

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

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

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар);

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.П. Казакевич

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

О.М. Карпаш

Харківський нац. ун-т Повітряних Сил імені Івана

Кожедуба, м. Івано-Франківськ

Й. Мірчев

Інститут механіки, Софія, Болгарія;

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук,

В.М. Учанін (заст. гол. ред.)

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

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

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХПІ», м. Харків;

М.Г. Чаусов

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий редактор – О.Т. Зельніченко,

Міжнародна Асоціація «Зварювання», м. Київ

## Видавець

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

## Адреса редакції

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

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Журнал входить до переліку затверджених МОН

України видань для публікації праць здобувачів

наукових ступенів за спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу.

ISSN 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print

Doi.org/10.37434/tdnk

Журнал зареєстровано Національною радою України з

питань телебачення і радіомовлення 09.05.2024,

ідентифікатор медіа R30-04568.

## Передплата 2025

Передплатний індекс 74475. 4 випуски на рік (видається

щоквартально). Друкована версія/електронна версія:

1200 грн. за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів видавець журналу

відповідальності не несе.

## ЗМІСТ

## НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ЮХИМЕЦЬ П.С., НИРКОВА Л.І., ДМИТРИЄНКО Р.І.,  
КАМИНСКИ Н., ZARUBA С., LINHