 90 мм були виконані в лабораторних умовах РТ2 (панорамне просвічування), яке зафіксувало тріщини: 1. L = 265 мм, $\Omega:(1^{00}, 4^{40})$; 2. L = 187 мм, $\Omega:(5^{10}, 7^{40})$; 3. L = 40 мм, $\Omega:(9^{45}, 10^{20})$ та капілярний контроль (РТ) кореневої частини 33, що виявив лінійний індикаторний слід протяжністю 25 мм, розташований $\Omega:(6^{20}, 6^{30})$. З урахуванням цих результатів було проведено розрізання котушки на темплети завширшки 33...50 мм, рахуючи по внутрішній поверхні труби. Схему розташування темплетів після їх долому за схемою риточкового вигину наведено на рис. 12.

Після долому темплетів №№ 1–3 було виявлено тріщину завдовжки 110 мм і максимальною глибиною 8 мм (рис. 13, а), на темплетях №№ 4–6 – тріщину завдовжки 104 мм та максимальною глибиною 9,5 мм (рис. 13, б). Відстань між тріщинами на темплетях № 3 і № 4 склала 27 мм. Після долому темплетів №№ 10, 11 виявлено тріщину завдовжки 47 мм і максимальною глибиною 8 мм (рис. 13, в), на темплетях №№ 13, 14 – тріщину завдовжки 65 мм і максимальною глибиною 8,5 мм (рис. 13, з), на темплетях №№ 16, 17 – тріщину завдовжки 32 мм і максимальною глибиною 7,5 мм (рис. 13, д). Після долому темплетів №№ 17–20 виявлено дві паралельні тріщини – одну тріщину завдовжки 135,5 мм, другу на темплетях №№ 18–20 – завдовжки 64,5 мм і максимальною глибиною 8 мм (рис. 13, е).

Схему розташування тріщин на темплетях №№ 16–20 наведено на рис. 14, а, а схему розташуван-

ня дефектів, виявлених різними методами, ілюструє рис. 14, б.

Якщо порівнювати розташування та довжину несучільностей, виявлених контролерами УТ (УЗК по МЦУ 7-97), РТ2 (панорамне просвічування через одну стінку в лабораторних умовах), РТ (капілярний контроль корня 33) з фактичним розташуванням і розмірами тріщин, визначеними візуально-вимірвальним контролем (VT) (рис. 14, б), то для 33 ст. 5 ОТ Н-15 (№ 8 у табл. 4) несучільність протяжністю УТ = 130 мм $\Omega:(1^{00}, 2^{50})$ підтверджується реальною тріщиною VT(1) = 110 мм, $\Omega:(1^{10}, 2^{45})$. Перебраковка за довжиною несучільностей становить 15 % при вельми коректному визначенні місця розташування даного дефекта, але реальні тріщини VT(2) = 104 мм, $\Omega:(3^{10}, 4^{30})$; VT(3) = = 32 мм, $\Omega:(10^{20}, 10^{50})$; VT(4) = 47 мм, $\Omega:(6^{35}, 7^{10})$; VT(5) = 62 мм, $\Omega:(8^{45}, 9^{35})$; VT(6) = 135 мм, $\Omega:(11^{05}, 12^{50})$ і VT(7) = 64,5 мм, $\Omega:(11^{45}, 12^{30})$ залишилися не поміченими контролерами УТ, хоча максимальна глибина цих тріщин досягала 9,5 мм або 40 % від товщини стінки труби.

Рентгеновський експлуатаційний контроль (РТ1) дефектів взагалі не виявив (ДНО), а панорамне просвічування через одну стінку в лабораторних умовах (РТ2) виявив несучільність завдовжки L = 265 мм, $\Omega:(1^{00}, 4^{40})$, що підтверджується реальними тріщинами VT(1) = 110 мм, $\Omega:(1^{10}, 2^{45})$ + VT(2) = 104 мм, $\Omega:(3^{10}, 4^{30})$ = 214 мм. Перебраковка за довжиною несучільностей становить близько 20 % при вельми коректному визначенні місця розташування реальних тріщин. Несучільність завдовжки L = 187 мм, $\Omega:(5^{10}, 7^{40})$ підтверджується реальною тріщиною VT(4) = = 47 мм, $\Omega:(6^{35}, 7^{10})$ та даними капілярного контролю РТ = 25 мм, $\Omega:(6^{20}, 6^{30})$, що також виконувався в лабораторних умовах. При цьому перебраковка по РТ2 становить майже 75 %, а недобраковка по РТ – майже 47 %. Зауважимо, що навіть у лабо-

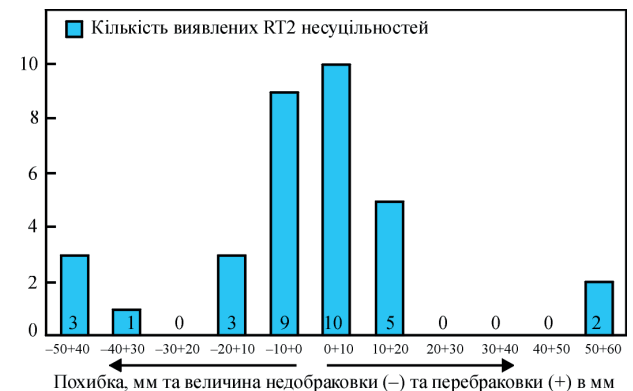
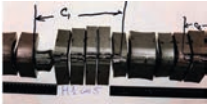


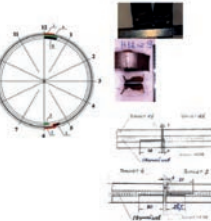
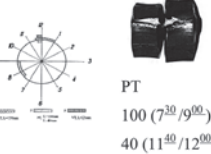





Рис. 15. Похибка за даними контрольного панорамного просвічування РТ2 та прямих вимірів VT при визначенні довжини тріщин в опускних трубопроводах КМЩЦ енергоблоку № 3 ЧАЕС

Таблиця 4. Протяжність тріщин в опускних трубопроводах КМПЦ енергоблоку № 3 ЧАЕС за даними експлуатаційного RT1, UT, лабораторного капілярного контролю РТ, контрольного панорамного просвічування RT2 та прямих вимірів VT

№ з/п	Нитка і 33 (стику)	Протяжність за результатами експлуатаційного RT1	Протяжність за результатами експлуатаційного UT. Довжина × максимальна глибина, мм (розташування, год ^{аб})	Протяжність за результатами панорамного просвічування RT2, мм або дані капілярного контролю (РТ, довжина, мм і розташування, год ^{аб})	Реальна протяжність / максимальна глибина дефекта VT, мм. Схема розташування несутцільностей	Фото (схема) уламків темплетів
1	Н-1, ст. 5	100	Точ. ×15 (12 ⁰⁰) Точ. ×15 (6 ⁰⁰)	150 20 108 58	146 / 11 32 / 10 немає немає	
2	Н-2, ст. 5	250	225	Дані відсутні	150 / 8	
3	Н-8, ст. 6	40	Дані відсутні	50 25	55 / 8,5 28 / 8	
4	Н-12, ст. 9	45 (12 ⁰⁰ / 12 ³⁰)	50 (12 ⁰⁰ / 12 ³⁰) 23 (6 ⁰⁰ / 5 ³⁰) ОНО	50 (12 ⁰⁰ / 12 ³⁰) ДНО ДНО	36 / 9 (12 ⁰⁰ / 12 ³⁰) 55,5 / 7,5 (5 ³⁰ / 6 ⁰⁰) 32 і 9,5 (5 ²⁰ / 5 ⁴⁰)	
5	Н-14, ст. 5	30 20 10	Дані відсутні	40 110	40 / 5 58 / 6	
6	Н-14, ст. 6А	ДНО Утж<1,6	Абр + 8 дб; E = 150 мм (11 ³⁰ / 13 ⁰⁰)	Дані відсутні	23 / 7,5 (11 ⁴⁰ / 12 ⁰⁰)	
7	Н-15, ст. 4	50	Дані відсутні	100 90 + 45	82 / 7 117 / 7	
8	Н-15, ст. 5	ДНО	130 (1 ⁰⁰ / 2 ³⁰) Абр + 8 дб	265 187 40	135,5 / 9 (11 ⁰⁵ / 12 ⁵⁰) 110 / 8 (1 ¹⁰ / 2 ⁴⁵) 104 / 9,5 (3 ⁰⁰ / 4 ³⁰) 65 / 8,5 (8 ⁴⁵ / 9 ³⁵) 47 / 8 (6 ³⁵ / 7 ¹⁰) 32 / 7,5 (10 ²⁰ / 10 ⁵⁰)	Фото і схеми дивись нижче по тексту РТ = 23 мм (6 ²⁰ / 6 ³⁰)
9	Н-23, ст. 4	80	40×16 (3 ³⁰ / 3 ⁵⁰)	63	82 / 10	
10	Н-47, ст. 6	50	Дані відсутні	190 + 110 65 45 35 + 25	89 + 52 / 8 48 / 7 45 / 8 немає	
11	Н-50, ст. 6	120	Дані відсутні	90 + 10 40 + 25 40	98 / 8,5 61 / 8,5 22 / 6	
12	Н-53, ст. 3	70 (12 ⁰⁰ / 1 ³⁰)	Дані відсутні	75	75	

13	Н-53, ст. 6А	50	Дані відсутні	80 72	125 / 11 89 / 9	
14	Н-56, ст. 3	80 (7 ⁰⁰ / 8 ⁰⁰)	Дані відсутні	40 25 15	43 / 7,5 21 / 11 немає	
15	Н-56, ст. 8	120 50	Дані відсутні	65 + 10 20 10	82 / 4 19 / 3 немає	
16	Н-57, ст. 3	70 (12 ⁰⁰ / 1 ³⁰)	Дані відсутні	25 + 15	37 / 7	
17	Н-57, ст. 6А	70	70×14 (12 ⁰⁰ / 13 ⁰⁰)	90	128 / 9,5	
18	Н-58, ст. 9	100 50 40 25	Дані відсутні	55	47 / 11,5	
19	Н-59, ст. 4	50 40 35	50×14(2 ³⁰ / 3 ⁰⁰) 40×14 (9 ⁰⁰) ОНО	70; 45 35 25	73 ⁰⁰ / 9,5 38 / 8 57 / 7,5	
20	Н-61, ст. 5	15	Дані відсутні	25 ДНО 110 ДНО	23 / 7 13 / 5,5 154 / 8 10 / 6	
21	Н-62, ст. 6	30	Дані відсутні	30	43 / 9	
22	Н-64, ст. 6А	40	150×14 (12 ³⁰ / 2 ³⁰) Точ. × 14 (2 ⁰⁰)	100 100 90	141 / 9 93 / 9 90 / 7,5	

Примітка: *Дві тріщини, що зливаються в одну.

раторних умовах контролери РТ не помітили реальні тріщини VT(1) = 110 мм, Ω:(1¹⁰, 2⁴⁵), VT(2) = 104 мм, Ω:(3¹⁰, 4³⁰); VT(3) = 32 мм, Ω:(10²⁰, 10⁵⁰);

VT(5) = 62 мм, Ω:(8⁴⁵, 9³⁵); VT(6) = 135 мм, Ω:(11⁰⁵, 12⁵⁰) і VT(7) = 64,5 мм, Ω:(11⁴⁵, 12³⁰). Несуцільність завдовжки L = 40 мм, Ω:(9⁴⁵, 10²⁰), що виявлена панорамним просвічуванням через одну стінку в лабораторних умовах (RT2), закінчується там, де починається реальна тріщина VT(3) = 32 мм, Ω:(10²⁰, 10⁵⁰), а тріщини VT(6) = 135 мм, Ω:(11⁰⁵, 12⁵⁰) і VT(7) = 64,5 мм, Ω:(11⁴⁵, 12³⁰) не були виявлені жодним із NDT.

Аналізуючі дані, наведені в табл. 4, можна дійти висновку, що найкращі результати щодо визначення розташування та довжини реальних тріщин має панорамне просвічування через одну стінку в лабораторних умовах (RT2). Але навіть для нього похибка у визначенні довжини тріщини досить суттєва, що ілюструє рис. 15.

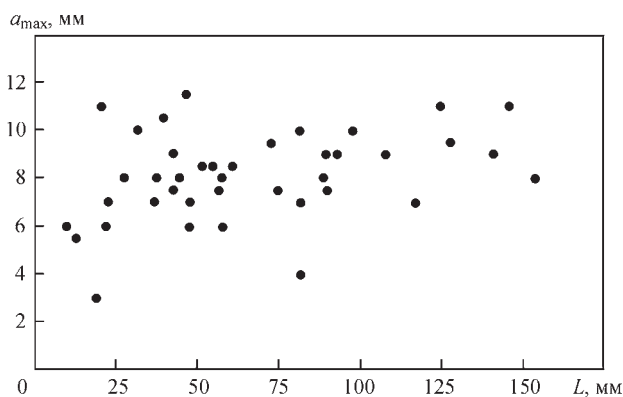


Рис. 16. Залежність довжини L виявлених реальних тріщин від їхньої максимальної глибини a_{max}

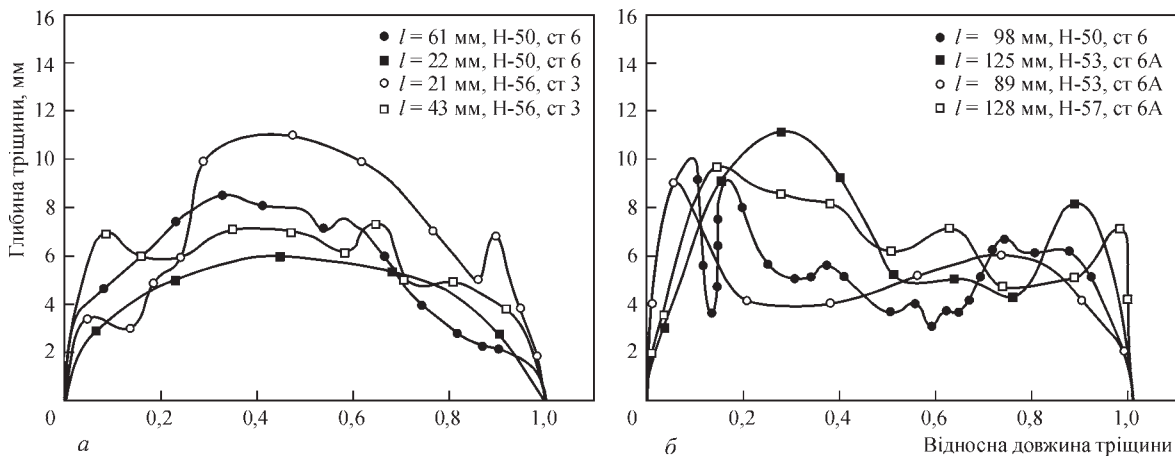


Рис. 17. Конфігурація фронту тріщин, що були виявлені: а – в 33 ст. 6 Н-50 для тріщин завдовжки 61 і 22 мм, ст. 3 Н-56 для тріщин завдовжки 21 і 43 мм; б – для тріщини завдовжки 98 мм у ст. 6 Н-50, тріщин завдовжки 125 і 89 мм у ст. 6А Н-53, тріщини завдовжки 128 мм у ст. 6А Н-57 опускних трубопроводів КМПЦ енергоблоку № 3 ЧАЕС відповідно (рядки №11, 13, 14 і 17 в табл. 4)

Результати прямих вимірів VT реальної довжини виявлених тріщин L від їхньої максимальної глибини a_{max} ілюструє рис. 16, а уявлення про конфігурацію фронту тріщин, що були виявлені в 33 ст. 6, ст. 6А, ст. 3 та ст. 6А опускних трубопроводів КМПЦ енергоблоку № 3 ЧАЕС Н-50, Н-53, Н-56 і Н-57, відповідно містить рис. 17.

Наведена на рис. 5, 8, 17 конфігурація фронту реальних тріщин, отримана в результаті прямих вимірів VT реальної довжини, від глибини тріщин свідчить, у першу чергу, про багатозародковий характер зародження тріщин МКРПН, а також про різну здатність розвитку міжкристалітного корозійного розтріскування від діючого напружено-деформованого стану та неоднорідність властивостей матеріалу в зоні зварного з'єднання. Про це також свідчать результати прямих вимірів VT для 39 тріщин, що наведені на рис. 16 та в табл. 4. Максимальна глибина виявлених тріщин не перевищувала 12 мм, тобто 3/4 від номінальної товщини стінки труби, а відношення a_{max}/L , що характеризує форму тріщини, змінюється в широкіх границях від 0,05 до 0,55 і пов'язано з кількістю зародків для одної тріщини (чим їх більше, тим a_{max}/L менше) та рівнем напруження в ослабленому тріщиною нетто-перерізі (чим він вищий, тим швидше розвивалась тріщина за механізмом МКРПН від основного зародка, лишаючи інші неактивними).

Оцінка достовірності NDT. Одним із основних кількісних показників достовірності неруйнівного контролю є ймовірність виявляємості дефектів (Probability of Detection, POD). Даний показник вирізняє імовірність того, що дефект заданого типу й розміру буде виявлений обраним методом контролю за визначених умов проведення випробувань. Методологія оцінювання POD

широко застосовується при кваліфікації методик контролю, атестації обладнання й аналізі надійності технічної діагностики відповідальних конструкцій. Нормативно-технічна база забезпечення достовірності результатів неруйнівного контролю формується багаторівневою системою стандартів ISO, EN, ASTM та національних документів [4–11, 17–19, 26, 27]. Основними інструментами підтвердження достовірності є:

- сертифікація персоналу [26];
- статистичний аналіз POD [17–19];
- стандартизація методик контролю [4–11];
- метрологічна простежуваність вимірювань [15];
- система управління якістю випробувань [27].

Комплексне застосування цих документів дозволяє мінімізувати ризик хибних результатів і підвищити надійність технічної діагностики.

Для узагальнених уявлень про виявляємість дефектів (POD) і достовірність використовуваних методів неруйнівного контролю скористаємось найбільш інформативними результатами контролю, що представлені рядками №№ 4, 6, 8 у табл. 4 та визначимо формальне значення виявляємості POD ($V1$, $V2$) та достовірності (Д) неруйнівного контролю відповідно до положень РД ЕО 0488-03 «Методичні рекомендації щодо оцінки достовірності засобів та методик неруйнівного контролю» [28]. Формули розрахунку виявляємості та достовірності для нашого випадку можна записати таким чином:

$$V1 = (N_{NDT} \cap N_{VT}) / N_{VT}, V2 = (N_{NDT} \cap N_{VT}) / (N_{VT} + N_{\Pi}), Д = (N - N_{\Pi} - N_{\text{Н}}) / N,$$

де N_{NDT} – кількість виявлених елементів шва даним методом контролю; N_{Π} – кількість перебракованих елементів шва, тобто бездефектних елементів шва, визнаних дефектними; $N_{\text{Н}}$ – кількість пропущених дефектних елементів шва, недобраковка

Таблиця 5. Зведені дані розрахунку виявлення та достовірності NDT (№№ 4, 6, 8 табл. 4)

№ 33 НТ, вияв- ляємість дефектів (POD), V1 і V2, достовірність Д	VT (ета- лонна оцін- ка), мм	Оцінки результатів NDT, мм			
	VT	RT1	RT2	UT	PT
№ 9, Н-12	36	45 $L_{\Pi} = 9$	50 $L_{\Pi} = 14$	50 $L_{\Pi} = 14$	Не прово- дився
	55,5	Не виявлено, $L_{\Pi} = 55,5$	Не виявлено $L_{\Pi} = 55,5$	32,5 $L_{\Pi} = 23,5$	
	32	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	
$\Sigma: L_{VT}, L_{\Pi}, L_{\Pi}$	123,5	$L_{\Pi} = 9$	$L_{\Pi} = 14$	$L_{\Pi} = 14$	–
		$L_{\Pi} = 80$ (з урахуванням перекриття)	$L_{\Pi} = 80$ (з урахуванням перекриття)	$L_{\Pi} = 48$ (з урахуван- ням перекриття)	–
$L_{NDT} \cap L_{VT}$	–	36	36	68	–
$D = (L - L_{\text{нр}} - L_{\Pi}) / L$	–	0,91	0,91	0,93	–
$V1 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / L_{VT}$	–	0,29	0,29	0,55	–
$V2 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / (L_{VT} + L_{\Pi})$	–	0,27	0,26	0,49	–
№ 6а, Н-14	23	Не виявлено $L_{\Pi} = 23$	Не проводиться	150 $L_{\Pi} = 127$	1. 40, $L_{\Pi} = 17$ 2. 150, $L_{\Pi} = 150$
$\Sigma: L_{VT}, L_{\Pi}, L_{\Pi}$	$L_{VT} = 23$	$L_{\Pi} = 0$	–	$L_{\Pi} = 127$	$L_{\Pi} = 167$
		$L_{\Pi} = 23$	–	$L_{\Pi} = 0$	$L_{\Pi} = 0$
$L_{NDT} \cap L_{VT}$	–	0	–	23	23
D	–	0,98	–	0,88	0,84
V1	–	0	–	1	1
V2	–	0	–	0,15	0,12
№ 5, Н-15	110	Не виявлено $L_{\Pi} = 110$	265 $L_{\Pi} = 51$	130 $L_{\Pi} = 20$	Не виявлено $L_{\Pi} = 110$
	104	Не виявлено $L_{\Pi} = 104$		Не виявлено $L_{\Pi} = 110$	Не виявлено $L_{\Pi} = 104$
	47	Не виявлено $L_{\Pi} = 47$	187 $L_{\Pi} = 140$	Не виявлено $L_{\Pi} = 47$	25 $L_{\Pi} = 20, L_{\Pi} = 42$
	62	Не виявлено $L_{\Pi} = 62$	Не виявлено $L_{\Pi} = 62$	Не виявлено $L_{\Pi} = 62$	Не виявлено $L_{\Pi} = 62$
	32	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$
	135	Не виявлено $L_{\Pi} = 135$	Не виявлено $L_{\Pi} = 135$	Не виявлено $L_{\Pi} = 135$	Не виявлено $L_{\Pi} = 135$
	64,5 Не врахо- вується	Не враховується	Не враховується	Не враховується	Не врахо- вується
$\Sigma: L_{VT}, L_{\Pi}, L_{\Pi}$	$L_{VT} = 490$	$L_{\Pi} = 0$	$L_{\Pi} = 191 + 40 = 231$	$L_{\Pi} = 26$	$L_{\Pi} = 20$
		$L_{\Pi} = 490$	$L_{\Pi} = 229$	$L_{\Pi} = 386$	$L_{\Pi} = 485$
$L_{NDT} \cap L_{VT}$	–	0	$110 + 104 + 47 = 261$	110	5
D	–	0,52	0,76	0,60	0,51
$V1 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / L_{VT}$	–	0	0,53	0,23	0,01
$V2 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / (L_{VT} + L_{\Pi})$	–	0	0,36	0,21	0,01
Усереднене для трьох зварних з'єднань:					
D	–	0,80	0,82	0,80	0,68
V1	–	0,1	0,41	0,59	0,51
V2	–	0,1	0,31	0,28	0,07

(пропуск); N_{VT} – кількість елементів шва з реальними дефектами за даними VT (еталонна оцінка); N – загальна кількість елементів шва.

Під елементом шва розуміється ділянка шва (його протяжність), яка дорівнює протяжності мі-

німального дефекту, що визначається. Наприклад, в ультразвуковому контролі під таким дефектом можна розуміти деякий граничний відбивач або нормативне значення протяжності, що мінімально враховується. Для нашого конкретного розрахунку

ці формули можна переписати згідно з протяжністю виявлених дефектів:

$$V1 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / L_{VT}, V2 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / (L_{VT} + L_{\Pi}), D = (L - L_{\Pi} - L_{\Pi}) / L,$$

де L_{VT} – загальна довжина реальних дефектів за даними VT (еталонна оцінка); L_{NDT} – загальна довжина дефектів, що визначена методом неруйнівного контролю; L_{Π} – загальна довжина перебракування; L_{Π} – загальна довжина недобраковки (пропуск); L – протяжність шва (1020 мм). Результати розрахунків наведено в табл. 5.

Отримані результати ґрунтуються на комплексних обстеженнях трьох зварних з'єднань. Ці обстеження містять, крім неруйнівного контролю, металографічні дослідження швів VT. Тому виник рідкісний випадок оцінити кількісно можливості методів неруйнівного контролю, порівняти дані методів NDT з прямими вимірами VT. Наведені результати та засновані на них висновки не можуть вважатись статистично представницькими через їхній невеликий обсяг, однак, сподіваємось, будуть корисними для прийняття зважених рішень у повсякденній практиці фахівців служб неруйнівного контролю, нагляду, діагностики тощо.

Основними напрямками покращення достовірності NDT є підвищення кваліфікації персоналу, вдосконалення методів статистичного аналізу, розвиток метрологічного забезпечення та гармонізація національних стандартів з міжнародними вимогами.

Висновки

1. Наведено результати експлуатаційного радіографічного контролю (RT), виконаного в СПР-97 на 1451 зварному з'єднанні опускних, напорних і трубопроводах САОР Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС. Виявлено 268 дефектів, що становить 18 % дефектності зварних з'єднань, із них 208 (14 %) – тріщин і 60 (4 %) – дефектів зварного шва (усадка кореня шва, непровари, шлакові включення тощо).

2. Експлуатаційний ультразвуковий контроль (UT), виконаний за методикою МЦУ-7-97 у період СПР-97 на зварних з'єднаннях трубопроводів Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС, що пройшли RT із позитивними результатами, виявив ще 183 тріщиноподібних дефектів, із яких призначено до ремонту та відремонтовано 70 зварних з'єднань.

3. Виконано порівняльний аналіз фіксації розмірів (довжини тріщини) та розташування несутцільностей, виявлених RT і UT у зварних з'єднаннях опускних і напорних трубопроводів КМПЩ енергоблоку № 3 ЧАЕС. Із 64 запротоколеваних несутцільностей 39 тріщиноподібних дефектів ви-

явлено методами RT і UT ($UT \cap RT$), лише UT – 19 несутцільностей і RT – 6 дефектів.

4. Для опускних трубопроводів КМПЩ енергоблоку № 3 ЧАЕС наведено результати прямих вимірів VT протяжності та глибини тріщин, отриманих на зруйнованих темплатах, у порівнянні з даними експлуатаційного RT1, UT, лабораторного капілярного контролю РТ і контрольного панорамного просвічування RT2. Наведена конфігурація фронту реальних тріщин, що отримана у результаті прямих вимірів VT реальної довжини від глибини тріщин, свідчить, у першу чергу, про багатозародковий характер зародження тріщин МКРПН, а також про різну здатність розвитку міжкрісталітного корозійного розтріскування від діючого напружено-деформованого стану та неоднорідності властивостей матеріалу в зоні зварного з'єднання.

5. На основі комплексного обстеження отримано значення виявляємості дефектів і достовірності результатів різних методів NDT – експлуатаційного RT1 і UT, панорамного просвічування через одну стінку в лабораторних умовах RT2 та капілярного РТ. Отримано кількісні значення для достовірності методів експлуатаційного неруйнівного контролю – RT та UT на рівні 0,8, а для виявляємості – 0,1 і 0,28 відповідно.

Список літератури

1. Тороп В.М., Рабкіна М.Д., Давидов Є.О. (2025) Ретроспективний погляд на розвиток дефектів у зварних з'єднаннях аустенітної сталі Чорнобильської АЕС. У кн.: *Зварювання та споріднені технології для відновлення України*. Тези допов. конф. під ред. О.Т. Зельніченка. Київ, ТОВ «Видавничий Дім «Патон», 105–107. DOI: <https://doi.org/10.37434/WRT2025.28>
2. Angeliu, T.M., Andresen, P.L., Sutliff, J.A., Horn, R.M. (1999) Intergranular stress corrosion cracking of unsensitized stainless steel in BWR environments. *Proc. Ninth Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water reactors*, AIME.
3. (1975) *US NRC Pipe Crack Study Group. Investigation and Evaluation of Cracking in Austenitic Strainless Steel Piping of BWR Plants*. NUREG-75/061.
4. ГОСТ 7512-82. *Контроль неруйнующей. З'єднання зварні. Радіографічний метод*. (Скасовано згідно з наказом від 25.12.2015 № 209. Термін скасування перенесено згідно з наказом від 24.01.2018 № 15).
5. ПНАЭ Г-7-017-89. *Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Радиографический контроль*. М., Госатомэнергонадзор СССР.
6. ПК 1514-72. *Правила контроля сварных соединений и наплавки узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок*. М., Энергоатомиздат (СОУ НАЕК 160:2020. *Обеспечение технической безопасности. Контроль качества основного металла, сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР. Технические требования вместо ПК 1514-72 и ПНАЭ Г-010-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля*).
7. ПНАЭ Г-7-010-89. *Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и*

- наплавки. *Правила контролю* (СОУ НАЕК 160:2020. *Обеспечение технической безопасности. Контроль качества основного металла, сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР. Технические требования.* Киев).
8. ПНАЭ Г-7-008-89. *Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок* (СОУ НАЕК 158:2020. *Обеспечение технической безопасности. Технические требования к устройству и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР, НП 306.2.227-2020. Общие требования безопасности к устройству и эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных станций* вместо ПНАЭ Г-7-008-89, ПНАЭ Г-7-009-89).
 9. ПНАЭ Г-7-009-89. *Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения.*
 10. МТ-34-70-023-86. *Методика ультразвукового контроля аустенитных сварных стыковых соединений с толщиной стенки 10...25 мм в процессе монтажа и эксплуатации атомных станций.*
 11. DSTU EN ISO 17635:2018. *Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Загальні правила для металевих матеріалів* (EN ISO 17635:2016, IDT; ISO 17635:2016, IDT)
 12. Chassignole, B., Guerjouma, R.El., Ploix, M.-A., Fouquet, T. (2010) Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing. *NDT & E International*, 43(4), 273–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.12.005>
 13. МЦУ-7-97. *Методика ультразвукового контроля аустенитных сварных соединений Ø325×15 атомных электростанций с реакторами РБМК.* М., НПО ЦНИИТ-МАШ.
 14. Разыграев Н.П., Разыграев А.Н. (2021) Ультразвуковой контроль головными волнами сварных соединений трубопроводов Ду-300 на Чернобыльской АЭС. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 48–58.
 15. Doctor, S., Jehenson, P. (1988) Description of the PISC III Round Robin Test on Cast Stainless Steel (CCSSRRT) and evaluation of results. *Intern. J. of Pressure Vessels and Piping*, 35(1-4), 3–15 DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(88\)90087-7](https://doi.org/10.1016/0308-0161(88)90087-7)
 16. Anderson, M.T., Diaz, A.A., Cinson, A.D., Crawford, S.L., Cumbledge, S.E., Doctor, S.R., Denslow, K.M., Ahmed, S. (2011) *An assessment of ultrasonic techniques for far-side examinations of austenitic stainless steel piping welds.* NUREG/CR-7113, PNNL-19353, NRC Job Code N6398.
 17. ASTM International (2018) *ASTM E2862 Standard Guide for Probability of Detection Analysis for Hit/Miss Data.*
 18. Department of Defense (2009) *MIL-HDBK-1823A Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment.*
 19. ENIQ (2010) *Recommended Practice 2 – Inspection qualification methodology.*
 20. Uzun, H., Gustiani, D. (2024) Review of phased array ultrasonic testing of weld joints. *J. of Marine and Engineering Technology*, 4(2), 77–92. DOI: <https://doi.org/10.58771/joinmet.1525521>
 21. Kim, Y., Cho, S., Park, I.K. (2021) Analysis of flaw detection sensitivity of phased array ultrasonics in austenitic steel welds according to inspection conditions. *Sensors*, 21(1), 242. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21010242>
 22. Li, C. et al. (2025) Study on phased array ultrasonic testing techniques for austenitic stainless steel butt welds. *J. of Fusion Energy*, 44, 13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10894-025-00475-6>
 23. Kumar, S., Menaka, M., Venkatraman, B. (2021) Performance comparison of phased array transducers for inspection of dissimilar welds on nuclear reactor components. *Annals of Nuclear Energy*, 162, 108482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108482>
 24. Duan, J.X. et al. (2018) Hybrid ultrasonic TOFD imaging of weld flaws. *J. of Nondestructive Evaluation*, 37, 23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0476-2>
 25. Bürchner, T. et al. (2025) Quantitative comparison of the total focusing method, reverse time migration, and full waveform inversion for ultrasonic imaging. *Ultrasonics*, 155, 107705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2025.107705>
 26. ISO 9712 (2021) *Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel.*
 27. EN ISO 17635 (2016) *Non-destructive testing of welds – General rules.* European Committee for Standardization.
 28. РД ЭО 0488-03 (2003) *Методические рекомендации по оценке достоверности средств и методик неразрушающего контроля.* Руководящий документ. М.

References

1. Torop, V.M., Rabkina, M.D., Davydov, Ye.O. (2025) Retrospective look at development of defects in austenitic steel welded joints of Chornobyl NPP. In book: *Welding and related technologies for reconstruction of Ukraine*. Abstr. of Conf. Papers. Ed. by O.T. Zelnichenko. Kyiv, Paton Publishing House, 105–107 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/WRT2025.28>
2. Angeliu, T.M., Andresen, P.L., Sutliff, J.A., Horn, R.M. (1999) Intergranular stress corrosion cracking of unsensitized stainless steel in BWR environments. *Proc. Ninth Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water reactors*, AIME.
3. (1975) *US NRC Pipe Crack Study Group. Investigation and Evaluation of Cracking in Austenitic Stainless Steel Piping of BWR Plants.* NUREG–75/061.
4. GOST 7512-82. *Non-destructive testing. Welded joints. Radiography method* (Cancelled in keeping with order of 25.12.2015, No 209. Cancellation deadline postponed according to order of 24.01.2018 No 15) [in Ukrainian].
5. PNAE G-7-017-89. *Unified procedure for control of the base materials (semi-finished products), welded joints and surfacing in NPP equipment and pipelines.* *Radiografic Kontrol.* Moscow, USSR Gosatomenergondzor [in Russian].
6. PK 1514-72. Rules of control of welded joints and surfacing of components and structures on nuclear power plants, test and research nuclear reactors and plants. Moscow, Energoatomizdat (SOU NAЕК 160:2020. *Ensuring engineering safety. Quality control of base metal, welded joints and surfacing in equipment and piping of nuclear power plants with WWER reactors.* Technical requirements is in effect in Ukraine instead of PK 1514-72 and PNAE G-010-89. *Equipment and piping of nuclear power plants. Rules of control*) [in Russian].
7. PNAE G-010-89. *Equipment and piping of nuclear power plants. Welded joints and surfacing* (SOU NAЕК 160:2020. *Ensuring engineering safety. Quality control of base metal, welded joints and surfacing in equipment and piping of nuclear power plants with WWER reactors. Technical requirements*) [in Russian].
8. PNAE G-7-008-89. Rules for the design and safe service of equipment and piping on nuclear power plants (SOU NAЕК 158:2020. *Ensuring engineering safety. Technical requirements for the design and safe operation of equipment and piping on nuclear power plants with WWER reactors* and NP 306.2.227-2020. *General safety requirements to the design and operation of equipment and piping of nuclear power plants* instead of PNAE G-7-008-89, PNAE G-7-009-89 are in effect in Ukraine) [in Russian].
9. PNAE G-7-009-89. *Equipment and piping of nuclear power plants. Welding and surfacing. Main principles* [in Russian].
10. МТ-34-70-023-86. *Procedure for ultrasonic testing of austenitic welded butt joints with wall thickness of 10-25 mm during nuclear power plant mounting and operation* [in Russian].
11. DSTU ISO 17635:2018 (EN ISO 17635:2016, IDT; ISO 17635:2016, IDT) *Non-destructive testing of welded joints. General rules for metallic materials* [in Ukrainian].
12. Chassignole, B., Guerjouma, R.El., Ploix, M.-A., Fouquet, T. (2010) Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing.

- NDT & E International*, 43(4), 273–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.12.005>
13. MtSU-7-97. *Methods of ultrasonic control of austenitic welded joints Ø325×15 of nuclear power plants with RBMK reactors*. Moscow, NGO TsNIITMASH [in Russian].
 14. Razygraev, N.P., Razygraev, A.N. (2021) Ultrasonic head wave control of welded connections of Du-300 pipelines at Chernobyl nuclear power plant. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 1, 48–58 [in Russian].
 15. Doctor, S., Jehenson, P. (1988) Description of the PISC III Round Robin Test on Cast Stainless Steel (CCSSRRT) and evaluation of results. *Intern. J. of Pressure Vessels and Piping*, 35(1-4), 3–15 DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(88\)90087-7](https://doi.org/10.1016/0308-0161(88)90087-7)
 16. Anderson, M.T., Diaz, A.A., Cinson, A.D., Crawford, S.L., Cumblidge, S.E., Doctor, S.R., Denslow, K.M., Ahmed, S. (2011) *An assessment of ultrasonic techniques for far-side examinations of austenitic stainless steel piping welds*. NUREG/CR-7113, PNNL-19353, NRC Job Code N6398.
 17. ASTM International (2018) *ASTM E2862 Standard Guide for Probability of Detection Analysis for Hit/Miss Data*.
 18. Department of Defense (2009) *MIL-HDBK-1823A Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment*.
 19. ENIQ (2010) *Recommended Practice 2 – Inspection qualification methodology*.
 20. Uzun, H., Gustiani, D. (2024) Review of phased array ultrasonic testing of weld joints. *J. of Marine and Engineering Technology*, 4(2), 77–92. DOI: <https://doi.org/10.58771/joimmet.1525521>
 21. Kim, Y., Cho, S., Park, I.K. (2021) Analysis of flaw detection sensitivity of phased array ultrasonics in austenitic steel welds according to inspection conditions. *Sensors*, 21(1), 242. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21010242>
 22. Li, C., et al. (2025). Study on phased array ultrasonic testing techniques for austenitic stainless steel butt welds. *J. of Fusion Energy*, 44, 13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10894-025-00475-6>
 23. Kumar, S., Menaka, M., Venkatraman, B. (2021) Performance comparison of phased array transducers for inspection of dissimilar welds on nuclear reactor components. *Annals of Nuclear Energy*, 162, 108482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108482>
 24. Duan, J. X., et al. (2018) Hybrid ultrasonic TOFD imaging of weld flaws. *J. of Nondestructive Evaluation*, 37, 23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0476-2>
 25. Büchner, T., et al. (2025) Quantitative comparison of the total focusing method, reverse time migration, and full waveform inversion for ultrasonic imaging. *Ultrasonics*, 155, 107705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2025.107705>
 26. ISO 9712 (2021) *Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel*.
 27. EN ISO 17635 (2016) *Non-destructive testing of welds – General rules*. European Committee for Standardization.
 28. RD EO 0488-03 (2003) *Methodological recommendations for assessing the reliability of means and methods of non-destructive testing. Guidance document*. Moscow [in Russian].

ANALYSIS OF THE RESULTS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF AUSTENITIC WELDED JOINTS OF THE 3TH POWER UNIT OF THE CHORNOBYL NPP

V.M. Torop, Ye.O. Davydov, M.D. Rabkina

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.: v.torop@gmail.com

April 26, 2026 marked the 40th anniversary of the catastrophic explosion, which occurred in the 4th power unit of the Chernobyl NPP (ChNPP). Since then, a colossal amount of diverse work has been carried out to eliminate the consequences of the accident. To support the required level of safety and reliability of pipelines with a diameter of 325 mm (Dn 300) and wall thickness of 16 mm the Chernobyl Power Plant developed a special Program of diagnostic and repair-restoration operations. According to this Program, a considerable scope of radiographic (RT), ultrasonic (UT), penetrant (PT) and visual-measuring testing (VT) of welded joints of Dn 300 pipelines made from 08X18H10T austenitic steel has been performed in the period from 1997 to 2005. Despite the fact that more than 20 years have passed since then, the NDT methods are based on the same physical principles, and practically the same methodological approaches to NDT are used. Therefore, analysis of the results of a large scope of operational control is very useful for understanding the reliability of NDT methods, used in modern daily practice. It should be noted that the work on analysis of the test results was performed as a separate task, and not specifically for evaluation and comparison of NDT methods, so that the analysis presented in the paper is objective, retrospective and unbiased, i.e. it reflects the possible and not the desirable result. Ref. 15, Table. 5, Fig. 17.

Keywords: NDT reliability, austenitic welded joints, radiographic (RT), ultrasonic (UT), penetrant (PT), visual-measuring (VT) testing, actual dimensions of the crack

ORCID

V.M. Torop – <https://orcid.org/0000-0002-8807-9811>, С.О. Давидов – <https://orcid.org/0000-0003-3470-2329>,

М.Д. Рабкіна – <https://orcid.org/0000-0003-3498-0716>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

V.M. Torop

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

E-mail: v.torop@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

Тороп В.М., Давидов С.О., Рабкіна М.Д. (2026) Аналіз результатів неруйнівного контролю аустенітних зварних з'єднань енергоблоку № 3 Чорнобильської АЕС. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 02, 17–35.

DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.03>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 23.03.2026

Отримано у переглянутому вигляді 08.04.2026

Підписано до друку 12.05.2026

Оприлюднено 30.06.2026

ЕТАПИ ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АЕ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ

С.А. Недоска, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, В.В. Долиненко, В.М. Ващенко

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

Проведення контролю якості зварювання безпосередньо під час його виконання дозволяє своєчасно усунути виявлені недоліки. Це скорочує час на виготовлення якісних зварних з'єднань і зменшує матеріальні витрати за рахунок своєчасного внесення корегувань у процес зварювання. Активно використовується з цією метою й метод АЕ. Розробляються різні еталони якісних зварних з'єднань на базі зареєстрованих АЕ сигналів. Такі дослідження проводяться в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Це стає особливо актуальним у період швидкого відновлення та ремонту промислових об'єктів у сучасних умовах, а завданням для фахівців є забезпечення надійного та економічно ефективного виявлення дефектів зварних швів. У статті розглянуто результати першого етапу застосування систем АЕ контролю ЕМА під час процесу електрозварювання з використанням різних режимів налаштування обладнання. Проаналізовано особливості виникнення сигналів АЕ та розподілу їхніх параметрів під час зварювання та охолодження зразків. Визначено необхідні доопрацювання підходів до проведення подальших досліджень, що є необхідними для зміни програмного забезпечення систем АЕ контролю типу ЕМА. Бібліогр. 13, рис. 15.

Ключові слова: електрозварювання, охолодження, АЕ технологія, зварювальний робот

Вступ. Використання методу АЕ для виявлення у процесі електрозварювання дефектів, що розвиваються, стикаються з серйозними складнощами, викликаними температурним впливом і значними шумами. Визначення координат таких дефектів внаслідок багатомодовості сигналів АЕ і не врахування впливу конструктивних особливостей конструкцій дає значні похибки. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки спеціальної методики, перетворювачів АЕ та внесення змін у ПЗ систем АЕ, що дозволять діагностувати конструкції з урахуванням специфіки їхніх форм і розмірів.

Ефективність застосування методу АЕ для оцінки якості електрозварювання визначається, перш за все, можливістю достовірної розшифровки сигналів АЕ, що, у свою чергу, вимагає вирішення двох взаємопов'язаних завдань: виявлення сигналів від дефектів в умовах технологічних перешкод та ідентифікації дефектів і оцінки їхніх параметрів на основі зареєстрованих сигналів [1, 2]. Проведення оцінки якості зварювання (зварного шва) вже на етапі його виконання дозволяє економити час і ресурси за рахунок своєчасного внесення корегувань у процес зварювання.

З метою оперативної оцінки стану промислових виробів (якості виконання технологічних процесів) безпосередньо під час проведення АЕ контролю в сучасних АЕ системах реалізовано різні критерії, які сформульовано на базі обробки великої кількості експериментальних даних. У

системах типу ЕМА обробка даних базується на розпізнаванні образів і реалізовано систему трьох попереджень щодо стану конструкції із визначенням її залишкового ресурсу [3]. Наприклад, у системі MONPAC (MISTRAS Group Acoustic Emission Inspection) [4] використовується метод класифікації АЕ сигналів, заснований на таких параметрах, як «силовий індекс» (severity) та «інтенсивність» (intensity). Є основні та додаткові критерії. До основних відноситься критерій, що враховує емісію протягом витримок тиску, що є особливо важливим, оскільки емісія під час витримок сигналізує про наявність процесів плинності або небезпечність через повзучість або підростання дефектів. Під час витримок шуми заповнення та інші сторонні шуми зазвичай є мінімальними. Також критерій, заснований на швидкості рахунку, є мірою загальної активності. Він є особливо важливим при визначенні широко розповсюджених пошкоджень, таких як сильна корозія або корозійне розтріскування під час навантаження. Критерій, заснований на кількості імпульсів, надає інформацію щодо розміру та небезпечності дефектної зони. Він є особливо важливим для об'єктів, що знаходяться в експлуатації, коли імпульси на рівні нижче за робочий сигналізують про наявність серйозних дефектів. Важливим є й критерій, що враховує високоамплітудні імпульси, які часто супроводжують зростання тріщин. Також підвищення амплітуд імпульсів свідчить про серйозні дефекти структури та часто супроводжує зростання втомних тріщин через початкові дефекти зварювання. Контроль якості під час виконання власне проце-

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

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

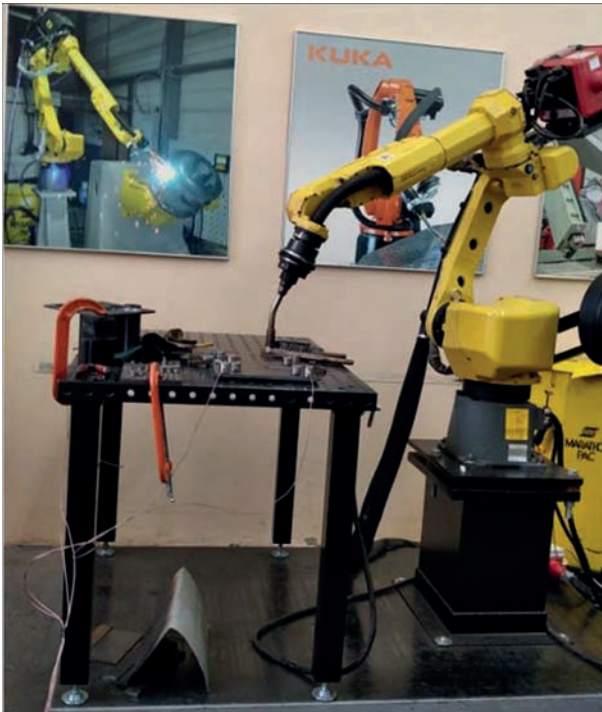


Рис. 1. Обладнання для проведення електрозварювання

су електрозварювання допоможе уникнути цих дефектів. Роботи фахівців показують, що з використанням методу АЕ можна не тільки виявляти дефекти зварного шва у режимі реального часу, але й надати їм оцінку на основі отриманих даних [5–7].

Як показали попередні експериментальні дослідження, за наявності у випробуваних зразках зварного з'єднання воно й є основним джерелом АЕ [8, 9]. Кількість подій АЕ у зразках зі зварним з'єднанням, як правило, перевищує таку ж у суцільних зразках. Процес руйнування зварних зразків вирізняється рівномірнішою за часом активністю АЕ для зразків із найбільшим об'ємом матеріалу зварного з'єднання і менш рівномірною – для зразків із найменшим об'ємом матеріалу зварного з'єднання. Для зразків зі зварними з'єднаннями характерною є більша різноманітність одержуваної картини часового розподілу АЕ, амплітудних та інших характеристик, ніж для зразків без зварювання, що свідчить про вплив якості зварного з'єднання на кількість внесених ним у матеріал пошкоджень.

На підставі проведеного аналізу існуючих рішень у галузі АЕ контролю зварних з'єднань і процесу електрозварювання, а також вивчення характеристик АЕ обладнання, що застосовується для таких досліджень, роботи виконуються з використанням системи технічної діагностики на базі приладу ЕМА-4 [3]. Система має роздільну здатність не менше за 125 нс та кілька ступенів відбракування шумів – аналоговий і цифровий у приладі та програмний, що дає додаткові можливості отримати якісніші результати при випробуваннях. Як ві-

домо, під час роботизованого електрозварювання необхідно контролювати формування таких дефектів як: виникнення пористості, підрізи, включення, надмірна асиметрія кутових швів, непровари, надмірні бризки та несплавлення [2, 10–13].

Метою роботи є відпрацювання технології АЕ контролю та моніторингу під час проведення електрозварювання, що є особливо актуальним на сьогодні з урахуванням необхідності ремонту та відновлення зруйнованого промислового обладнання під час виготовлення, після ремонту або запуску промислових виробів підвищеної безпеки та відповідно до затвердженої наукової роботи «Визначення методом акустичної емісії якості зварних з'єднань у процесі зварювання» (КПКВК 6541030). Роботи проводяться щодо розвитку попередніх досліджень, що виконуються в ІЕЗ ім. Є.О. Патона поетапно.

На першому етапі для відпрацювання методики АЕ контролю якості процесу електрозварювання (наплавлення) використовували зварювальний робот, що працює у різних режимах, і зразок – металеву пластину зі сталі 09Г2С розміром 275×307×10 мм із вже наявним зварним швом приблизно посередині зразка (рис. 1). Для визначення акустичних властивостей матеріалу, а саме: швидкості та коефіцієнтів загасання хвиль, імпедансу матеріалу, параметрів об'єкта як акустичного каналу та АЕ параметрів проведено попереднє АЕ дослідження на вибраному зразку (без навантаження).

Для успішного проведення досліджень в умовах підвищених температур із урахуванням особливостей процесу електрозварювання значна увага приділяється датчикам АЕ, оскільки вони є одними з основних елементів технічних засобів АЕ контролю, визначають чутливість контролю та робочий частотний діапазон. Проведено перевірку роботи та визначено оптимальні характеристики розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона датчиків АЕ, зокрема встановлено, що датчики є температурно-стабільними у діапазоні температур, які можуть досягатися при проведенні експерименту, а коефіцієнт електроакустичного перетворення не змінюється більш ніж на 3 дБ у цьому діапазоні температур. Датчики закріплювались на поверхні зразка з використанням магнітного тримача, що дозволяє швидко та надійно забезпечити встановлення та фіксацію датчика на об'єкті дослідження, та з використанням спеціально розробленого електроізоляційного покриття на протектор (на місця контакту) датчиків із нагрітою пластиною (зразком). Результати проведених досліджень характеристик різних варіантів датчиків АЕ та їхній вплив на точність і результативність

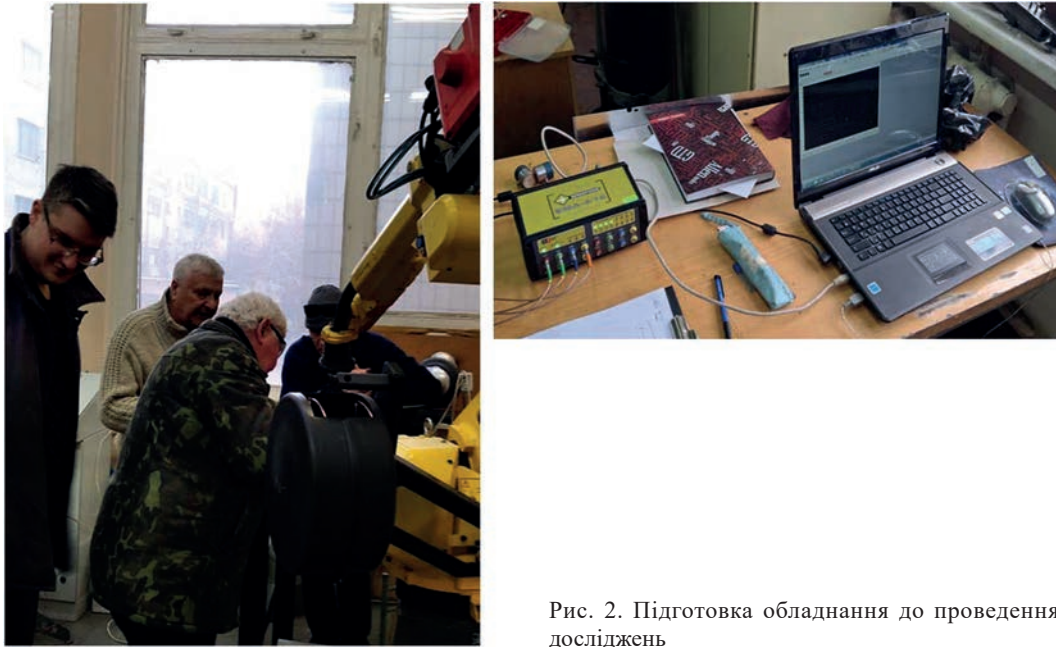


Рис. 2. Підготовка обладнання до проведення досліджень

досліджень будуть наведені в окремій статті. Проведені попередні дослідження показали, що датчики з магнітним тримачем і датчики з нанесеним спеціальним покриттям для роботи в умовах підвищених температур стабільно приймали всі сигнали АЕ від імітаторів, у якості яких виступали як самі датчики АЕ, так і стандартні імітатори сигналів АЕ.

Для отримання максимально повної інформації під час електрозварювання на поверхні зразка встановлювали чотири датчики АЕ результатів експериментів і використовували два варіанти програмного забезпечення (ПЗ) системи ЕМА, які відрізняються деякими можливостями аналізу отриманих даних. Так, розширеніший варіант ПЗ дозволяє в режимі реального часу отримати прогноз щодо стану контрольованого об'єкта та провести оцінку залишкового ресурсу конструкцій, а також дослідити зміни розподілу параметрів акустичної емісії [2, 11, 13].

АЕ дослідження (контроль) проводили як безпосередньо під час виконання процесу електродугового зварювання (наплавлення), так і під час подальшого охолодження зразка.

Електрозварювання проводилось у двох режимах: MIG/MAG та MIGPMС (газ – чистий Ar 100 %). Підготовку обладнання до проведення досліджень та узгодження порядку проведення робіт наведено на рис. 2.

На першому етапі реєстрація АЕ інформації як під час самого процесу наплавлення, так і під час охолодження зварного шва (зразка) проводилась із використанням датчиків із магнітними тримачами (виконувалось наплавлення від правого краю зраз-

ка в напрямку центра – від датчиків №№ 3, 4 у напрямку датчиків №№ 1, 2).

Для відпрацювання технології АЕ контролю процес наплавлення виконувався кілька разів для перевірки зміни температури на різних відстанях від електрода робота та якості реєстрації датчиками АЕ інформації з об'єкта. Проводилось також визначення налаштувальних параметрів системи з використанням режиму автоматичного визначення рівня амплітудної дискримінації, швидкості розповсюдження сигналів у пластині, цифрових та аналогових фільтрів, додаткових математичних фільтрів.

Проведене вимірювання температури поверхні зразка під час пробних запусків робота показало, що процес наплавлення є короткотерміновим, у декілька секунд, і не призводить до підвищення температури самої пластини у місцях встановлення датчиків АЕ. Це гарантує стабільну роботу датчиків протягом усього процесу наплавлення (рис. 3).

На екрані АЕ системи ЕМА-4 фахівці відстежували появу подій АЕ та переміщення електрода робота під час виконання електрозварювання (наплавлення) (рис. 4). Результати експерименту детальніше вивчали після закінчення процесу електрозварювання з використанням режиму післяекспериментальної обробки інформації.

Детальнішу характеристику отриманої інформації наведено на нижче на рис. 5, 6. За результатами попередньої обробки найінформативнішими визнали графіки надходження в часі сумарної кількості зареєстрованих АЕ подій і зміни значення параметра Counts (рахунок імпульсів або кількість перевищень порога) – це базовий кількісний параметр сигналу, що дорівнює числу разів, коли амплітуда

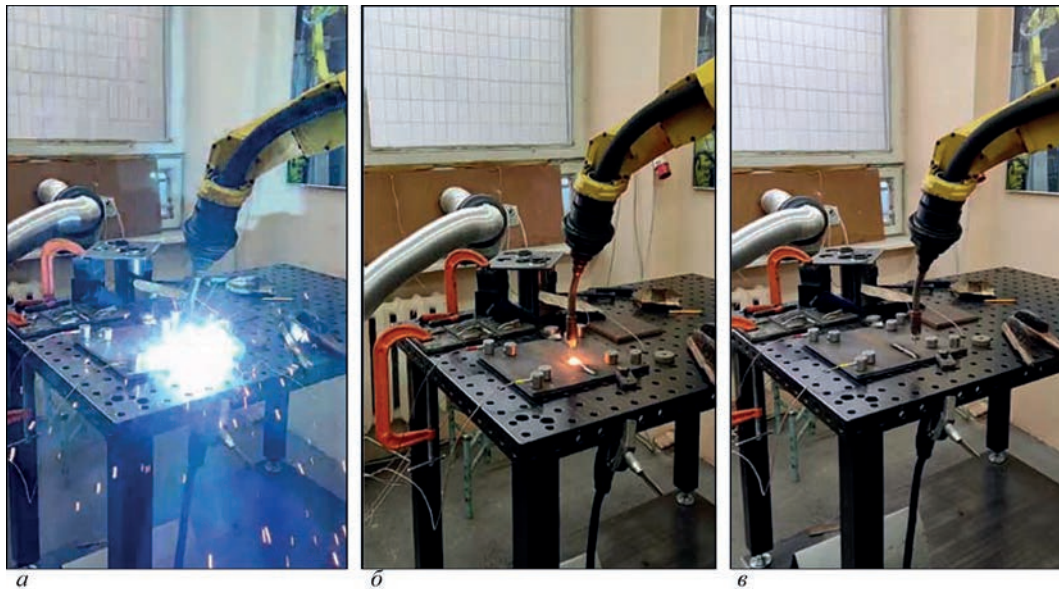


Рис. 3. Етапи проведення наплавлення під час досліджень (на фото підключені датчики АЕ з магнітним тримачем)

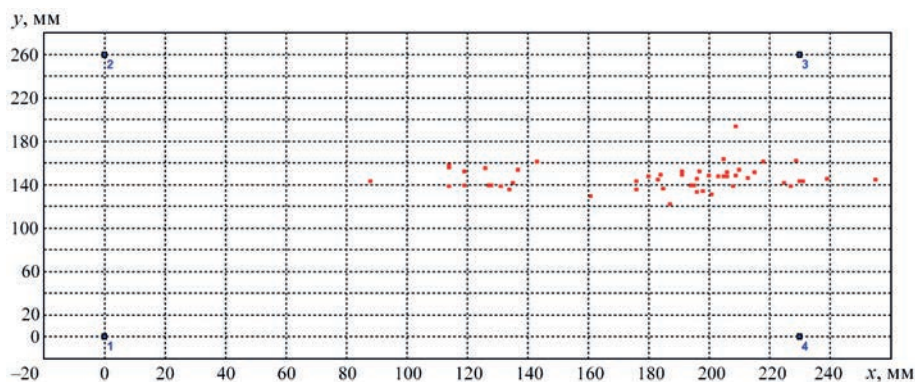


Рис. 4. Надходження АЕ інформації під час першого експерименту

сигналу АЕ перевищила встановлений пороговий рівень за час вимірювання; параметра Rise time (час наростання) – це часовий інтервал, що вимірюється від першого перевищення сигналом порогового рівня (початок сигналу) до досягнення максимальної амплітуди імпульсу; амплітуди зареєстрованих сигналів і рівня шуму по каналах.

Із графіка (рис. 5) видно, що сумарна кількість подій АЕ швидко зростає під час власне процесу електрозварювання, а також зазначається збіль-

шення кількості подій на деяких етапах охолодження зразка, що потребує збільшення часу контролю після завершення процесу зварювання та детальнішого дослідження окремих часових і температурних інтервалів.

Як видно з графіка (рис. 6), амплітуда сигналів АЕ є найбільшою безпосередньо під час процесу електрозварювання та досягає значних величин. Проте співвідношення сигнал/шум дозволяє формувати події АЕ.

Зареєстровані події АЕ під час повторного проходження робота (тим же шляхом) та відповідні графічні залежності наведено на рис. 7–9. Також збільшено час витримки після виконання власне наплавлення для оцінки сигналів АЕ, що продовжують надходити під час охолодження зразка. Графічні залежності побудовано для параметрів аналогічно до рис. 5, 6.

Аналіз отриманої інформації показав, що у процесі проведення наплавлення сигнали АЕ синхронно надходили до приладу АЕ та відображалися на екрані монітора системи у відповідності до переміщення пальника зварювального робота. Під

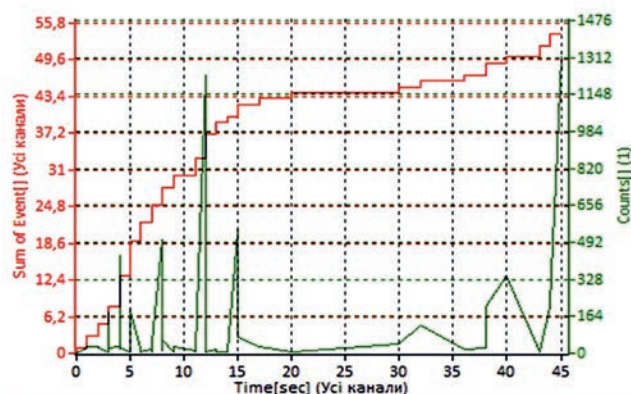


Рис. 5. Сумарна кількість зареєстрованих подій АЕ та зміна параметра Counts

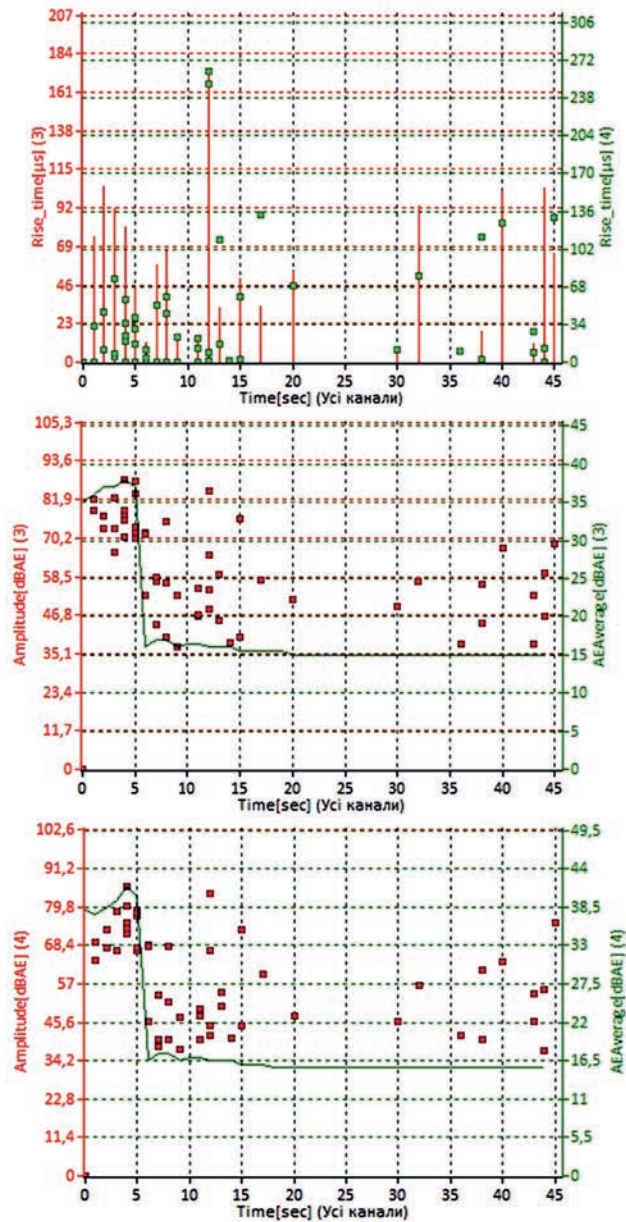


Рис. 6. Значення параметра Rise time та амплітуди сигналів АЕ та рівень неперервної емісії (для датчиків №№ 3, 4)

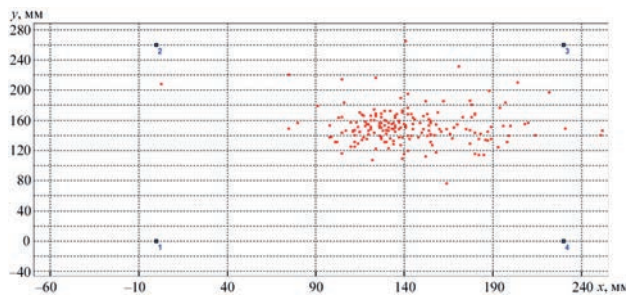


Рис. 7. Надходження АЕ інформації під час другого експеримента

час виконання власне наплавлення реєструвалася основна частина сигналів із високою амплітудою та визначались місця реєстрації (координати) цих сигналів. Також зазначено й надходження АЕ ін-

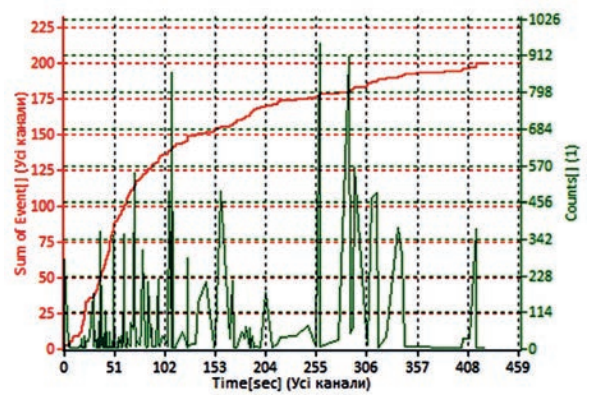


Рис. 8. Сумарна кількість зареєстрованих подій АЕ та зміна параметра Counts

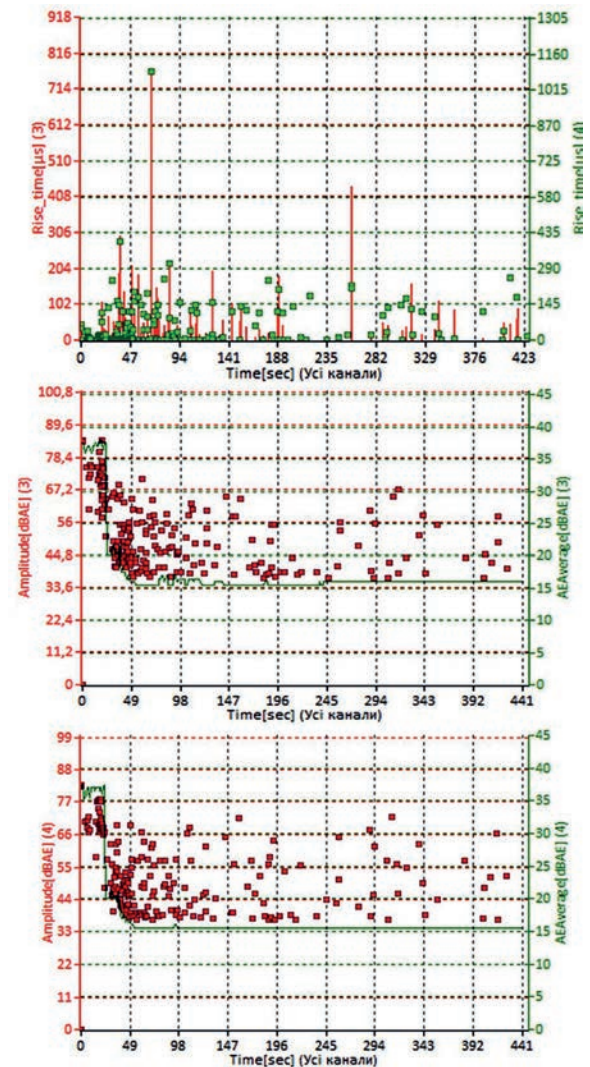


Рис. 9. Значення параметра Rise time та амплітуди сигналів АЕ та рівень неперервної емісії (для датчиків №№ 1, 2)

формації після закінчення процесу наплавлення – у процесі охолодження зразка.

Для подальшого відпрацювання методики проведення АЕ контролю якості зварювання реєстрація АЕ інформації як під час самого процесу наплавлення, так і під час охолодження зварного шва (зразка) проводилось із використанням датчиків зі

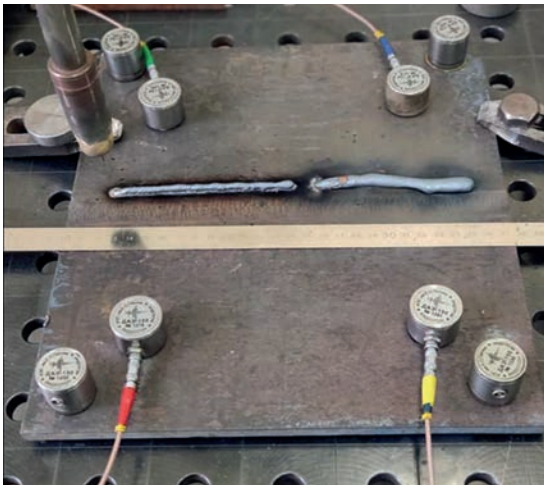


Рис. 10. Розміщення датчиків АЕ на зразку (підключені кабелями датчики – зі спеціальним покриттям; не підключені – на магнітах)

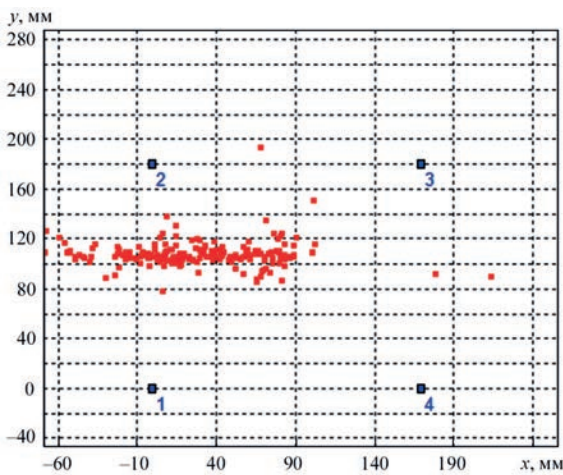


Рис. 11. Надходження АЕ інформації під час першого експерименту

спеціальним покриттям. Виконувалось наплавлення від центру до лівого краю зразка – у напрямку датчиків №№ 1, 2 (рис. 10). Отримані результати наведено на рис. 11–13.

Наплавлення в цьому випадку також виконували у кілька проходів із метою уточнення параметрів налаштування приладу та ПЗ, синхронності реєстрації АЕ інформації приладом АЕ та її відображення на екрані монітора. Результати одного з проходів наведено на рис. 14, 15.

Таким чином, під час проведення електрозварювання (наплавлення) була відпрацьована методика проведення АЕ досліджень, визначено вплив зміни налаштування системи АЕ, а саме, встановлення значень порогів по каналах АЕ з використанням режиму їхнього автоматичного визначення та перехід із аналогових до цифрових фільтрів, що дозволило підвищити точність визначення місць виникнення сигналів АЕ.

На підставі аналізу результатів проведених експериментальних досліджень були виконані та запропоновані наступні роботи: доопрацьовано та

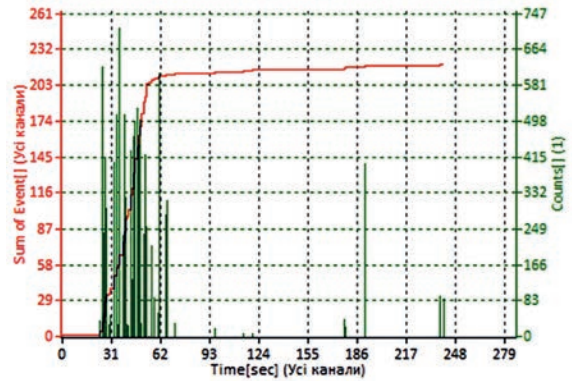


Рис. 12. Сумарна кількість зареєстрованих подій АЕ та зміна параметра Counts

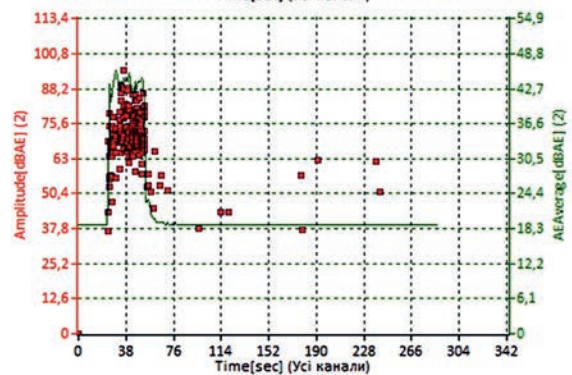
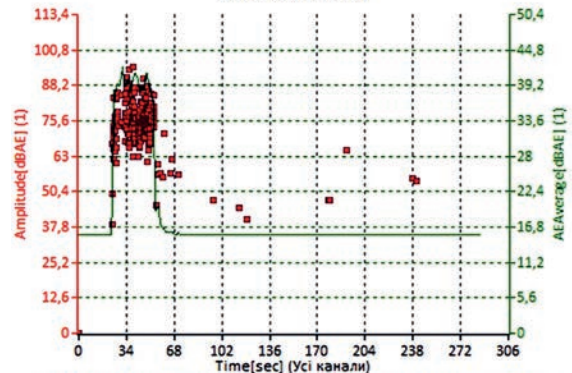
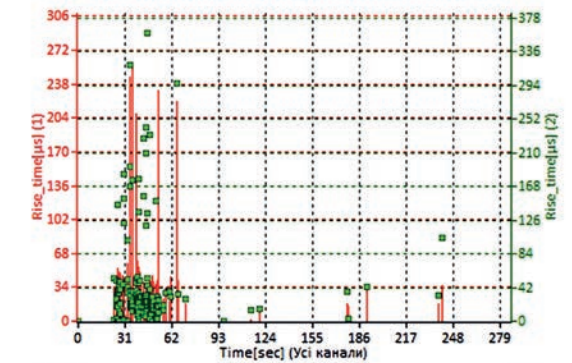


Рис. 13. Значення параметра Rise time та амплітуди сигналів АЕ та рівень неперервної емісії (для датчиків №№ 1, 2)

перевірено для контролю якості зварювальних процесів окремі елементи АЕ обладнання, математичне забезпечення системи, датчики АЕ; проведено їхню повірку, калібрування, виміряно АЧХ. Детальніше вивчено особливості зварювально-

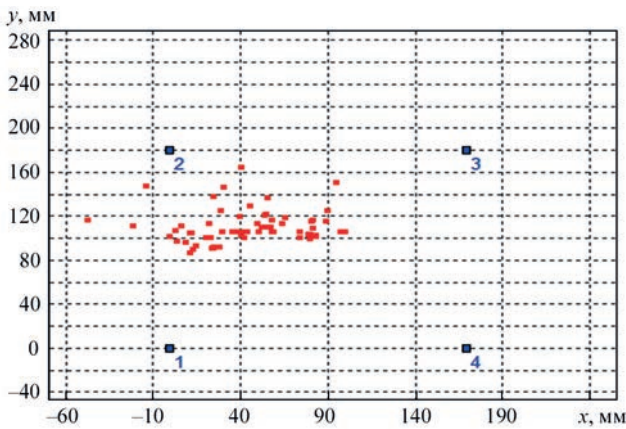


Рис. 14. Надходження АЕ інформації під час другого експерименту

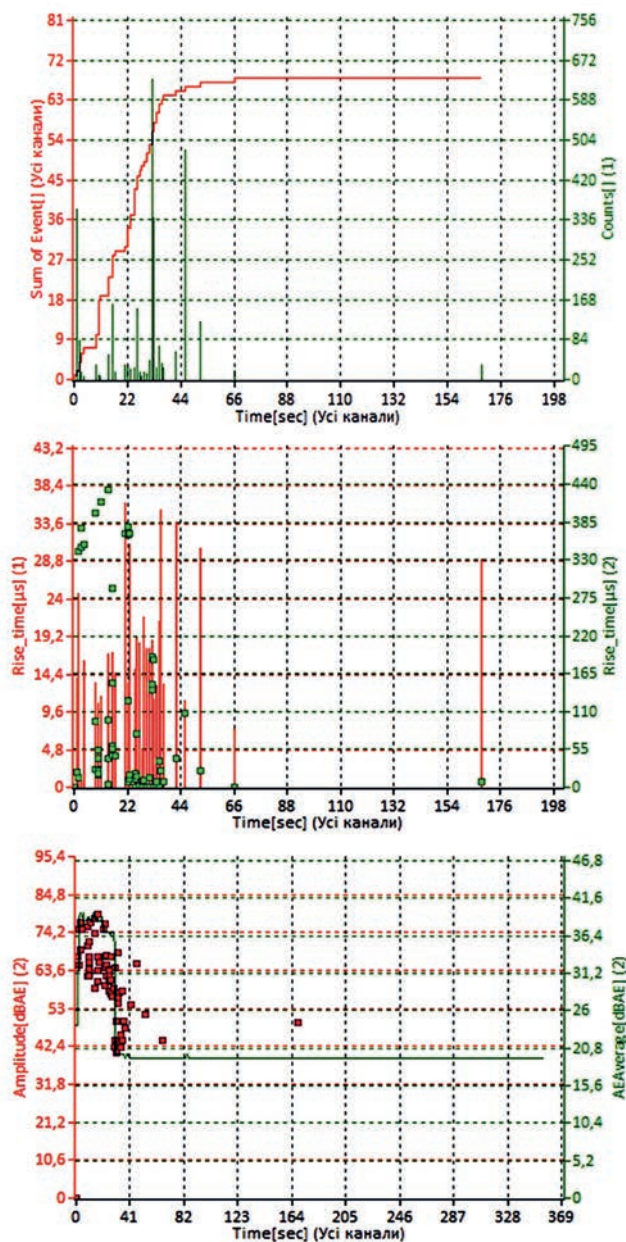


Рис. 15. Графічне представлення отриманих результатів під час другого експерименту

го обладнання, зокрема приладів роботизованого зварювання, наявних у відділі. Запропоновано конструкцію зразка для досліджень із урахуванням наявності зони високої температури, у якій розташування датчиків АЕ є небажаним. Визначено спосіб проведення подальших АЕ досліджень і параметри зварювального процесу, запропоновано початкові налаштування АЕ приладів.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження показали, що вся інформація, отримана під час виконання зварювання, була коректно прийнята датчиками АЕ та передана на блок приймання та обробки системи АЕ. Під час контролю процесу охолодження зразка також надходила АЕ інформація та формувались окремі події АЕ. Координати сформованих АЕ подій відображались на екрані монітора системи ЕМА в реальному часі.

Виконані роботи показали високу ймовірність отримання принципово нових результатів для вивчення особливостей зварювальних процесів методом АЕ, а також доцільність продовження розпочатих досліджень.

Список літератури

1. Андрейків О.Є., Скальський В.Р., Сулим Г.Т. (2007) *Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування*. Львів, Сполом.
2. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А., Овсієнко М.А. та ін. (2019) Особливості АЕ діагностики. *Технологія, апаратура, алгоритми. Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 3–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2019.01.01>
3. Недосека С.А., Яременко М.А., Овсієнко М.А., Долиненко В.В., Гур'янов О.М. (2025) Оцінка якості зварних з'єднань із використанням методу АЕ. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15434/tdnk2025.04.03>
4. <https://www.mistrasgroup.com/field-services/acoustic-diagnostics/monpac>
5. <https://bil-ibs.be/en/project/soundweld-quality-inspection-using-acoustic-emission-monitoring>
6. Soundararajan, V., Atharifar, H., Kovacevic, R. (2006) Monitoring and processing the acoustic emission signals from the friction-stir-welding process. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Pt B: J. of Engineering Manufacture*, 220(10). DOI: <https://doi.org/10.1243/09544054JEM586>
7. Qiang Zhu, Zaile Huang, Huan Li (2026) Research progress of acoustic monitoring technology in welding and additive manufacturing processes. *Micromachines*, 17(2), 246. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi17020246>
8. Троицкий В.А. (2006) *Краткое пособие по контролю качества сварных соединений*. Киев, Феникс.
9. Иванов В.И., Белов В.М. (1981) *Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений*. М., Машиностроение.
10. Abdul Kadir, M.H., Asmelash, M., Azhari, A. (2020) Investigation on welding distortion en stainless steel sheet using gas tungsten arc welding process. *Materials Today: Proceedings*, 46(4), 1674–1679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.264>
11. Asif, K., Zhang, L., Derrible, S. et al. (2022) Machine learning model to predict welding quality using air-coupled acoustic emission and weld inputs. *J. of Intelligent Manufacturing*, 33, 881–895. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01667-x>
12. Yusof, M.F.M., Ishak, M., Ghazali, M.F. (2021) Acoustic methods in real-time welding process monitoring: Application and future potential advancement. *J. Mech. Eng. Sci.*, 15(4), 8490–8507. DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.15.4.2021.03.0669>

13. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А., Овсієнко М.А. та ін. (2022) Оцінка можливості застосування зміни розподілу параметрів акустичної емісії для удосконалення визначення стану матеріалів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 31–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.03>

References

1. Andreykiv, O.E., Skalskyi, V.R., Sulym, G.T. (2007) *Theoretical foundations of the acoustic emission method in fracture mechanics*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
 2. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A., Boichuk, O.I., Voloshkevich, I.G. (2019) Features of AE diagnostics. Technology, instrumentation and algorithms. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **1**, 3–12 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2019.01.01>
 3. Nedosiaka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A., Dolynenko, V.V., Hurianov O.M. (2025) Assessment of the quality of welded joints using the AE method. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **4**, 25–29 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.04.03>
 4. <https://www.mistrasgroup.com/field-services/acoustic-diagnostics/monpac>
 5. <https://bil-ibs.be/en/project/soundweld-quality-inspection-using-acoustic-emission-monitoring>
 6. Soundararajan, V., Atharifar, H., Kovacevic, R. (2006) Monitoring and processing the acoustic emission signals from the friction-stir-welding process. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Pt B: J. of Engineering Manufacture*, **220(10)**. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544054JEM586>

7. Qiang Zhu, Zaile Huang, Huan Li (2026) Research progress of acoustic monitoring technology in welding and additive manufacturing processes. *Micromachines*, **17(2)**, 246. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi17020246>
 8. Troitsky, V.A. (2006) *Brief guide to quality control of welded joints*. Kyiv, Phoenix [in Russian].
 9. Ivanov, V.I., Belovm V.M. (1981) *Acoustic emission testing of welding and welded joints*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 10. Abdul Kadir, M.H., Asmelash, M., Azhari, A. (2020) Investigation on welding distortion en stainless steel sheet using gas tungsten arc welding process. *Materials Today: Proceedings*, **46(4)**, 1674–1679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.264>
 11. Asif, K., Zhang, L., Derrible, S. et al. (2022) Machine learning model to predict welding quality using air-coupled acoustic emission and weld inputs. *J. of Intelligent Manufacturing*, **33**, 881–895. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01667-x>
 12. Yusof, M.F.M., Ishak, M., Ghazali, M.F. (2021) Acoustic methods in real-time welding process monitoring: Application and future potential advancement. *J. Mech. Eng. Sci.*, **15(4)**, 8490–8507. DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.15.4.2021.03.0669>
 13. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A., Boichuk, O.I., Ovsienko, M.A. (2022) Evaluation of the possibility of applying a change in the distribution of acoustic emission parameters to improve determination of material state. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **1**, 31–38 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.03>

STAGES OF DEVELOPMENT OF AE CONTROL TECHNOLOGY FOR WELDING PROCESSES

S.A. Nedosiaka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko, V.V. Dolynenko, V.M. Vashchenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
 E-mail: inpat59@ukr.net

Carrying out quality control of welding directly during its performance allows timely elimination of identified deficiencies. This shortens the time for making quality welded joints and reduces material costs by making timely adjustments to the welding process. The AE method is also actively used for these purposes. Various standards of high-quality welded joints are being developed based on registered AE signals. Such studies are also conducted at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. This becomes particularly relevant in a period of rapid rehabilitation and repair of industrial sites in modern conditions, and the challenge for professionals is to ensure reliable and cost-effective detection of weld defects. The article examines the results of the first stage of the application of AE systems EMA during the electric welding process using different equipment adjustment modes. The peculiarities of the occurrence of AE signals and the distribution of their parameters during welding and cooling of samples are analyzed. Necessary refinements of approaches to further research have been determined, and changes to the software of AE systems EMA are necessary. 13 Ref., 15 Fig.

Keywords: electric welding, cooling, AE technology, welding robot

ORCID

Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>, Долиненко В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8001-1337>, Ващенко В.М. – <https://orcid.org/0009-0008-1476-3689>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

Яременко М.А.

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

E-mail: inpat59@ukr.net

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.А. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, В.В. Долиненко, В.М. Ващенко (2026) Етапи відпрацювання технології АЕ контролю процесів зварювання. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **02**, 36–43. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.04>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 04.05.2026

Отримано у переглянутому вигляді 29.05.2026

Підписано до друку 08.06.2026

Оприлюднено 30.06.2026

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ БАГАТОЗОНАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ КОНДИЦІОНУВАННЯ ЗІ ЗМІННИМ ПОТОКОМ ХОЛОДОАГЕНТУ

М.І. Мазуренко, Ю.Ю. Лисенко

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

У роботі розроблено дискретну просторово-часову математичну модель керування багатозональною системою кондиціювання зі змінним потоком холодоагенту (VRF-системою) з урахуванням зовнішніх теплових збурень, сонячних надходжень і теплопередачі через огорожувальні конструкції будівлі. Побудовано модель простору станів, що описує динаміку температур у двох незалежних зонах. Запропоновано структуру керування на основі балансу теплових потоків із логікою перемикавання між режимами нагріву та охолодження. Сформульовано квадратичний функціонал якості, що мінімізує відхилення температур від заданих значень і витрати енергії на керування. Проведено числове моделювання на основі погодинних кліматичних даних, за результатами якого температури у приміщеннях підтримуються в межах $\pm 0,5$ °C від встановлених і розраховане річне електроспоживання для забезпечення таких умов. Запропонована модель може слугувати основою для розробки систем прогнозуючого керування мікрокліматом в енергоефективних будівлях. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: VRF-система, керування, математична модель, тепловий баланс, багатозональне кондиціювання, оптимальне керування, енергоефективність

Вступ. Системи кондиціювання зі змінним потоком холодоагенту (VRF – Variable Refrigerant Flow) набули широкого застосування в будівлях різного призначення завдяки можливості незалежного регулювання температури в декількох зонах і високій енергоефективності [1]. На відміну від традиційних систем із постійною витратою холодоагенту, VRF-системи дозволяють адаптувати теплову потужність до поточного навантаження кожної зони, що суттєво знижує споживання електроенергії протягом опалювального та неопалювального сезонів.

Ефективність роботи VRF-систем значною мірою залежить від алгоритмів керування, які повинні враховувати: зовнішні кліматичні умови, теплові втрати через огорожувальні конструкції (стіни/вікна), внутрішні теплові надходження та змінні режими експлуатації [2, 3]. Останні дослідження за темою зосереджені на застосуванні різних підходів до моделювання та керування кліматичними системами. Проте більшість відомих моделей не враховують явно взаємний тепловий вплив між зонами та часто обмежуються однозонними схемами без урахування теплового балансу будівлі в контурі керування VRF-обладнанням [1, 2].

У зв'язку з цим актуальною є задача побудови математичних моделей керування, які адекватно описують динаміку температурних процесів у будівлях і дозволяють визначати оптимальне керування з метою мінімізації енергоспоживання.

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

Метою роботи є розробка математичної моделі багатозональної VRF-системи та визначення підходу до керування, що забезпечує підтримання заданих температурних режимів при мінімізації енергоспоживання.

Для досягнення мети запропоновано такі завдання: побудова теплового балансу кожної зони з урахуванням взаємного теплообміну між зонами та із зовнішнім середовищем; визначення закону керування на основі логіки перемикавання режимів нагріву/охолодження; формулювання квадратичного функціоналу якості та оцінка ефективності керування; моделювання з використанням реальних кліматичних даних для м. Києва за 2023 р. Особливістю запропонованого підходу є врахування зовнішніх збурень у вигляді температури навколишнього середовища, теплових втрат через конструкції будівлі та сонячних надходжень.

Опис об'єкта керування. З метою аналізу розглянуто систему, що містить дві незалежні кімнати двоповерхового будинку з теплообміном через внутрішню стіну з іншими кімнатами та з навколишнім середовищем. План кімнат наведено на рис. 1.

У розрахунках прийнято, що вікна та двері зачинені та в кожній з кімнат встановлено по одному обігрівачу (кондиціонеру). Керуючими впливами є теплові потоки в кімнаті. Фізичні характеристики системи керування зведені в таблиці. Розглядається система, що складається з двох теплових зон із температурами T_1 і T_2 . Динаміка температур у кожній зоні описується на основі теплового балансу [2, 4]:

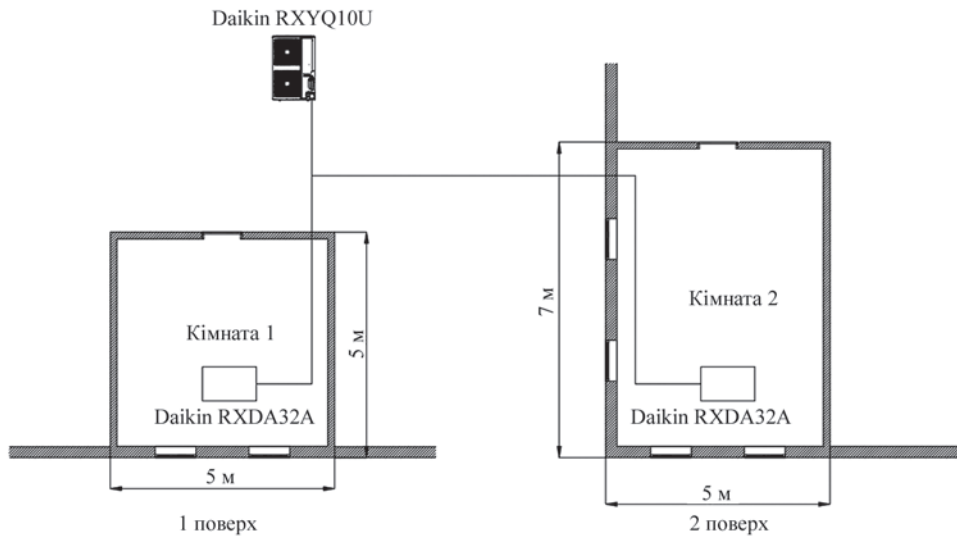


Рис. 1. План приміщень будинку із зазначенням теплообмінних поверхонь

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = Q_{sol,i} - Q_{los,i}(k) + Q_{VRF,i}(k), \quad (1)$$

де $Q_{sol,i}$ – зовнішні надходження, $Q_{los,i}(k)$ – теплові втрати, $Q_{VRF,i}(k)$ – вплив VRF-системи.

Теплові втрати моделюються через коефіцієнти теплопередачі, що містять втрати через стіни, вікна, дах і підлогу, а також теплообмін із суміжними зонами та зовнішнім середовищем [4]:

$$Q_{los,i}(k) = K1_i(T_i - T_{out}(k)) + K2_i(T_i - T_{bld}), \quad (2)$$

де $K1$ – сумарний коефіцієнт теплопередачі для поверхні, через яку відбувається теплообмін назовні;

$$K1_i = U_{wall_in,i}S_{wall_out,i} + U_{win,i}S_{win,i} + U_{roof,2}S_{roof,2} + U_{floor,1}S_{floor,1}, \quad (3)$$

$K2$ – сумарний коефіцієнт теплопередачі для поверхні, через яку відбувається теплообмін у середині будинку.

$$K2_i = U_{wall_in,i}S_{wall_in,i} + U_{floor,2}S_{floor,2} + U_{roof,1}S_{roof,1}, \quad (4)$$

Зовнішні надходження розраховують за формулою:

$$Q_{sol,i} = q_{win,i}S_{win,i}n_{win,i}. \quad (5)$$

Математична модель і структура керування.

На основі безперервної моделі було виконано дискретизацію з кроком часу, що відповідає одній годині, $\Delta t = 3600$ °C. У результаті отримано дискретну модель стану в просторі станів, яка має вигляд [6]:

$$x_{k+1} = A_d x(k) + B_d u(k) + E_d w(k), \quad (6)$$

де $x(k)$ – вектор станів, що містить температури зон:

$$x(k) = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$u(k)$ – вектор керуючих впливів системи кондиціонування:

$$u(k) = \begin{bmatrix} Q_{VRF,1}(k) \\ Q_{VRF,2}(k) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Керування системою реалізовано на основі логіки перемикання між режимами нагріву та охолодження залежно від відхилення температури від заданих значень. Логіка перемикання побудована на простому порівнянні фактичної температури в кожній зоні з уставкою. Якщо температура перевищує задане значення, то для відповідної зони активується охолодження, і керуючий вплив визначається як від’ємний тепловий потік. Якщо ж температура нижча за уставку, система переходить у режим нагріву та формується позитивний тепловий потік. Таким чином, кожен елемент вектора керування $u(k)$ безпосередньо залежить від знаку відхилення температури від уставки [7]:

$$Q_{VRF,i}(k) = \begin{cases} -Q_{cool,i}t_{work.c,i}(k), & T_i > T_{set} \\ Q_{heat,i}t_{work.h,i}(k), & T_i < T_{set} \end{cases}. \quad (9)$$

Величина керуючого впливу визначається через коефіцієнт завантаження системи, який розраховується на основі співвідношення між тепловими втратами та можливостями системи кондиціонування. Таким чином, керування має адаптивний характер і змінюється в часі залежно від поточного теплового стану будівлі:

$$t_{work.c,i}(k) = \frac{Q_{sol,i} - Q_{los,i}(k)}{Q_{cool,i}}, \quad (10)$$

$$t_{work.h,i}(k) = \frac{Q_{los,i}(k) - Q_{sol,i}}{Q_{cool,i}},$$

Вектор зовнішніх збурень $w(k)$ враховує:

Фізичні характеристики системи

Позначення змінної	Опис змінної	Значення змінної	
		Кімната 1	Кімната 2
$U_{wall_in,i}$	Коефіцієнт теплопередачі для внутрішніх стін	1,5	
$U_{wall_out,i}$	Коефіцієнт теплопередачі для зовнішніх стін	0,3	
$U_{floor,i}$	Коефіцієнт теплопередачі для підлоги	0,4	0,3
$U_{roof,i}$	Коефіцієнт теплопередачі для стелі/даху	0,3	0,25
$U_{win,i}$	Коефіцієнт теплопередачі для вікон	1,1	
$q_{win,i}$	Коефіцієнт теплопритоку для вікон	0,6	
$n_{win,i}$	Кількість вікон	2	4
T_i	Задана температура для системи, °C	21	23
T_{out}	Температура навколишнього середовища	Погодинний графік температур для м. Києва [5]	
T_{bld}	Температура суміжних приміщень, з якими відбувається теплообмін, °C	18	
$Q_{heat,i}$	Потужність нагріву внутрішнього блоку (теплова енергія), Вт	4000	
$Q_{cool,i}$	Потужність охолодження внутрішнього блоку (теплова енергія), Вт	3600	
SEER	Сезонний показник енергоефективності теплового насоса при охолодженні	6,8	
SCOP	Сезонний показник енергоефективності теплового насоса при нагріванні	4,3	
$S_{wall_in,i}$	Площа внутрішніх стін, м ²	45	36
$S_{wall_out,i}$	Площа зовнішніх стін, м ²	12,4	30,8
$S_{floor,i}$	Площа підлоги, м ²	25	35
$S_{roof,i}$	Площа стелі/даху, м ²	25	35
$S_{win,i}$	Площа вікна, м ²	1,3	1,3
C_i	Теплоємність повітря в кімнаті, Дж/кг	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$

$$w(k) = \begin{bmatrix} T_1 - T_{out}(k) \\ T_2 - T_{out}(k) \\ Q_{sol,1} \\ Q_{sol,2} \\ T_1 - T_{bld} \\ T_2 - T_{bld} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{C_2} \end{bmatrix}; \quad (13)$$

вплив зовнішніх факторів на систему відображає матриця E_d :

$$E_d = \begin{bmatrix} \frac{-K_1 \Delta t}{C_1} & 0 & \frac{\Delta t}{C_1} & 0 & \frac{-K_2 \Delta t}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{-K_1 \Delta t}{C_2} & 0 & \frac{\Delta t}{C_2} & 0 & \frac{-K_2 \Delta t}{C_2} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Внутрішню динаміку системи відображає матриця A_d :

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 - \frac{K_1 \Delta t}{C_1} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{K_2 \Delta t}{C_2} \end{bmatrix}; \quad (12)$$

вплив керування на систему відображає матриця B_d :

Така форма моделі є зручною для подальшого застосування методів оптимального керування та аналізу стійкості.

Результати моделювання. На рис. 2 наведено результати моделювання температур у зонах із урахуванням роботи системи керування. Графіки відо-

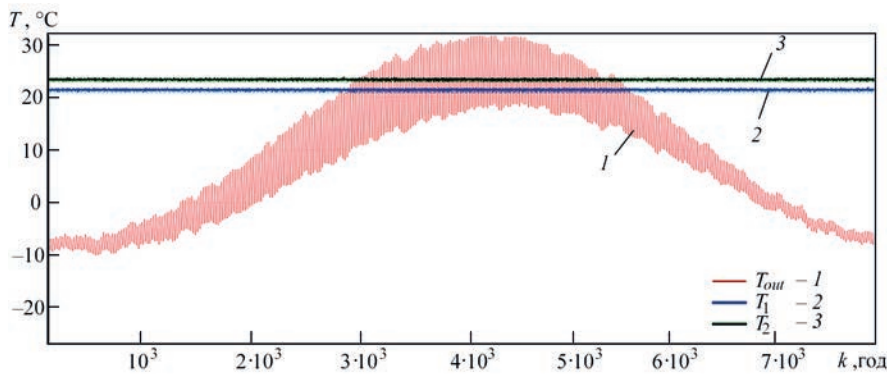


Рис. 2. Результати моделювання процесів термостабілізації у приміщеннях: 1 – зовнішня, 2 – кімната 1, 3 – кімната 2

бражують зміну температур у приміщеннях у часі під впливом як внутрішньої динаміки системи, так і керуючих впливів. З отриманих результатів видно, що температури в обох зонах підтримуються на заданому рівні. Це свідчить про ефективність реалізованого алгоритму керування, який компенсує теплові втрати та вплив зовнішніх збурень.

З метою оцінки точності керування визначено середньоквадратичну похибку відхилення температури від заданого значення для кожної зони окремо, яка за результатами річного моделювання склала 0,18 °C для першої кімнати та 0,22 °C для другої кімнати. Максимальне відхилення температури від встановленої в обох зонах не перевищує ±0,5 °C протягом усього року, що підтверджує достатню точність запропонованого алгоритму керування. Отримані значення похибок є прийнятними для задач підтримання теплового комфорту в будівлях відповідно до вимог стандарту [8].

Оцінку адекватності моделі, включаючи кількісне порівняння з експериментальними вимірюваннями реальних температурних режимів та енергоспоживання, буде проведено на етапі експериментальних досліджень.

Оптимальність у даній роботі визначається в рамках задачі мінімізації функціоналу якості, який має квадратичну структуру та враховує як точність підтримання температури, так і витрати енергії на керування. Оптимальне керування визначається як мінімум цього функціоналу на заданому часовому інтервалі [9]. У даній роботі функціонал якості застосовується як критерій оцінки ефективності роботи системи. Керування реалізовано на основі логіки перемикання між режимами нагріву та охолодження, тоді як функціонал J дозволяє кількісно оцінити якість такого керування:

$$J(k) = \sum_{k=0}^N ((x_{k+1} - x(k))^T Q (x_{k+1} - x(k)) + u(k)^T R u(k)) \quad (15)$$

Матриці Q та R у функціоналі якості (15) мають різні ролі та відображають пріоритети системи керування.

Матриця Q – це одинична матриця, яка однаково зважає відхилення температури (або інших станів системи) від заданих значень:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матриця R є ваговою матрицею витрат на керування. Оскільки в системі енергія вимірюється у Вт, а температура в °C, то для нормалізації масштабів приймаємо для матриці R наступні значення:

$$R = \begin{bmatrix} 0,0001 & 0 \\ 0 & 0,0001 \end{bmatrix}.$$

Рис. 3 показує, що значення функціоналу має коливальний характер із наявністю піків («зашумленості»). Такі піки зумовлені дискретним характером керування, тобто керуючий сигнал оновлюється з кроком в одну годину, що спричиняє стрибкоподібну зміну функціоналу в моменти перемикання режимів.

Оцінка якості системи показала, що значення функціоналу залишаються в обмежених межах без різкого зростання, що свідчить про стабільність роботи системи. Крім того, відсутність монотонного зростання функціоналу підтверджує, що керування не призводить до накопичення похибки. Середнє значення функціоналу на часовому інтервалі вказує на збалансоване співвідношення між точністю підтримки температури та витратами енергії. Таким чином, система демонструє здатність працювати в умовах змінного навантаження без втрати стабільності.

У моделі враховано також коефіцієнт енергоефективності системи (COP – coefficient of performance), який пов'язує споживану електричну потужність із тепловою потужністю системи [8, 10]:

$$P(k) = \frac{u(k)}{COP(k)}, \quad (16)$$

де $P(k)$ – споживання електроенергії в момент часу k , $COP(k)$ – коефіцієнт енергоефективності. Визначення COP залежить від умов:

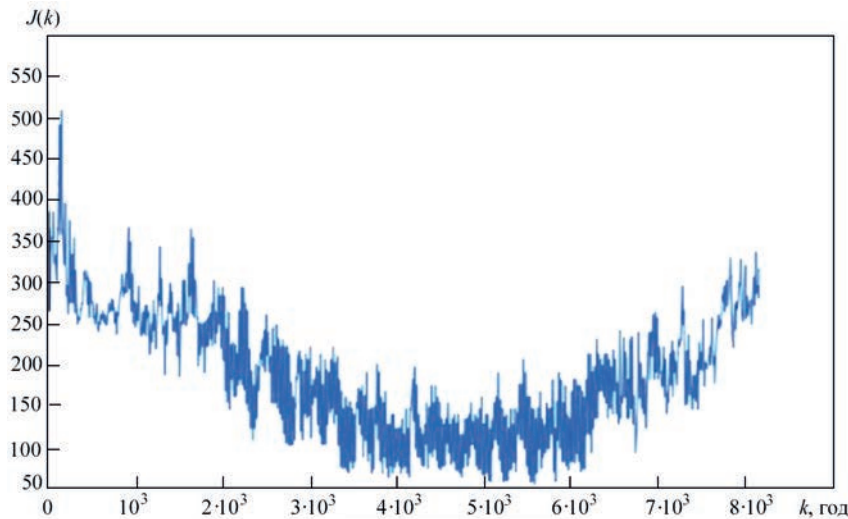


Рис. 3. Часова залежність функціоналу якості $J(k)$

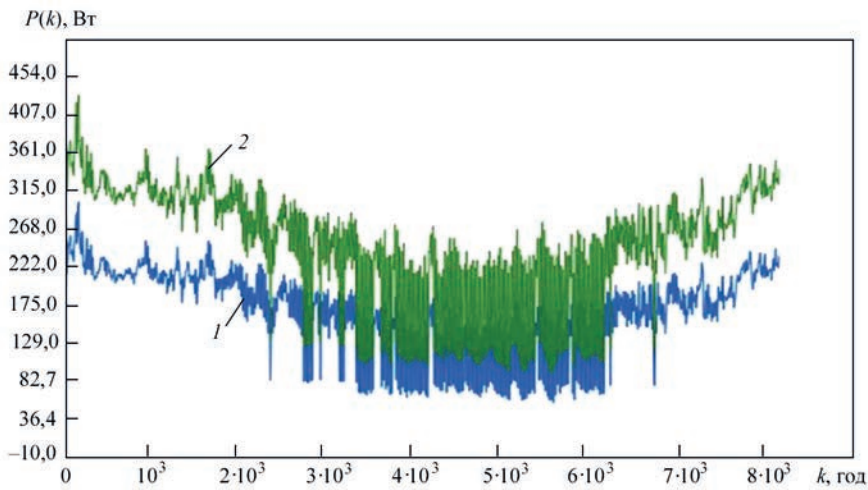


Рис. 4. Річне електроспоживання системи для двох кімнат у режимах опалення та охолодження: 1 – перша кімната; 2 – друга кімната

$$\text{COP}_i(k) = \begin{cases} \text{SEER}, & T_i > T_{\text{set}} \\ \text{SCOP}, & T_i < T_{\text{set}} \end{cases} \quad (17)$$

Результати річного споживання електроенергії системи наведено на рис. 4. Річне споживання $\sum_k^N P(k)$ для першої кімнати становить 1360 кВт·год, а для другої – 2020 кВт·год.

Висновки

Результати моделювання показали, що запропонована модель забезпечує стабілізацію температур у заданих межах при змінних зовнішніх умовах. Температури в приміщеннях демонструють плавну динаміку без значних коливань, що свідчить про адекватність обраного підходу до керування. Система автоматично адаптує рівень керуючих впливів залежно від величини теплових втрат і зовнішніх збурень. При зниженні зовнішньої температури збільшується інтенсивність нагріву, тоді як при її підвищенні активується охолодження.

Аналіз теплових потоків показав, що значення теплових втрат для кожної зони знаходяться в межах, притаманних будівлям подібного типу. Це підтверджує фізичну коректність побудованої моделі. Отримані значення керуючих впливів узгоджуються з тепловим балансом системи та забезпечують необхідну компенсацію втрат.

Наукова цінність запропонованої моделі полягає в тому, що модель подана у дискретній формі простору станів із явним урахуванням зовнішніх збурень (температури навколишнього середовища, сонячних надходжень і теплових втрат через огорожувальні конструкції). Крім того, багатозональна структура моделі дозволяє враховувати взаємний тепловий вплив між зонами через внутрішні стіни, а тепловий баланс будівлі інтегровано в контур керування VRF-системою, що забезпечує фізично коректне відображення динаміки теплових процесів.

Отримані результати підтверджують працездатність запропонованого підходу та можливість

його застосування для задач керування кліматичними системами в енергоефективних будівлях. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення моделі до більшої кількості зон, урахування повної нелінійної динаміки холодильного циклу, а також інтеграцію методів прогнозуючого керування для підвищення точності та енергоефективності системи.

Розроблена модель та підхід до керування VRF-системою дозволяють ефективно вирішувати задачу підтримки температурного режиму в багатозональних будівлях з урахуванням зовнішніх збурень. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень і практичних впроваджень у сфері інтелектуальних систем керування мікрокліматом, зокрема в поєднанні з методами прогнозуючого керування (MPC) та алгоритмами машинного навчання.

Список літератури

1. Aynur, T.N. (2010) Variable refrigerant flow systems: A review. *Energy and Buildings*, 42(7), 1106–1112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.024>
2. Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., DeWitt, D.P. (2011) *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed. Hoboken, John Wiley & Sons.
3. Мазуренко М.І., Лисенко Ю.Ю. (2025) Автоматизація керування процесом кондиціонування із застосуванням систем зі змінним потоком холодоагенту. *Матеріали XXI Всеукр. наук.-практ. конф. «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»*. Київ, КПІ, 297–299.
4. Кривошеєв М.В., Кравець О.М., Сидоренко В.Г. (2024) Методи розрахунку теплових втрат і теплонакопичень у будівлях. *Refrigeration Engineering and Technology*, 60(1), 45–52. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i1.2897>
5. *Climate data for building simulation*. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/UKR_Ukraine/index.html
6. Mayne, D.Q., Rawlings, J.B., Rao, C.V., Scokaert, P.O.M. (2000) *Constrained model predictive control: Stability and optimality*. *Automatica*, 36(6), 789–814. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(99\)00214-9](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00214-9)
7. Vargas, S., Becerra, H.M., Hayet, J.-B. (2022) *MPC-based distributed formation control of multiple quadcopters with*

- obstacle avoidance and connectivity maintenance*. *Control Engineering Practice*, 119, 105054. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.105054>
8. ДСТУ EN ISO 52016-1:2022. *Енергоефективність будівель. Енергопотреби для опалення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплою. Ч. 1. Методики розрахунку*. Київ, ДП «УкрНДНЦ».
9. Lewis, F.L., Vrabie, D., Syrmos, V.L. (2012) *Optimal Control*. 3rd ed. Wiley. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118122631>
10. Çengel, Y.A., Boles, M.A. (2015) *Thermodynamics: An engineering approach*. 8th ed. New York, McGraw-Hill Education.

References

1. Aynur, T.N. (2010) Variable refrigerant flow systems: A review. *Energy and Buildings*, 42(7), 1106–1112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.024>
2. Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., DeWitt, D.P. (2011) *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed. Hoboken, John Wiley & Sons.
3. Mazurenko, M.I., Lysenko, Iu.Yu. (2025) Automation of air conditioning control using variable refrigerant flow systems. In: *Proceedings of the XXI All-Ukrainian Scientific and Practical Conference «Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrument Engineering»*, December 10–11, 2025, Kyiv, Ukraine. Kyiv, KPI, 297–299 [in Ukrainian].
4. Kryvosheiev, M.V., Kravets, O.M., Sydorenko, V.H. (2024) Methods for calculating heat losses and heat gains in buildings. *Refrigeration Engineering and Technology*, 60(1), 45–52 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i1.2897>
5. *Climate data for building simulation*. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/UKR_Ukraine/index.html
6. Mayne, D.Q., Rawlings, J.B., Rao, C.V., Scokaert, P.O.M. (2000) *Constrained model predictive control: Stability and optimality*. *Automatica*, 36(6), 789–814. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(99\)00214-9](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00214-9)
7. Vargas, S., Becerra, H.M., Hayet, J.-B. (2022) *MPC-based distributed formation control of multiple quadcopters with obstacle avoidance and connectivity maintenance*. *Control Engineering Practice*, 119, 105054. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.105054>
8. DSTU EN ISO 52016-1:2022. *Energy performance of buildings. Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads. Pt 1: Calculation procedures* (EN ISO 52016-1:2017, IDT; ISO 52016-1:2017, IDT) [in Ukrainian].
9. Lewis, F.L., Vrabie, D., Syrmos, V.L. (2012) *Optimal Control*. 3rd ed. Wiley. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118122631>
10. Çengel, Y.A., Boles, M.A. (2015) *Thermodynamics: An engineering approach*. 8th ed. New York, McGraw-Hill Education.

MATHEMATICAL MODEL OF ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF A MULTI-ZONE AIR CONDITIONING SYSTEM WITH VARIABLE REFRIGERANT FLOW

M.I. Mazurenko, I.Y. Lysenko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: j.lysenko@kpi.ua

This paper presents a discrete space-time mathematical model for controlling a multi-zone air conditioning system with variable refrigerant flow (VRF system), taking into account external thermal disturbances, solar gains, and heat transfer through building envelope structures. A state-space model describing the temperature dynamics in two independent zones is developed. A control structure based on the heat balance with switching logic between heating and cooling modes is proposed. A quadratic performance index is formulated to minimize temperature deviations from setpoints and energy consumption for control. Numerical simulations are performed using hourly climatic data. The results show that indoor temperatures are maintained within ± 0.5 °C of the set values, and the annual electricity consumption required to ensure these conditions is estimated. The proposed model can serve as a basis for the development of predictive control systems for indoor climate in energy-efficient buildings. 10 Ref., 1 Tab., 4 Fig.

Keywords: VRF system, control, mathematical model, heat balance, multi-zone air conditioning, optimal control, energy efficiency

ORCID

Мазуренко М.І. – <https://orcid.org/0009-0002-7155-0619>, Лисенко Ю.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-9110-6684>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

Ю.Ю. Лисенко

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

E-mail: j.lysenko@kpi.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

М.І. Мазуренко, Ю.Ю. Лисенко (2026) Математична модель енергоефективного керування багатозональною системою кондиціювання зі змінним потоком холодоагенту. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **02**, 44–50.

DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.05>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 22.04.2026

Отримано у переглянутому вигляді 13.05.2026

Підписано до друку 02.06.2026

Оприлюднено 30.06.2026




November 2026

Organized by

NDTonline 

Free • Online • On-demand

NDTnet 

**International Online Conference on
Nondestructive Testing 2026**

СПЕКТРАЛЬНА ВІДПОВІДНІСТЬ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ЕКРАНА ДО СЕНСОРА В РЕНТГЕНОТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМАХ

С.Р. Михайлов^{1,2}

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

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Email: ndt@paton.kiev.ua

Плівкова радіографія досі є поширеним методом неруйнівного контролю якості матеріалів і виробів у всіх галузях промисловості завдяки добре відпрацьованій нормативній базі та існуючій інфраструктурі (фотолабораторії, обладнання, кваліфікований персонал тощо). Однак суттєві недоліки плівкової радіографії (низька продуктивність і висока вартість контролю, неможливість контролю об'єктів у режимі реального часу) стимулюють розробку нових методів реєстрації рентгенівських зображень, зокрема цифрової радіографії. Цифрова рентгенографія реалізується за допомогою цифрових рентгенотелевізійних систем. Наразі використовуються різні цифрові рентгенотелевізійні системи: системи на основі рентгенівських електронно-оптичних перетворювачів, скануючі системи на основі лінійних детекторів, системи на основі напівпровідникових плоскочасових детекторів, системи типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗС- (КМОН-) сенсор» та ін. Останні системи мають низку переваг перед іншими: високі чутливість контролю та просторова роздільна здатність; можливість зміни рентгенівського сцинтиляційного екрана, що дозволяє змінювати розмір робочого поля та ін. параметри системи; короткий час отримання зображення; простота конструкції; малі габарити та вага; низька вартість. Для забезпечення високої чутливості контролю використовуються високочутливі ПЗС- (КМОН-) сенсори, світлосильні об'єктиви та рентгенівські екрани з високою конверсійною ефективністю. Однак важливою умовою досягнення високої чутливості контролю є відповідність спектральної характеристики рентгенівського випромінювання спектральній характеристиці чутливості ПЗС- (КМОН-) сенсора. Метою роботи є дослідження спектральної відповідності найбільш розповсюджених та ефективних рентгенівських екранів до низки сучасних ПЗС- (КМОН-) сенсорів. Виконано розрахунки коефіцієнтів спектральної відповідності для сцинтиляційних рентгенівських екранів до ПЗС- та КМОН-сенсорів. Для розрахунку коефіцієнтів спектральної відповідності використано відношення чутливості ПЗС- та КМОН-сенсорів до спектра, що випромінюється екраном, до максимальної чутливості сенсора. Побудовано таблицю коефіцієнтів спектральної відповідності рентгенівських екранів до ПЗС- (КМОН-) сенсорів. Визначено, що найкращу спектральну відповідність мають комбінації екрана Gd2O2S(Tb) і ПЗС-сенсора ICX285AL, КМОН-сенсора IMX421, ПЗС-сенсора ICX674ALG, КМОН-сенсора MT9M034 та КМОН-сенсора IMX174. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: цифрова рентгенографія, рентгенівська телевізійна система, рентгенівський екран, ПЗС-сенсор, КМОН-сенсор, взаємне спектральне узгодження

Вступ. Плівкова радіографія досі є розповсюдженим методом неруйнівного контролю якості матеріалів і виробів в усіх галузях промисловості з-за добре відпрацьованої нормативної бази та існуючої інфраструктури (фотолабораторії, обладнання, кваліфікований персонал тощо). Однак суттєві недоліки плівкової радіографії (низька продуктивність і висока вартість контролю, неможливість контролю об'єктів у реальному часі) стимулюють розробку нових методів реєстрації рентгенівських зображень, зокрема цифрової рентгенографії [1].

Цифрова рентгенографія реалізується за допомогою цифрових рентгенотелевізійних систем (РТВС). Нині використовуються різноманітні цифрові РТВС як непрямого перетворення рент-

генівських зображень, так і системи прямого перетворення: системи на основі рентгенівських електронно-оптичних перетворювачів (РЕОП), скануючі системи на основі лінійних детекторів, системи на основі напівпровідникових плоскочасових детекторів, системи типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗС- (КМОН-) сенсор» та ін. Системи на основі напівпровідникових плоскочасових детекторів є одними з найперспективніших. Однак такі системи мають суттєві недоліки: високу вартість та обмежену радіаційну стійкість напівпровідникових детекторів, що призводить до скорочення строку служби таких систем [2, 3].

Альтернативою системам на основі плоскочасових детекторів є рентгенотелевізійні системи типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗС- (КМОН-) сенсор». Такі системи мають низку переваг перед іншими: високі чутливість контролю та просторова роздільна здатність; можливість

зміни рентгенівського сцинтиляційного екрана, що дозволяє змінювати розмір робочого поля та інші параметри системи; малий час отримання зображення; простота конструкції; малі габарити й вага; низька вартість. Для забезпечення високої чутливості контролю в системах застосовують високочутливі ПЗЗ-(КМОН-) сенсори, світлосильні об'єктиви та рентгенівські екрани з високою конверсійною ефективністю.

Проте важливою характеристикою рентгенівських екранів є спектр випромінювання. Спектральні характеристики випромінювання екранів вирізняються зазвичай максимумом випромінювання на певній довжині хвилі та шириною смуги випромінювання. А всі ПЗЗ-(КМОН-) сенсори є селективними приймачами світла та мають свої спектральні характеристики чутливості. Тому ефективність екрана в системі значною мірою залежить від ступеня його спектральної відповідності до ПЗЗ-(КМОН-) сенсора, і для досягнення високої чутливості контролю необхідно забезпечити високий ступінь спектральної відповідності характеристики випромінювання рентгенівського екрана до спектральної характеристики чутливості ПЗЗ-(КМОН-) сенсора [4].

Метою роботи є дослідження спектральної відповідності найбільш розповсюджених та ефективних рентгенівських екранів до низки сучасних ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів.

Взаємна спектральна відповідність рентгенівських екранів і ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів. Якщо спектральна характеристика випромінювання рентгенівського екрана $I(\lambda)$, то променевий потік випромінювання Φ від екрана становить:

$$\Phi = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі світла.

Якщо спектральна характеристика чутливості ПЗЗ-(КМОН-) сенсора $S(\lambda)$, то величина ефективного потоку випромінювання F , що визначає дію на даний сенсор усього випромінювання:

$$F = \int_0^{\infty} I(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

Оскільки всі ПЗЗ-(КМОН-) сенсори є селективними приймачами світла, ефективність екрана значною мірою залежить від ступеня його спектральної відповідності до сенсора. Згідно з (1) та (2) відношення ефективностей двох екранів, спектри випромінювання яких вирізняються функціями $I_1(\lambda)$ та $I_2(\lambda)$, при використанні їх з одним і тим

самим сенсором, може бути наведено у вигляді рівняння:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\int_0^{\infty} I_1(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} I_2(\lambda)S(\lambda)d\lambda} = \frac{(I_{max})_1 \int_0^{\infty} I'_1(\lambda)S'(\lambda)d\lambda}{(I_{max})_2 \int_0^{\infty} I'_2(\lambda)S'(\lambda)d\lambda} \quad (3)$$

де $S(\lambda)$ – спектральна характеристика чутливості сенсора; штрихом помічені величини, що нормовані по максимуму:

$$I'(\lambda) = I(\lambda) / I_{max}; S'(\lambda) = S(\lambda) / S_{max} \quad (4)$$

З іншого боку, відношення відповідних променевих потоків від екранів становить:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\int_0^{\infty} I_1(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} I_2(\lambda)d\lambda} = \frac{(I_{max})_1 \int_0^{\infty} I'_1(\lambda)d\lambda}{(I_{max})_2 \int_0^{\infty} I'_2(\lambda)d\lambda} \quad (5)$$

З виразів (3) та (5) знаходимо:

$$\frac{F_1}{F_2} = \left(\frac{\Phi_1}{\Phi_2}\right) \cdot \left(\frac{K_1}{K_2}\right), \quad (6)$$

$$\text{де } K_i = \frac{\int_0^{\infty} I'_i(\lambda)S'(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} I'_i(\lambda)d\lambda} \quad (7)$$

Звідси випливає, що відношення ефективних потоків дорівнює відношенню променевих потоків, помноженому на відношення відповідних коефіцієнтів K_i . Оскільки відмінність ефективного потоку від променевого визначається спектральними характеристиками джерела та приймача світла, то величина K є мірою їхньої взаємної спектральної відповідності та має назву коефіцієнта спектральної відповідності.

Таким чином, коефіцієнт спектральної відповідності K являє собою чутливість ПЗЗ-(КМОН-) сенсора до спектра, що випромінюється рентгенівським екраном, віднесена до максимальної чутливості сенсора. Цей коефіцієнт досягає найбільшого значення, що дорівнює одиниці, у тому випадку, коли відносна чутливість $S(\lambda)$ ПЗЗ-(КМОН-) сенсора є максимальною, тобто дорівнює одиниці в усій спектральній області випромінювання екрана. Або, іншими словами, коли випромінювання екрана сконцентровано в області довжин хвиль, при яких характеристика $S(\lambda)$ досягає найбільшого значення. У всіх інших випадках, у тому числі й при збігу максимумів смуги випромінювання екрана та смуги чутливості сенсора, $K < 1$. Отже

найбільша спектральна відповідь може бути отримана у разі рентгенівських екранів із вузькими смугами випромінювання.

Розрахунки коефіцієнтів спектральної відповідності. Для розрахунку коефіцієнтів спектральної відповідності були обрані монохромні ПЗЗ-сенсори: ICX285AL [5], ICX274AL [6], ICX674ALG [7], KAI2020 [8]; а також монохромні КМОН-сенсори: IMX174 [9], IMX421 [10], IMX422 [11], IMX432 [12], MT9M034 [13].

В останні роки КМОН-сенсори за такими параметрами, як чутливість і рівень власних шумів, зрівнялися з ПЗЗ-сенсорами. У той же час КМОН-сенсори у порівнянні з ПЗЗ-сенсорами мають такі суттєві переваги, як: вища швидкість зчитування зображень, можливість зчитування окремих фрагментів повних зображень, значно нижча вартість. Усе це призводить до того, що високочутливі телевізійні камери, які застосовуються в РТВС, усе частіше розробляються на основі КМОН-сенсорів.

Одним із критеріїв вибору сенсорів був великий розмір пікселя для забезпечення високої чутливості контролю РТВС. В обраних сенсорах розмір пікселя складає 4,5...9 мкм. Виключенням є сенсор MT9M034 фірми ON Semiconductor з розміром пікселя 3,75 мкм, але який має високу чутливість (5,48 В/лк·с). Іншою вимогою була якомога більша кількість пікселів сенсора для забезпечення високої просторової роздільної здатності РТВС.

У якості сцинтиляційних рентгенівських екранів обрано: вольфраматні CaWO_4 , лужно-галогенні CsI(Tl) та NaI(Tl) [4,14], оксисульфідні $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ [14,15,16] та напівпровідникові ZnSe(Te) [4] екрани. У дужках хімічної формули рентгенолюмінофору рентгенівських екранів наведено елементи, які використовуються у якості активатора.

Спектральні характеристики випромінювання екранів і чутливості сенсорів у технічній та довідниковій літературі наведено у вигляді графіків. А для розрахунку коефіцієнтів спектральної відповідності K потрібні аналітичні залежності випромінювання екранів і чутливості сенсорів від довжини хвилі світла. Тому графічні спектральні характеристики екранів і сенсорів були інтерпольовані за допомогою кубічних сплайнів і нормовані за допомогою (4) за максимальним значенням.

На рис. 1 зображено інтерпольовані спектральні характеристики обраних КМОН-сенсорів і рентгенівських екранів, а на рис. 2 – інтерпольовані спектральні характеристики обраних ПЗЗ-сен-

сорів і рентгенівських екранів. Розрахунок коефіцієнтів спектральної відповідності K виконувався за (7). Інтерполяція кубічними сплайнами спектральних характеристик і розрахунки коефіцієнтів спектральної відповідності K виконувались у програмному середовищі MathCAD. Результати розрахунків коефіцієнтів спектральної відповідності K рентгенівських екранів до ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів наведено в таблиці.

Як видно з таблиці, найменші значення коефіцієнтів спектральної відповідності має екран ZnSe(Te) до більшості ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів (окрім IMX422, IMX432 та ICX674ALG). Причиною цьому є те, що максимум випромінювання цих екранів зміщений у червону область спектру. Тому цей екран доцільно використовувати в комбінації з перерахованими сенсорами, у яких спектральна характеристика чутливості охоплює червону область спектру.

Найбільші значення коефіцієнтів спектральної відповідності мають екрани $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ та CaWO_4 до більшості сенсорів. Рентгенівські екрани CaWO_4 поступаються за конверсійною ефективністю та роздільною здатністю гадолінієвим екранам $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ і використовуються переважно в якості підсилюючих екранів у комбінації з радіографічною плівкою.

Рентгенівські екрани $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ являють собою шар рентгенолімінофора, який нанесений на гнучку пластикову підкладку. Екрани призначені для використання у РТВС різного призначення, а також у цифрових флюорографах. Прикладом таких екранів є екрани РЕНЕКС ЕРЛ-Г ЗАТ «РЕНЕКС», які мають роздільну здатність 5,5...20 пар лін./мм і розмір 40×40 см. За спектральною відповідністю до більшості сенсорів екрани $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ переважають решту екранів. Найкращу спектральну відповідність має гадолінієвий екран $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ до ПЗЗ-сенсора ICX285AL.

Монокристалічні рентгенівські екрани CsI(Tl) мають гіршу на 6...8 % спектральну відповідність до більшості сенсорів у порівнянні з гадолінієвими екранами $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$. Найкраща спектральна відповідність екранів CsI(Tl) досягається у комбінації з КМОН-сенсором IMX421 ($K = 0,915$).

Рентгенівські екрани NaI(Tl) мають високе значення коефіцієнта спектральної відповідності тільки до сенсора KAI2020 ($K = 0,959$), а до решти сенсорів спектральна відповідність таких екранів гірша на 10...35 % порівняно з екранами $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$. Значення коефіцієнта спектральної відповідності екранів NaI(Tl) до КМОН-сенсорів

IMX174 MT9M034 та IMX421 знаходиться в межах $K = 0,826...0,848$.

Серед досліджених сенсорів необхідно виділити КМОН-сенсор із кадровим затвором фірми Sony, який за параметрами переважає решту сенсорів. Сенсор виконаний за фірмовою технологією Pregius, має великий розмір пікселя 5,86 мкм, формат 1/1,2", кількість пікселів 1936×1216, швидкість зчитування зображення 164,5 кадр/с і високе значення коефіцієнта спектральної відповідності у комбінації з рентгенівськими екранами Gd2O2S(Tb), CsI(Tl) та NaI(Tl).

Результати досліджень спектральної відповідності рентгенівських екранів до ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів були використані при розробці низки рентгенотелевізійних систем типу «рентгенів-

ський екран – оптика – ПЗЗ-(КМОН-) сенсор» різного призначення.

На рис. 3, а наведено зовнішній вигляд розробленої цифрової рентгенотелевізійної системи на основі телевізійної камери Atik 314L+, яку виконано на ПЗЗ-сенсорі Sony ICX-285AL. РТВС закріплено на трубопроводі за допомогою спеціального кріплення, яке дозволяє кріпити її на трубопроводі різного діаметра. ПЗЗ-сенсор Sony ICX285AL має формат 2/3" (діагональ 11 мм), кількість пікселів 1392×1040, розміри пікселя 6,45×6,45 мкм. Телевізійна камера має 16-розрядний вбудований АЦП і систему охолодження ПЗЗ-сенсора на основі елементів Пельть'є. У якості рентгенівського екрана в системі застосовується гадолінієвий екран Gd2O2S(Tb) РЕНЕКС ЕРЛ-Г з товщиною

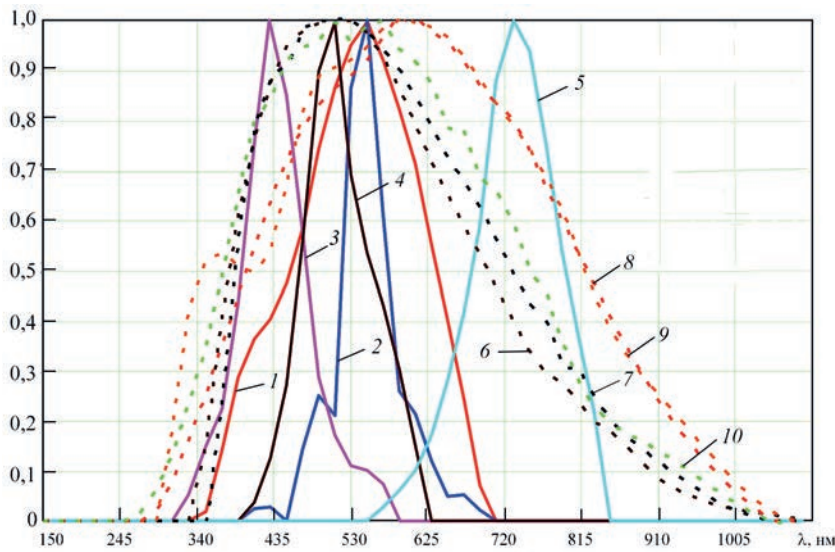


Рис. 1. Спектральні характеристики чутливості КМОН-сенсорів і спектральні характеристики випромінювання рентгенівських екранів: 1 – CsI(Tl), $I_1(\lambda)$; 2 – Gd2O2S(Tb), $I_2(\lambda)$; 3 – NaI(Tl), $I_3(\lambda)$; 4 – CaWO4, $I_4(\lambda)$; 5 – ZnSe(Te), $I_5(\lambda)$; 6 – IMX174, $S_1(\lambda)$; 7 – MT9M034, $S_2(\lambda)$; 8 – IMX422, $S_4(\lambda)$; 9 – IMX432, $S_5(\lambda)$; 10 – IMX421, $S_7(\lambda)$

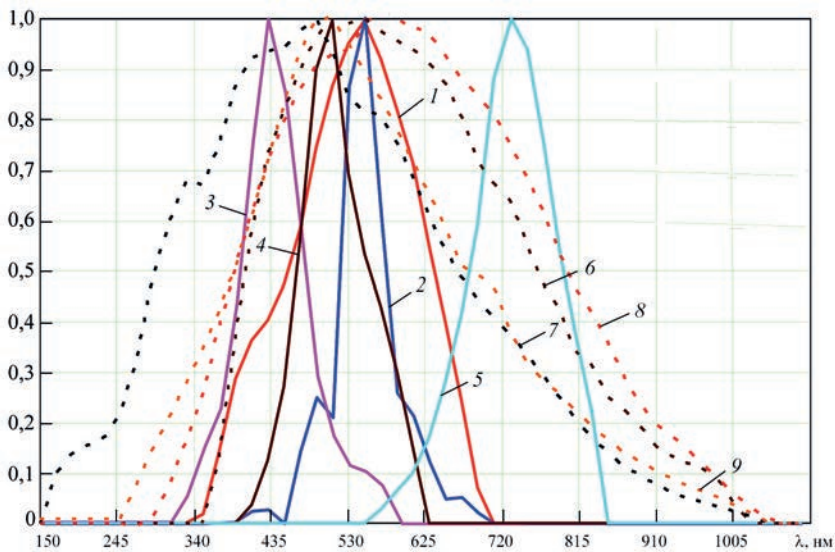


Рис. 2. Спектральні характеристики чутливості ПЗЗ-сенсорів і спектральні характеристики випромінювання рентгенівських екранів: 1 – CsI(Tl), $I_1(\lambda)$; 2 – Gd2O2S(Tb), $I_2(\lambda)$; 3 – NaI(Tl), $I_3(\lambda)$; 4 – CaWO4, $I_4(\lambda)$; 5 – ZnSe(Te), $I_5(\lambda)$; 6 – ICX285AL, $S_3(\lambda)$; 7 – KAl2O20, $S_6(\lambda)$; 8 – ICX674ALG, $S_8(\lambda)$; 9 – ICX274AL, $S_9(\lambda)$

Коефіцієнти спектральної відповідності K рентгенівських екранів до ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів

Сенсор (фірма, формат, кількість пікселів)	Рентгенівський екран				
	CsI(Tl)	Gd2O2S(Tb)	NaI(Tl)	CaWO4	ZnSe(Te)
IMX174 (Sony, 1/1.2", 2.3 MP)	0,878	0,943	0,848	0,967	0,417
MT9M034 (ON Semiconductor, 1/3", 1.2 MP)	0,893	0,957	0,826	0,972	0,498
ICX285AL (Sony, 2/3", 1.45 MP)	0,892	0,979	0,674	0,955	0,608
IMX422 (Sony, 1/1.8", 2.0 MP)	0,861	0,921	0,61	0,866	0,768
IMX432 (Sony, 1.1", 1.8 MP)	0,875	0,942	0.606	0,89	0,772
KAI2020 (ON Semiconductor, 1", 1.9 MP)	0,819	0,821	0,959	0,897	0,374
IMX421 (Sony, 2/3", 2.86 MP)	0,915	0,968	0,833	0,964	0,568
ICX674ALG (Sony, 2/3", 2.8 MP)	0,891	0,959	0,678	0,915	0,716
ICX274AL (Sony, 1/1.8", 2.0 MP)	0,805	0,874	0,744	0,913	0,390

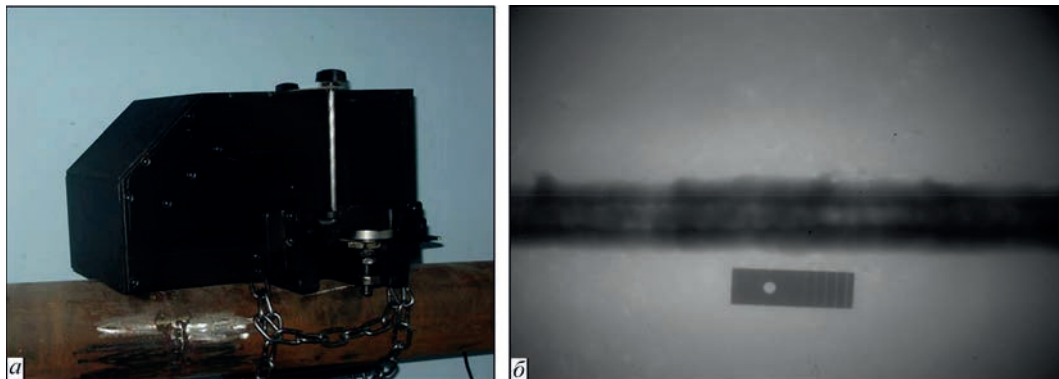


Рис. 3. Зовнішній вигляд РТВС на основі ПЗЗ-сенсора ICX-285AL і рентгенівського екрану Gd2O2S(Tb) (а) і зображення зварного з'єднання сталевих пластин завтовшки 10 мм та еталона чутливості (б)

люмінофорного шару 200 мкм та роздільною здатністю 5,5 пар лін/мм. Система оснащена світлосильним об'єктивом Computar M1214-MP2 і має розміри робочого поля 160×120 мм. Комбінація гадолінієвого екрана Gd2O2S(Tb) та ПЗЗ-сенсора ICX285AL у РТВС забезпечує високе значення коефіцієнта спектральної відповідності $K = 0,979$ (див. таблицю).

На рис. 3, б наведено зображення зварного з'єднання сталевих пластин завтовшки 10 мм, яке отримано за допомогою розробленої РТВС при просвічуванні рентгенівським апаратом Екстравольт-350, фокусній відстані 30 см та експозиції 20 с у ПЗЗ-сенсорі. Розроблена РТВС забезпечує відносну чутливість контролю 0,8 % та роздільну здатність 5 пар лін/мм, що дозволяє замінити у багатьох випадках плівкову радіографію.

Для контролю зварних з'єднань трубопроводів малого діаметра розроблено портативну РТВС із розміром робочого поля 110×80 мм, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 4. У телевізійній ка-

мері системи застосовано високочутливий 1/3" КМОН-сенсор MT9M034 фірми ON Semiconductor з кількістю пікселів 1280×960 [14]. У якості рентгенівського екрана використовується гадолінієвий екран Gd2O2S(Tb) РЕНЕКС ЕРЛ-Г з товщиною люмінофорного шару 200 мкм. Комбінація



Рис. 4. Зовнішній вигляд РТВС на основі КМОН-сенсора MT9M034 і рентгенівського екрана Gd2O2S(Tb) для контролю зварних з'єднань трубопроводів малого діаметра

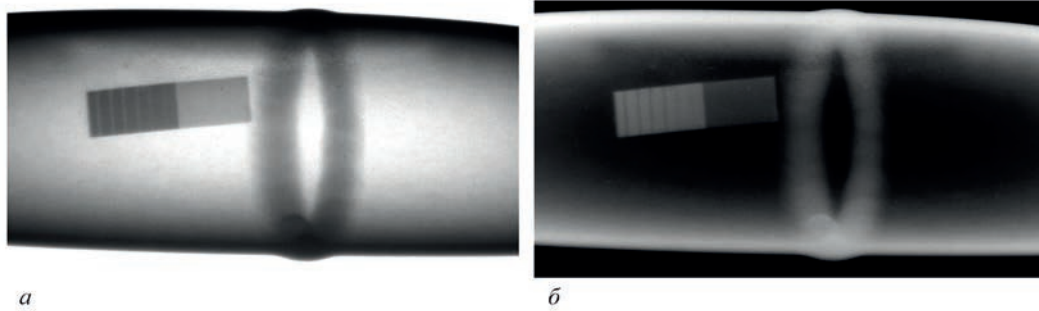


Рис. 5. Зображення зварного з'єднання алюмінієвого трубопроводу $\text{Ø}50 \times 3$ мм та еталона чутливості: *а* – зображення позитивної полярності, *б* – зображення негативної полярності

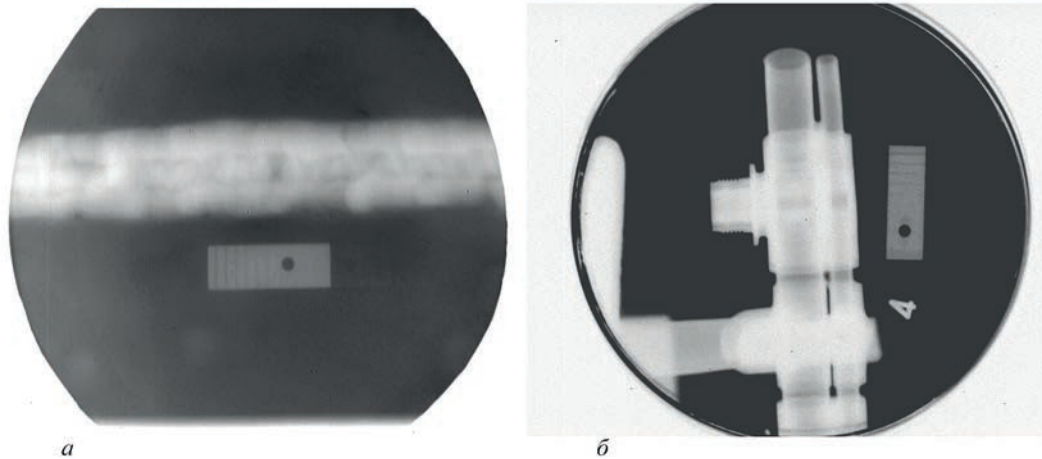


Рис. 6. Негативні зображення зварного з'єднання сталевих пластин завтовшки 10 мм з еталонем чутливості (*а*) та зображення трубопроводу з еталонем чутливості (*б*)

гадолінієвого екрана $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}(\text{Tb})$ і КМОН-сенсора МТ9М034 у РТВС забезпечує високе значення коефіцієнта спектральної відповідності $K = 0,957$ (див. таблицю).

На рис. 5 наведені приклади зображень зварного з'єднання, отриманих при контролі за допомогою розробленої РТВС алюмінієвого трубопроводу $\text{Ø}50 \times 3$ мм. На рис. 5, *а* представлено зображення позитивної полярності, а на рис. 5, *б* – негативної полярності. Контроль виконувався рентгенівським апаратом РАП-150/300, фокусна відстань становила 60 см, час експозиції 50 с. Анодні напруга та струм становили 50 кВ і 10 мА. Розроблена РТВС забезпечує чутливість контролю, що відповідає 1 класу ДСТУ 7512-82 (виявляються канавки завглибшки 0,1 мм).

Розроблено низку РТВС із використанням ПЗ3-сенсорів і монокристалічних рентгенівських екранів $\text{CsI}(\text{Tl})$ діаметром 120, 150 та 200 мм. На рис. 6 наведені негативні зображення зварного з'єднання сталевих пластин завтовшки 10 мм (*а*) та зображення трубопроводу (*б*), які отримані за допомогою РТВС на основі ПЗ3-сенсора ICX429ALL форматом 1/2" із мікролінзами фірми Sony (технологія EXview HAD CCD) у комбінації з монокристалічним екраном $\text{CsI}(\text{Tl})$ діаметром

120 мм. Контроль виконувався рентгенівським апаратом РАП-150/300, час експозиції 30 с. Для оцінки коефіцієнта спектральної відповідності РТВС можна використати спектральну характеристику чутливості ПЗ3-сенсора ICX674ALG (рис. 2), бо вона близька до спектральної характеристики ПЗ3-сенсора ICX429ALL. Комбінація монокристалічного екрана $\text{CsI}(\text{Tl})$ і ПЗ3-сенсора ICX674ALG у РТВС забезпечує високе значення коефіцієнта спектральної відповідності $K = 0,891$ (див. таблицю). Відносна чутливість контролю зварного з'єднання за канавковим еталонем становить 0,83 % (рис. 6, *а*).

Висновки

Для досягнення високої чутливості контролю рентгенотелевізійних систем типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗ3-(КМОН-) сенсор» необхідно забезпечити високий ступінь спектральної відповідності характеристики випромінювання рентгенівського екрана до спектральної характеристики чутливості сенсора.

Мірою взаємної спектральної відповідності рентгенівського екрана та сенсора є коефіцієнт спектральної відповідності K , який досягає найбільшого значення, що дорівнює одиниці, у тому випадку,

коли відносна чутливість сенсора є максимальною, тобто дорівнює одиниці в усій спектральній області випромінювання екрана. У всіх інших випадках, у тому числі й при збігу максимумів смуги випромінювання екрана та смуги чутливості сенсора, $K < 1$.

За результатами досліджень спектральної відповідності рентгенівських екранів до ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів найпридатнішими до використання у рентгенотелевізійних системах типу «рентгенівський екран – оптика – ПЗЗ-(КМОН-) сенсор» є рентгенівські екрани на основі оксисульфиду гадолінію, активованого тербієм. Найкращу спектральну відповідність мають комбінації екрана Gd2O2S(Tb) і ПЗЗ-сенсора ICX285AL, КМОН-сенсора IMX421, ПЗЗ-сенсора ICX674ALG, КМОН-сенсора MT9M034 та КМОН-сенсора IMX174.

Монокристалічні рентгенівські екрани CsI(Tl) мають гіршу на 6...8 % спектральну відповідність до більшості сенсорів у порівнянні з гадолінієвими екранами Gd2O2S(Tb). Найкраща спектральна відповідність екранів CsI(Tl) досягається в комбінації з КМОН-сенсором IMX421.

Рентгенівські екрани NaI(Tl) мають високу спектральну відповідність тільки до сенсора KAI2020, а до решти сенсорів спектральна відповідність таких екранів гірша на 10...35 % порівняно з екранами Gd2O2S(Tb).

Напівпровідникові екрани ZnSe(Te) мають найгіршу спектральну відповідність до більшості ПЗЗ-(КМОН-) сенсорів, окрім IMX422, IMX432 та ICX674ALG.

Список літератури/References

1. Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Пастовенский Р.О., Шило Д.С. (2015) Современные системы радиационного неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 23–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.01>
2. Troitskiy, V.A., Mikhailov, S.R., Pastovenskii, R.O., Shilo, D.S. (2015) Modern systems of radiation non-destructive testing. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **1**, 23–35 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.01>
3. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Михайлов С.Р., Пастовенский Р.О., Шалаев В.А. (2023) Scanning X-Ray detector for nondestructive testing. *Materials Evaluation*, **81(5)**, 22–29. DOI: <https://doi.org/10.32548/2023.me-04290>
4. Гринев Б.В., Рыжиков В.Д., Семиноженко В.П. (2007) *Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе*. Киев, Наук. думка. ISBN 978-966-00-0668-3
5. Grynyov, B.V., Ryzhikov, V.D., Semynozhenko V.P. (2007) *Scintillation detectors and radiation control systems on their basis*. Kyiv, Naukova Dumka. ISBN 978-966-00-0668-3
6. Sony Corporation. ICX285AL Datasheet (PDF) – Sony Corporation. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/47475/SONY/ICX285AL/691/8/ICX285AL.html>
7. Sony Corporation. ICX274AL. https://www.1stvision.com/cameras/sensor_specs/ICX274.pdf
8. Sony Corporation. ICX674ALG/ICX674AQG. https://www.1stvision.com/cameras/sensor_specs/ix674alg_aqg.pdf
9. RkBlog. RkBlog: Sensor: KAI2020. <https://rk.edu.pl/astro/kamery-ccd/matryca/kai2020/>
10. ZWO Company. ASI174MM Mini (mono) | ZWO ASI. <https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi1600mm-cool>
11. Graftek Imaging Inc.. Pixelink PL-D753MU-T, 2/3 in. format, C-Mount, 1936×1464, 143 fps, Monochrome, CMOS Global Shutter, USB3 Vision with Trigger – Graftek Imaging Inc. <https://graftek.biz/products/pixelink-pl-d753mu-t>
12. Emergent Vision Technologies. HB-2000-S: 25GigE camera with Sony Pregius IMX422 – Emergent. <https://emergentvisiontec.com/products/bolt-hb-25gige-cameras-rdma-area-scan/hb-2000-s/>
13. Player One Astronomy. Apollo-M MAX USB3.0 Mono Camera (IMX432) – Player One Astronomy. <https://player-one-astronomy.com/product/apollo-m-max-ix432/>
14. ON Semiconductor. MT9M034 1/3-Inch CMOS Digital Image Sensor. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mt9m034-d.pdf>
15. Cha, B.K., Kim, J.Y., Kim, T.J. et al. (2010) Fabrication and imaging characterization of high sensitive CsI(Tl) and Gd2O2S(Tb) scintillator screens for X-ray imaging detectors. *Radiation Measurements*, **45(3–6)**, 742–745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.12.025>
16. Jung, I.D., Cho, M.K., Lee, S.M. et al. (2009) Flexible Gd2O2S:Tb scintillators pixelated with polyethylene microstructures for digital x-ray image sensors. *J. of Micromechanics and Microengineering*, **19(1)**, 15014–15025. DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/1/015014>
17. Chang-Woo Seo, Bo Kyung Cha, Sungchae Jeon, Ryun Kyung Kim, Young Huh (2013) Characterization of indirect X-ray imaging detector based on nanocrystalline gadolinium oxide scintillators for high-resolution imaging application. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **699**, 129–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.05.072>

SPECTRAL CORRESPONDENCE OF X-RAY SCREEN TO THE SENSOR IN X-RAY TELEVISION SYSTEMS

S.R. Mikhailov^{1,2}

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

E-mail: smihajlov@ukr.net

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

Email: ndt@paton.kiev.ua

Film radiography is still a common method of non-destructive quality control of materials and products in all industries due to the well-established regulatory framework and existing infrastructure (photo laboratories, equipment, qualified personnel, etc.). However, significant disadvantages of film radiography (low productivity and high cost of control, inability to control objects in real time) stimulate the development of new methods of recording X-ray images, in particular digital radiography. Digital radiography is implemented using digital X-ray television systems. Currently, various digital X-ray television systems are used: systems based on X-ray electron-optical converters, scanning systems based on linear detectors, systems based on semiconductor flat-panel detectors, systems of the “X-ray screen – optics – CCD-(CMOS-) sensor” type, etc. The latter systems have a number

of advantages over others: high control sensitivity and spatial resolution; the ability to change the X-ray scintillation screen, which allows you to change the size of the working field and other system parameters; short image acquisition time; simplicity of design; small dimensions and weight; low cost. To ensure high sensitivity of control, highly sensitive CCD- (CMOS-) sensors, high-aperture lenses and X-ray screens with high conversion efficiency are used. However, an important condition for achieving high control sensitivity is the correspondence of the spectral characteristic of X-ray radiation to the spectral characteristic of the sensitivity of the CCD- (CMOS-) sensor. The aim of the work is to study the spectral correspondence of the most common and effective X-ray screens to a number of modern CCD-(CMOS-) sensors. Calculations of spectral correspondence coefficients for scintillation X-ray screens to CCD- and CMOS-sensors have been performed. To calculate the spectral matching coefficients, the ratio of the sensitivity of CCD and CMOS sensors to the spectrum emitted by the screen to the maximum sensitivity of the sensor was used. A table of spectral matching coefficients of X-ray screens to CCD-(CMOS-) sensors was constructed. It was determined that the best spectral matching is achieved by combinations of the Gd2O2S(Tb) screen and the CCD-sensor ICX285AL, the CMOS-sensor IMX421, the CCD-sensor ICX674ALG, the CMOS-sensor MT9M034 and the CMOS-sensor IMX174. 16 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: digital radiography, X-ray television system, X-ray screen, CCD sensor, CMOS sensor, mutual spectral matching

ORCID

Михайлов С.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-4314-785X>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

С.Р. Михайлов

Національний технічний унікальний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37.

E-mail: smihajlov@ukr.net

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.Р. Михайлов (2026) Спектральна відповідність рентгенівського екрана до сенсора в рентгенотелевізійних системах. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **02**, 51–58. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.06>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 30.03.2026

Отримано у переглянутому вигляді 27.04.2026

Підписано до друку 01.06.2026

Оприлюднено 30.06.2026




**ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРИВАННЯ
ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ
ВІДДІЛ №4 НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ
ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**



пропонує такі послуги:

- Діагностика і моніторинг конструкцій та споруд за допомогою рентген-телевізійного, радіографічного, ультразвукового, магнітного, капілярного, теплового вихрострумowego, та інших методів НК.
- Розробка та реалізація технологічних рішень, виготовлення супровідної документації.
- Навчання, атестація і сертифікація персоналу згідно з EN ISO 9712, SNT-TC-1A, НПАОП 0.00-1-63-13.
- Технічний огляд та паспортизація промислових споруд.
- Аналіз можливості продовження ресурсу безпечної експлуатації обладнання та конструкцій.
- Ремонт та оновлення дефектоскопічного обладнання.
- Розроблення нормативної документації.
- Гармонізація європейських та міжнародних стандартів.



м. Київ, вул. Казимира Малевича, 23, корп. 6
т. (044) 205-22-15, 200-80-57; e-mail: ndt@paton.kiev.ua






26–28
травня
2026



XXIV МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

Місце проведення: Україна, м. Київ, МВЦ, Броварський пр-т, 15

Міжнародний Промисловий Форум – найбільша промислова виставка в Україні, яка з 2005 р. входить до переліку провідних світових промислових виставок, офіційно сертифікованих і визнаних Всесвітньою асоціацією виставкової індустрії (UFI), що є найвищим рівнем світового визнання для виставки. Організатор заходу – ТОВ «КІІВ ГЛОБАЛ ЕКСПО».

Міжнародний Промисловий Форум містить спеціалізовані виставки у галузі металообробки, машинобудування та суміжних областей, а також насичену програму науково-практичних конференцій, семінарів, презентацій учасників форуму. Учасниками виставок були провідні промислові підприємства України, близького та далекого зарубіжжя. Щорічно під час форуму презентуються новітні промислові технології, обладнання, інструмент, комплектуючі, послуги. Щороку форум об'єднує тисячі фахівців промислової галузі, виробників обладнання, постачальників технологій і представників бізнесу з усієї України та з-за кордону. Міжнародний Промисловий Форум – це не просто виставка. Це – головний майданчик для демонстрації інновацій, пошуку партнерів, обміну досвідом і розвитку української промисловості.

XXIV Міжнародний Промисловий Форум – це цифри, які говорять самі за себе: 427 компаній-учасників; понад 23000 м² експозиційної площі; 13000 професійних відвідувачів; 25 ділових заходів; 12 країн (Швейцарія, Китай, Польща, Німеччина, Чехія, Латвія, Литва, Португалія, Румунія, Словаччина, Італія та Україна).

Серед постійних учасників Промислового Форуму можна відмітити стенди відомих українських компаній-виробників і постачальників обладнання та матеріалів у галузі зварювання та неруйнівного контролю: ТОВ «Патон Інтернешнл», ТОВ «Фроніус Україна», ТОВ «АРАМІС», ПП ТОВ «БІНЦЕЛЬ Україна ГмбХ», ТОВ «САММІТ», Завод автогенного обладнання «ДОНМЕТ», ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», ТОВ «Хімлабор-реактив», ТОВ «ЛЕМ Ukraine», ТОВ «Ультракон», ТОВ «Елватех» та ін.

У рамках Міжнародного Промислового Форуму відбувся II конкурс зварників серед майстрів

виробничого навчання закладів професійної освіти України «PATON WELDING CUP – 2026». Конкурс було присвячено видатним вітчизняним ученим у галузі зварювання – Євгену Оскаровичу та Борису Євгеновичу Патонам.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в останні роки постійно бере участь у роботі Промислового Форуму. У цьому році на стенді ІЕЗ відвідувачі мали можливість ознайомитись із новітніми розробками Інституту в галузі зварювання та споріднених технологій. Було надано інформацію та продемонстровано зразки, отримані при використанні наступних технологій:

– Електронно-променевий 3D принтер зі зразками лопатки газотурбінного двигуна, імплантата тазостегнового суглоба, щелепно-лицьового імплантату.



Стенд ТОВ «Патон Інтернешнл»



Стенд ТОВ «Фроніус Україна»



Учасники, організатори, спонсори та судді конкурсу зварників

- Технологія пресового зварювання труб магнітокеруваною дугою.
- Зварювання металоконструкцій зі сталі завтовшки 6...200 мм за один прохід.
- Електрошлакове зварювання вертикальних, нахилених і криволінійних стиків металу завтовшки 30...200 мм за один прохід.
- Зварювання та наплавлення міді та її сплавів (у т.ч. зі сталлю) та реставрація виробів із міді та її сплавів.
- Установка аргонодугового зварювання титану вольфрамовим електродом у вузький зазор із магнітним керуванням дугою.
- Персоналізовані біополімерні імплантати з функціоналізованою поверхнею для відновлення кісток.
- Нова генерація ручного електронно-промислового обладнання для зварювання у відкритому космосі.

Під час Промислового Форуму Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН» організували проведення двох науково-технічних семінарів



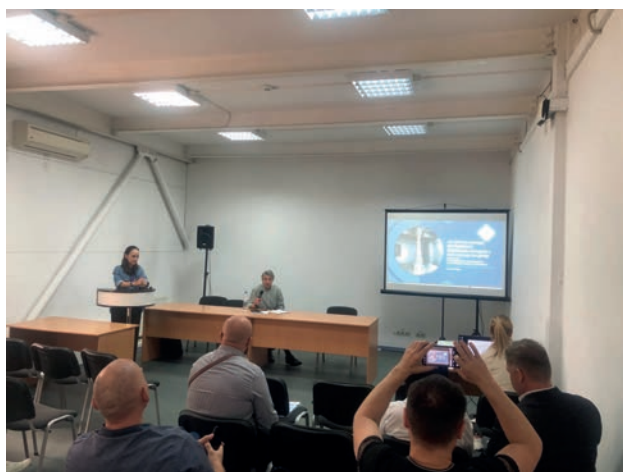
Стенд Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона

рів з актуальних питань 3D друку та неруйнівного контролю.

Семінар «3D друк металевих виробів», 26 травня

Участь у семінарі взяли 26 представників із наукових, освітніх і виробничих організацій. Було заслухано вісім доповідей:

- «Визначення параметрів електронно-промислового друку тонкостінних виробів із титанових сплавів ВТ6» В.А. Матвійчук, В.М. Нестеренков, М.О. Сисоєв, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;
- «3D друк виробів зі сталей і сплавів адитивним плазмово-дуговим наплавленням: нові технологічні підходи та розробка обладнання» В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, Є.В. Ілляшенко, О.С. Терещенко, О.Є. Божок, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;
- «Аналітичні методи дослідження матеріалів і процесів у металевому 3D друці: рішення від TA Instruments, Micromeritics, RX Solutions і Physical Electronics» О.В. Рудик, ТОВ «LEM Ukraine», м. Київ;
- «Багатошарове наплавлення ділянок трубопроводів із дефектом стоншення стінки» Г.В. Ворона, О.С. Костеневич, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;
- «Економіка дротового DED друку металом: коли технологія знижує повну вартість виробництва» Д.В. Криворучко¹, Л.Б. Криворучко², О.Д. Криворучко³, ¹ТОВ «Центр технологічних ініціатив», м. Суми; ²ТОВ «НБК АЛДА», Київська обл.; ³Heilbronn University, Germany;
- «WAAM виготовлення просторових виробів із адаптивним урахуванням їхнього теплового стану та застосуванням інструментів ШШ» І.М. Лагодзінський, В.В. Квасницький, А.В. Чорний, В.О. Черній, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ;
- «Вплив положення на платформі побудови на формування ванни розплаву за різних типів лазерного променя» С.В. Аджамський¹, Р.В. Подольський¹, Т.В. Балаханова², О.Є. Барановська², Н.П. Тогобицька³, ¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», м. Дніпро, ²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ³HTW University of Applied Sciences, Berlin, Germany;
- «Структурні характеристики металу лопаток парових турбін в умовах їх ремонтного відновлення лазерним методом» О.М. Берднікова, Ань Тяньчен, О.С. Кушнарьова, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ.



Семінар «3D друк металевих виробів», доповідач О.В. Рудик

Семінар «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану», 27 травня

Семінар було присвячено 30-річчю відомої української компанії «Діагностичні прилади». Участь у семінарі взяли більше 30 представників із наукових, освітніх і виробничих організацій.

Було заслухано десять доповідей:

– «Неруйнівні методи контролю зварювання в нафтогазовій галузі» О.В. Павлій, ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», м. Київ;

– «Контроль якості в машинобудуванні» О.М. Козін, ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», м. Київ;

– «Методи контролю сучасних композитних і полімерних виробів» О.В. Павлій, С.М. Глабець, О.М. Козін, ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», м. Київ;

– «Достовірність неруйнівного контролю аустенітних зварних з'єднань на прикладі трубопроводів ЧАЕС-3» В.М. Тороп, Є.О. Давидов, М.Д. Рабікіна, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;

– «Зменшення людського чинника під час проведення неруйнівного контролю зварних з'єднань трубопроводів та устаткування ультразвуковим дефектоскопом Wave» Д.В. Казарчук, ТОВ «Хімлаборреактив», м. Бровари;

– «Сучасні рішення XRF для неруйнівного контролю та технічної діагностики металів» М.Е. Амірсеїдов, ТОВ «Елватех», м. Київ;

– «Сучасні технології тепловізійної діагностики відповідальних об'єктів» В.Ю. Глуховський, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;

– «Про роботу Технічного комітету стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» Ю.М. Посипайко, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;

– «Про проведення XIV Європейської NDT конференції (15–19 червня 2026 р., м. Верона, Італія)» Ю.М. Посипайко, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;



Семінар «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану», доповідач О.В. Павлій



Під час проведення семінарів

– «Застосування рентгенівських томографічних систем RX Solutions у неруйнівному контролі: огляд обладнання та технічні можливості», О.В. Рудик, ТОВ «LEM Ukraine», м. Київ.

Учасники семінарів висловили побажання взяти участь у роботі тематичних семінарів, які планують провести Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН» у майбутньому.

На стенді компанії ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН» відвідувачі мали можливість ознайомитись з інформаційними партнерами Промислового Форуму – фаховими журналами «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» та з журналом «The Paton Welding Journal», який у 2025 р. включено до наукометричної бази Scopus.

Наступний XXV Міжнародний Промисловий Форум заплановано провести 25–27 травня 2027 р.

Олександр Зельніченко,
Ірина Романова



МИХАЙЛУ ЛЕОНІДОВИЧУ КАЗАКЕВИЧУ – 80!



Правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики щиро вітає з 80-річчям від дня народження **Михайла Леонідовича Казакевича** – кандидата хімічних наук, доцента Навчально-наукового Інституту аерокосмічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», заступника голови УТ НКТД!

Після закінчення університету за спеціальністю «фізик-рентгенофізик» Михайло Леонідович навчався в аспірантурі Інституту проблем матеріалознавства НАН України (1971–1974 рр.). Свою професійну діяльність пов'язав із провідними науковими та промисловими установами: працював у ДП «АНТОНОВ» (1974–1981 рр.), Інституті фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України (1981–2023 рр.), а з 2025 року передає свій багатий досвід студентам НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». У період 1993–2023 рр. очолював Державне підприємство «КОЛОРАН» ІФХ ім. Л.В. Писаржевського НАН України.

Михайло Леонідович обґрунтував шляхи створення різноманітних пенетрантів з унікальними фізико-хімічними властивостями та сформував новий напрям у галузі неруйнівного контролю – екологічно безпечні дефектоскопічні матеріали й технології. Вони знайшли широке застосування

на провідних підприємствах України, серед яких: КБ «Південне», Завод «Південмаш», Запорізька та Південноукраїнська АЕС, Завод «Авіант» та інші.

Під його керівництвом створено гамму кольорових екологічно безпечних пенетрантів і проявників для капілярної дефектоскопії, які введено в Директивні техпроцеси та Державний стандарт ДСТУ 3-26-2012 з капілярного контролю авіаційної техніки. Матеріали для кольорової дефектоскопії, розроблені ДП «КОЛОРАН», також увійшли до «Уніфікованої методики контролю ядерних установок ПНАЕ-Г7-18».

М.Л. Казакевич є автором понад 30 авторських свідоцтв і патентів України. Під його керівництвом виконано близько 200 науково-технічних договорів, опубліковано понад 50 наукових і навчально-методичних праць. Як науковий керівник він підготував 23 дипломантів і сьогодні продовжує активно працювати з аспірантами та співпрацювати з провідними вченими галузі. Його науково-технічні досягнення неодноразово презентувалися на міжнародних форумах Міжнародного комітету (ICNDT), Європейської федерації (EFNDT) та Міжнародної академії (ANDTI) з неруйнівного контролю.

Головні напрями досліджень і практичного застосування розробок ювіляра:

- Матеріали для капілярного, магнітопорошкового контролю, течешукання та моніторингу (зокрема, розробка Інструкції «Люмінесцентний метод ПК для технологічного процесу ЛЮМ-18С» та участь у створенні ОСТ 3-026-2002).
- Сучасні технології контролю герметичності баків-кесонів для зберігання палива, що дозволяють значно спростити та здешевити ремонт паливної



системи літаків.

- Термостійке полімерне сполучне та вуглецевий композит, що працюють при температурах 300...400 °С.
- Матеріали й технології для виявлення вогнищ корозії конструкцій транспортних засобів під лакофарбовим покриттям.
- Експрес-діагностика місць механічних пошкоджень поверхні авіатехніки.
- Розробка електропровідного композитного матеріалу з вуглецевими нанотрубками, а також технології виготовлення та неруйнівного контролю нагрівальних елементів для протиобліднювальної системи літака.

Протягом багатьох років Михайло Леонідович є заступником Голови Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики з міжнародної співпраці. Його діяльність спрямована на просування вітчизняного неруйнівного контролю та суміжних галузей у рамках загальноєвропейського та всесвітнього партнерства на благо промисловості та наукової спільноти.

Він успішно координував участь українських спеціалістів у визначних міжнародних конференціях з НК, як то: 9-а Європейська конференція з

НК (Берлін, Німеччина, 2006 р.); 4-а Міжнародна конференція з НК (Ханья, Греція, 2007 р.); Ізраїльська національна конференція з НК (2008 р.); 17-а Всесвітня конференція з НК (Шанхай, Китай, 2008 р.); 18-а Всесвітня конференція з НК (Дурбан, ПАР, 2012 р.); Національна конференція з НК (Загреб, Республіка Хорватія, 2013 р.); 11-а Європейська конференція з НК (Прага, Чехія, 2014 р.).

У 2009 р. М.Л. Казакевича було обрано до Міжнародної академії неруйнівного контролю (ANDTI), а протягом 2012–2015 рр. він гідно представляв Україну у Раді директорів Європейської федерації з НК (EFNDT).

Вельмишановний Михайле Леонідовичу!

З нагоди Вашого славного ювілею щиро бажаємо Вам міцного здоров'я, безмежного сімейного щастя, невичерпного натхнення у науковій та викладацькій діяльності, народження нових творчих ідей та їхньої успішної практичної реалізації!

Нехай Ваші високі ділові та людські якості, вміння розв'язувати найскладніші наукові завдання та незмінний оптимізм і надалі приносять успіх та слугують дороговказом для Ваших колег та учнів!

*З глибокою повагою та шаную
Правління Українського товариства НКТД*

Вітаємо нових індивідуальних членів Українського товариства НКТД

- **Ільчишина Василя Михайловича**
к.т.н., доцента кафедри «Залізничний транспорт» Національного університету «Львівська політехніка»
- **Ковальчука Віталія Володимировича**
д.т.н., професора кафедри «Залізничний транспорт» Національного університету «Львівська політехніка»
- **Петрика Валентина Федоровича**
к.т.н., доцента кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Підтвердили членство в УТ НКТД на новий термін

- **Баб'як Микола Олександрович**
к.т.н., доцент кафедри «Залізничний транспорт» Національного університету «Львівська політехніка»
- **Владіміров Сергій Альбертович**
директор ТОВ Науково-технічний центр «Січ Серт», м. Запоріжжя
- **Єременко Володимир Станіславович**

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

- **Мокійчук Валентин Михайлович**
к.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Паздрій Ольга Ярославівна**
PhD, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Паренюк Дмитро Володимирович**
PhD, старший викладач кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Терещак Юрій Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри «Залізничний транспорт» Національного університету «Львівська політехніка»
- **Щербань Анастасія Павлівна**
к.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОНІТОРИНГ БЕЗПЕКИ РОЗПОДІЛЬЧИХ ГАЗОВИХ МАГІСТРАЛЕЙ У ПОБУТІ ТА НА ВИРОБНИЦТВІ

В.О. Троїцький

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

E-mail: usndt@ukr.net; ndt.inpat@gmail.com

Щодня в Україні відбуваються десятки пожеж і вибухів через національні недоліки ризик-менеджменту у газовому господарстві. З трьох компонентів розвитку газового господарства – економічного, екологічного та соціального, найважливішим зараз в Україні є соціальний. Можна запобігти значною мірою виникненню пожеж у побуті та на виробництві з вини зношення обладнання, низького рівня його технічного обслуговування та військових дій. Треба пам'ятати, що точку витоку газу можна визначити лише за допомогою неруйнівного контролю. Газові індикатори (газові прилади) знаходять лише зону наявності витоку газу, а не координати точки витоку, образ чи геометрію несутцільності.

Якщо підняти рівень ризик-орієнтованого мислення керівників і виконавців робіт, то кількість пожеж, що спричинені неправильною експлуатацією газових мереж і приладів, зменшиться. Міжнародний досвід показує, що вдосконалення менеджменту на кілька порядків (у 10...100 разів) є менш затратним, ніж оновлення постраждалих газових мереж.

Наведемо один характерний приклад, який показує, до чого призводять недоліки у підготовці виконавців робіт у газовому господарстві, погано зорієнтованих на можливість створення умов для пожеж.

Херсонський ЕТЦ звернувся до ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України з проханням визначити причину займання житлового будинку. З місця пожежі було вилучено зварне з'єднання, яке є частиною газопроводу введення в будівлю, виготовлене з поліетиленової труби діаметром 25 мм, що були з'єднані терморезисторним зварюванням із накладним нагрівальним елементом.

Були проведені наступні дослідження:

- зовнішній візуальний огляд двох патрубків та з'єднувальної муфти;
- рентгенографія з'єднань частин введення газопроводу в будівлю;
- перевірка електричного ланцюга муфти, її електричного опору;

– контроль герметичності зварного з'єднання.

Візуальний огляд показав, що муфта містить вм'ятини, що утворилася від засобів кріплення та затискача, що підтверджують її механічне навантаження при монтажі. Обидва патрубки, що з'єднані, мають сліди припасування їхніх поверхонь ножем під внутрішній діаметр муфти. Припасування виконані ножем без використання спеціального інструменту. Поверхня труб у місті стику з муфтою має ледве помітні ребра плоских слідів від ножа. Таким чином, поверхня труб була полігранною, що призвело до зазорів, розмір яких досягав 0,1 мм. З часом лакування висохло, що призвело до втрати герметичності. Скільки ще таких необережно зроблених з'єднань експлуатуються, ніхто не знає! Поліетиленові труби – предмет делікатний. Помітити 0,1 мм на поверхні дуже важко, тим більше після лакування!

Було перевірено внутрішній устрій з'єднувальної муфти радіографічним методом за допомогою:

- рентгенівського апарата РАП 150/300;
- радіографічної плівки FOMA-R7;
- чутливості (для визначення діаметра спіралі)

10FeEN.

Рентгенограма показала абсолютну цілісність спіралей, що дозволяє допустити дотримання регламенту процесу зварювання. Вірогідність цього підтвердило відсутність розриву нагрівальних спіралей та стандартні значення її електричного опору 5,8 Ом.

Однак контролем на герметичність бульбашковим методом зварного з'єднання було виявлено негерметичність стиків обох труб. Усі ці недоліки можна було встановити рентгеном, як на початку експлуатації, так і в процесі експлуатації даного з'єднання, що не було зроблено. Така серйозна негерметичність була б виявлена під час першого ж технічного обслуговування. Звідси випливає, що без ризик-орієнтації (менеджменту) наявність документів прийняття та здачі в експлуатацію не є гарантією газової безпеки! Порядунок – лише в свідомості, у ризик-менеджменті робітників газо-

вого господарства! Це було до війни та, на жаль, може бути й після завершення війни!

Ризик-орієнтований менеджмент потребує незалежного від виконавця робіт контролю. У наведеному прикладі вже під час здачі об'єкта в експлуатацію з'єднання було потенційно негерметичним! Унаслідок порушення технології в місті стиковки з часом розвивається негерметичність. Тому для всіх з'єднань газових мереж важливо виконувати вимоги нормативних документів та пам'ятати про можливість рентгенівського просвічування з'єднань газових магістралей. На жаль, ці можливості в нашій країні не реалізуються. А між тим, лише рентгенівським просвічуванням можливо знайти замальовану негерметичність, яка закрита фарбою, мастилом та ін. Така точка з часом відкривається.

Зварні шви труб малого діаметра частіше виконуються в складних просторових положеннях та обмежених умовах, тому часто мають сховані тріщини та непровари. Деякий час тріщина, що покрита фарбою, забезпечує герметичність. Але з часом, через різні фізичні процеси (вібрації, вологість, коливання температури) відбувається розгерметизація. Тому витіки газу в побуті, на газових станціях, у виробничих приміщеннях часто виникають внаслідок неякісних з'єднань, які після тривалої експлуатації втрачають герметичність, але залишаються міцними та зовні благополучними.

У нормативних документах щодо газорозподільних трубопроводів є вимога контролю якості за допомогою рентгенівського просвічування. Однак, зазвичай, на практиці дослідження зварних з'єднань проводяться тільки бульбашковим контролем. Тоді як лише рентгенівський контроль може знаходити приховані несучільності, які з часом розвиваються у наскрізні дефекти. На рис. 1 наведено рентгенограму суцільного кільцевого зварного з'єднання з поздовжнім, поки герметичним зварним з'єднанням, що має приховану поздовжню тріщину. Є ризик, що з часом цей поздовжній шов розкриється і буде негерметичний. Таку «благополучну» трубу неможна залишати, вона має бути замінена, не дивлячись на те, що вона поки герметична. Ризик буде знижений,

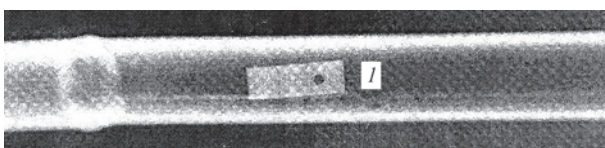


Рис. 1. Рентгенограма кільцевого шва газорозподільної труби діаметром 1'', що виконана за допомогою рентгенівського апарата МИРА-2Д ($F = 300$, $t = 9$ с), R-плівка KODAK YS800, флюороскопічний екран

якщо цієї труби не буде в магістралі. Це є прикладом ризик-менеджменту.

До труб малого діаметра, з яких складаються газорозподільні магістралі, часто добратися не просто, оскільки вони розташовані незручно в різних просторових положеннях, а роботи із застосуванням рентгенівського апарата потребують відповідних підходів. Тому для виконання рентгенівського контролю труб малого діаметра рекомендується використовувати пристрої, що подібні до показаного на рис. 2.

Просвічування можливо виконувати на R-плівку чи із застосуванням твердотілого R-перетворювача, тобто рентгенотелевізійного контролю (РТК). У випадку РТК зображення внутрішніх непроварів миттєво з'являється на екрані монітору. Зони розташування прихованих внутрішніх несучільностей підлягають ремонту та повторному рентгенівському просвічуванню.

Пристрій ТРУ-1 (рис. 2) застосовується для кріплення на трубі, що контролюється, портативного імпульсного апарата в різних просторових положеннях, під стелею, вертикально, горизонтально й т.і. Універсальність цього приладу досягається за рахунок використання постійних магнітів.

Основні технічні характеристики ТРУ-1:

Призначення – кріплення R-апарату на трубі, що просвічується, діаметром 3/4'' та більше в будь-яких просторових положеннях.

Рентгенівські імпульсні апарати типу МИРА-2Д, АРИНА-02 та ін.

Фокусна відстань (від поверхні труби до R-апарата) регулюється в межах 0...700 мм.

Кут нахилу випромінювача до нормалі $\pm 60^\circ$.

При максимальній фокусній відстані (700 мм) допустиме навантаження на платформу – до 25 кг.

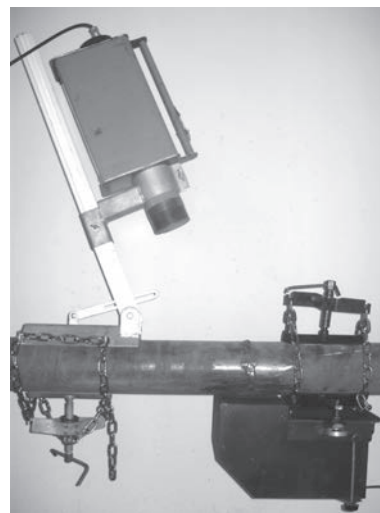


Рис. 2. Універсальне трубне кріплення, що регулюється (ТРУ-1), яке застосовують для закріплення рентгенівського апарата на трубі, що контролюється

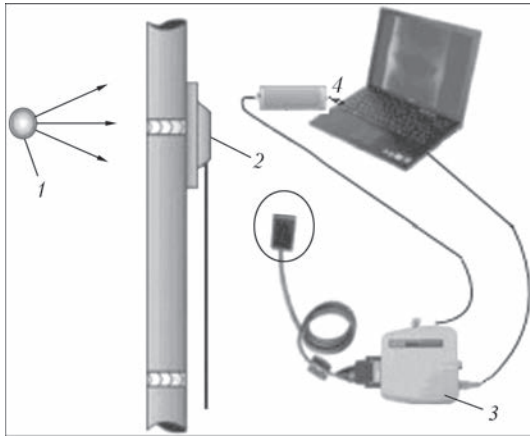


Рис. 3. X-ray міні технологія на базі портативного твердотільного РТК-перетворювача: 1 – випромінювач, 2 – твердотільний перетворювач, 3 – блок посилення, 4 – цифрове зображення рентгенограми на екрані монітора

Таким чином, в Україні є всі технічні засоби для скорочення вибухів від газових пожеж, але не вистачає достатнього розвитку ризик-орієнтованого менеджменту в газовому господарстві. Необхідно вивчити досвід США, Німеччини, Японії, де експлуатація газових магістралей проводиться з періодичним незалежним їх дослідженням фізичними методами НК.

Інтернет-портали багатьох фірм торгують приладами в Україні, різними видами газових індикаторів, які мають бути у кожного інспектора. Газовим індикатором можна легко встановити зону витoku газу, але встановити точку та причину витoku дуже важко. Причин розгерметизації може бути багато, в тому числі й за вини зварних з'єднань. Наскрісні дефекти можуть бути первинними чи вторинними, тобто утворюватися в процесі експлуатації під впливом вібрацій, агресивної середовища бойових дій.

Усі зафарбовані під час виготовлення дефекти (пори, тріщини, не провари) та інші потенційно небезпечні місця, де можуть утворюватися негерметичності, з великою вірогідністю виявляються за допомогою рентгенівського контролю, який необхідно проводити як під час виготовлення, так і в процесі експлуатації газових розподільчих мереж. В якому об'ємі та наскільки часто це треба робити

Таблиця 1. Загальноприйнятої одиниці течі

Основна розмірність потоку, л.мкм/с	10 ³	760	2,5·10 ⁻⁴
Розмірності потоку, що зустрічаються у різних виробників	1 л.мм рт.ст/с	1 см ³ ат/с	1 см ³ ат/год

– задача ризик-менеджменту з урахуванням великої кількості конкретних обставин об'єкта. Відомо, що в газових магістралях великого діаметра та високого тиску, що перевіряють внутритрубними магнітними та ультразвуковими дефектоскопами, знаходять до 100–200 дефектів на 1 км, які підлягають ремонту. Іноді ділянку траси припиняють експлуатувати та паралельно прокладають новий трубопровід, це дуже конкретний ризик-менеджмент і він містить не лише матеріальні витрати, а й економічні, екологічні, соціальні та інші питання, які дуже важливі у воєнний час.

Повертаючись до контролю герметичності за допомогою течешукачів, яких існує досить багато, потрібно пам'ятати, що крім загальноприйнятої одиниці течі – л.мкм/с, тобто 1 м/с при тиску 1 мм рт.ст., торгуючі організації використовують й інші розмірності, відповідність яких наведено в табл. 1. Чутливість вимірюється в одиницях потоку, що витікає.

Для перевірки чутливості приладів і металів течешукування застосовують атестовані контрольні течі. Основним показником оцінки негерметичності слугує порівняльний аналіз результатів, що отримані при витoku пробного газу через контрольні течі та через нещільності об'єктів, що контролюються. Ці операції проводять повірочні метрологічні служби. Течешукач повинен бути повірений, а оператор – атестований та мати сертифікат, що підтверджує його кваліфікацію, орієнтований на газонебезпечний менеджмент та періодичність застосування РТК.

Існує багато фізичних методів контролю герметичності, найпростіші з них наведені в табл. 2. На відміну від газових індикаторів (приладів), методи НК є дуже ефективними для визначення точки течі та координат точки негерметичності.

Усі наведені в табл. 2 фізичні методи контролю герметичності можуть бути легко засвоєні. Пе-

Таблиця 2. Фізичні методи контролю герметичності

№ п/п	Метод НК	Ознаки			
		Речовина, що досліджується	Індикація течі	Чутливість	
				л.мкм/с	см ³ ат/год
1	Пневматичний	Повітря, азот	Бульбашковий	5·10 ⁻²	2000
2	Хімічний	Аміачно-повітряні суміші, вуглекислий газ	Плями на стрічці, пасти	5·10 ⁻²	20
3	Гідравлічний	Вода	Теча	5·10 ⁻²	2000
4	Керосиновий	Гас	Плями на фоні крейди	5·10 ⁻³	200
5	Люмінісцентно-гідравлічний	Вода та пенетрант	Теча та світіння	5·10 ⁻⁴	2

ревірка приміщень проводиться згідно зі схемою поетапної діагностики, яка починається з провітрювання приміщення, де знаходиться газове обладнання:

– наявність витоку газу в приміщенні – газовий течешукач;

– місце витоку – один із методів, що вказані в табл. 2;

– встановлення причин – візуальний контроль і рентгенівське просвічування, металографія та інші фізичні методи неруйнівного контролю.

Під час виконання бульбашкового методу замість мильних розчинів можна використовувати деформуючі маси. Це – пінні індикатори, що мають чутливість $1 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ л.мкм/с та дисперсні маси чутливістю до 10^{-3} л.мкм/с. Основою пінного індикатора є миючий засіб (10 %), гліцерин (до 90 %) з хромпиком (0,01 %). Дисперсна маса часто містить в якості наповнювачів і барвників двоокис титану, каолін, метилен та інгібітор. Варіантів таких композицій багато.

Суть хімічних методів, які на два порядки більш чутливі, ніж інші прості методи (табл. 2), полягає в тому, що на контрольовані місця накладають паперову або тканинну стрічку з шаром індикаторної маси. У трубопроводі створюють невеликий тиск пробного газу (суміші з CO_2 , з аміаком чи азотом), який вступає в хімічну реакцію з масою індикаторів і в місцях витоків утворює кольорові плями, що легко виявити. У літературі з контролю герметичності описано багато рецептів хімічних індикацій витоків.

Таким чином, в Україні є все необхідне для зменшення побутових і виробничих пожеж на газорозподільних магістралях. Необхідно розвивати та посилювати роботи з ризик-менеджменту, інакше соціальна напруга буде зростати. Газові магістралі старіють, рівень технічної культури на місцях має зростати.

Хочу звернути увагу, що досить часто доводиться допомагати органам Держнагляду, судовим експертам розбиратися в причинах трагедій. Найчастіше аварії з газом відбуваються під ранок, у холодну пору року, коли жителі великих багатоповерхівок опалюють приміщення газом у щільно закритих приміщеннях для збереження тепла.

Витік газу в приміщенні, на кухні, у ванній кімнаті вдень, навіть при поганій витяжці не такий небезпечний через переміщення людей в будівлі, відкривання-закривання дверей та інше. Вранці, коли напівсонна господиня вмикає світло, вмикає світла може дати іскру або вона запалює сирником газову плиту, то виникає катастрофа для всього під'їзду

або навіть будинку. Такі газові вибухи та пожежі відбуваються не тільки в побуті, а й на виробництві в газорозподільному господарстві. Чому це не відбувається в західних країнах, що треба робити, щоб уникнути цих трагедій? Потрібно вивчати їхній дослід експлуатації газових мереж.

Зрозуміло, що першопричиною трагедій є витік газу у замкненому приміщенні. Пропан, бутан та інше паливо майже не має запаху. Для того, щоб люди могли звернути увагу на витік газу, до нього там додають пахучий часниковий газ. Цей допоміжний захист через економію у нас не виконується. Що треба робити, не змінюючи нашу ментальність? Вихід є – невідомчий НК!

Інспектори, виробники газорозподільного обладнання мають знати основи газової дефектоскопії. Не можна шукати точки негерметичності газовими індикаторами, слиною, сирниками, іншими засобами та атестувувати свіжезафарбовані місця, якщо метал, пластмаса (полістирол тощо), газорозподільні елементи, місце, що вивчається, вкриті фарбою, яка капілярними силами затягується та тимчасово закриває негерметичності. Свіжо зафарбовані негерметичностей можуть у будь-який час відкритися. Якими б засобами сумлінний виконавець робіт не перевіряв свіже зафарбоване газорозподільне обладнання, він не знайде витік газу, який обов'язково з часом виникне, коли фарба постаріє, засохне.

Я бачив, як 27.03.2019 р. у м. Кропивницький пролунали 7 вибухів з інтервалом 20...40 хв, місто освітло заграва пожежі. Вибухнула міська газозаправна станція, де постраждало багато сумлінних виконавців та згоріло 10 авто на прилеглий автостанції. Тільки низька технічна культура, відсутність ризик-орієнтованої підготовки виробників та експлуатаційників є причинами подібних трагедій, чого не має бути в сучасному світі!

Список літератури

1. Цопа В. (2017) Ризик-орієнтоване мислення: основи, навчання та впровадження. *Охорона праці*, **10**, 14–20.
2. Троїцький В.О., Карманов М.М., Шевченко І.Я. (2015) Майбутнє неруйнівного контролю. *Охорона праці*, **12**, 20–24.
3. Ісаснко В. (2017) Сам собі не газувик. *Охорона праці*, **8**, 36–40.
4. Троїцький В.О. (2009) *Контроль якості зварних з'єднань. Учебний посібник*. Фенікс.
5. Троїцький В.О. (2022) *Моніторинг стану конструкцій. Введення в професію*. Київ.
6. Троїцький В.О. (2022) *Моніторинг труб магістральних та промислових трубопроводів*. Київ, Інтерсервіс.



**ВІЙСЬКОВА ЧАСТИНА
А5002**

ЩОДЯКА

НАГОРОДЖУЄТЬСЯ


ТРОЇЦЬКИЙ Володимир Олександрович

За вагомий внесок в обороноздатність самохідного артилерійського дивізіону та неоцінену допомогу нашій військовій частині направлену на захист суверенітету та територіальну недоторканість України.

12.03.2026 р.,
м. Суми



Щ
Сухопутні
війська


полковник
Віталій Омельченко,
командир
військової частини А5002

Рік 2009

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

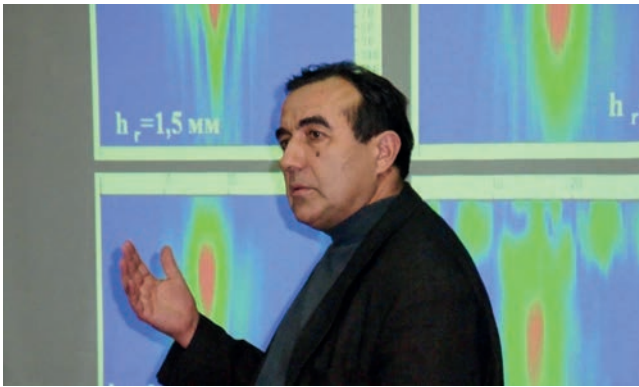
14-а Міжнародна науково-технічна конференція «Леотест-2009» у Славську

Конференція була присвячена електромагнітним та акустичним методам неруйнівного контролю матеріалів та виробів і проходила в лютому у Славську.

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

(Львів) (організаційне бюро конференції).

Як і щороку, найбільшу кількість доповідей внесли на суд колег науковці Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України. Жвавий інтерес та цікаву дискусію викликали доповіді гостей з Польщі. Цікаві доповіді зробили науковці провідних установ, підприємств та ВНЗ України: Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, УкрНДІтехнології машинобудування (Дніпропетровськ), Авіакомпанії «Міжнародні авіалінії України», Івано-Франківського наці-



онального технічного університету нафти і газу, Національного університету «Львівська політехніка», Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут», Кіровоградського Національного технічного університету.

У холі конференц-зали проходила виставка засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики. У ній брали участь: НВФ «Ультракон-Сервіс» (Київ), НВФ «Промприлад» (Київ), НВФ «Інтрон-СЕТ» (Донецьк), НВФ «Спеціальні

наукові розробки» (Харків), фірма «Шерл» (Київ), Центр «Леотест-Медіум» (Львів).

Конференція пройшла в діловій та доброзичливій атмосфері. Її учасники мали досить часу для плідних дискусій та відпочинку. Проживали учасники конференції в пансіонаті «Бойківщина», що розташований на околиці Славська в оточенні багаторічних сосен, ялин та смерек, поблизу гірськолижних трас.

6-а Національна науково-технічна конференція та виставка «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»

Конференція була організована УТ НКТД і Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за сприяння Національної академії наук України, Міжнародного комітету з НК (ICNDT) і Європейської федерації з НК (EFNDT) і відбулася в червні 2009 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (пленарні засідання) і Виставковому центрі «КиївЕкспоПлаза» (засідання наукових секцій).

На конференцію було представлено більше 90 доповідей, тематика яких була присвячена теоретичним питанням методів НК, моніторингу технічного стану й оцінці залишкового ресурсу об'єктів при експлуатації, стандартизації, сертифікації та метрологічному забезпеченню в галузі НК і ТД та іншим проблемам.

Паралельно з засіданнями секцій проходила виставка приладів і засобів для НК і ТД.





17-та Міжнародна конференція та виставка «Сучасні методи і засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики»

Конференція відбулася в жовтні 2009 р. в Ялті. Організатори конференції: УІЦ «НАУКА. ТЕХНІКА. ТЕХНОЛОГІЯ» (Київ) та НВП «Машинобудування» (Дніпропетровськ) за підтримки УТ НКТД та Дніпропетровського національного університету. Генеральний спонсор – МЧТПП «ОНІКО» (Київ).

На конференцію було представлено 11 пленарних, 77 секційних та 24 стендові доповіді про о-

танні результати досліджень і розробок за широким спектром проблем НК, діагностування та прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, визначення фізико-механічних характеристик матеріалів, підготовки та сертифікації фахівців з НК, розробки нових і вдосконалення чинних нормативних документів з НКТД та інших актуальних питань.

Уперше в історії українських конференцій з неруйнівного контролю окремо було виділено та





розглянуто проблеми в атомній енергетиці та металургійній промисловості.

Свої розробки на виставці, що проходила паралельно з конференцією, представили: НВП «Машинобудування» (Дніпропетровськ), МЧТПП «ОНІКО», Асоціація «ОКО», НВФ «Ультракон-сервіс», НВФ «Промприлад», НВФ «Діагнос-

тичні прилади», ТОВ «Шерл», НВФ «Ультракон», ТОВ «Карл Цейсс», Національний авіаційний університет (Київ), Компанія «Сперанца» (Жовті Води), НВП «Інтрон-СЕТ» (Донецьк), ТОВ «ДДАП-РАКС» (Дніпродзержинськ), НТК «Солар-1» (Харків) та ін.

КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ ТА ВИСТАВОК

07–10 липня 2026	Тулуза, Франція	12th European Workshop on Structural Health Monitoring (12-й Європейський семінар з моніторингу технічного стану конструкцій)	France Society of NDT
25–27 серпня 2026	Мілан, Італія	The 4th World Congress on Condition Monitoring (WCCM2026) (4-й Всесвітній конгрес з моніторингу технічного стану)	The International Society for Condition Monitoring
08–10 вересня 2026	Телфорд, Велика Британія	63rd Annual British Conference on Non-Destructive Testing (NDT 2026) (63-я щорічна Британська конференція з НК)	British Society for NDT
08–10 вересня 2026	Ліон, Франція	37th Conference of the European Working Group on Acoustics (EWGAE 2026) (37-а конференція Європейської робочої групи з акустичної емісії)	Європейська робоча група з АЕ
12–15 жовтня 2026	Коламбус, США	ASNT 2026 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
02–22 листопада 2026	Online	International Online Conference on Nondestructive Testing 2026 (NDTonline 2026) (Міжнародна онлайн конференція з НК)	NDT.net
03–05 листопада 2026	Гонконг, Китай	1st Asia Non-Destructive Testing Equipment & Technology Expo (1-а Азіатська виставка з обладнання й технологій НК)	China NDT Management Association
17–18 листопада 2026	Хайдебад, Індія	36th Annual Conference & Exhibition on Non-Destructive Evaluation (NDE 2026) (36-а щорічна конференція та виставка з оцінки методами НК)	Indian Society for NDT
17–18 листопада 2026	Селангор, Малайзія	8th Malaysia International NDT Conference and Exhibition (8th MINDTCE) (8-а Малайзійська міжнародна конференція та виставка з НК)	Malaysian Society for NDT
10–11 березня 2027	Сінгапур	6th Singapore International Non-Destructive Testing Conference and Exhibition (SINCE 2027) (6-а Сінгапурська міжнародна конференція та виставка з НК)	NDT Society of Singapore
15–18 червня 2027	Квебек, Канада	4th International Conference & Exhibition on NDE 4.0 (4-а Міжнародна конференція з інтелектуального НК)	American Society for NDT
30 серпня–03 вересня 2027	Кобе, Японія	NDT Next 2027 (Міжнародна конференція з НК для нового покоління)	Asia Pacific Federation for NDT
15–19 травня 2028	Буенос-Айрес, Аргентина	21st World Conference on Non-Destructive Testing 2028 (21-а Всесвітня конференція з НК)	Argentine Society for NDT



Центр сертифікації при Українському товаристві
неруйнівного контролю та технічної діагностики

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

ЗАПРОШУЮТЬ СПЕЦІАЛІСТІВ

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

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

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

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

в 12 виробничих секторах:

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

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

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

Три кроки до сертифікату:

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

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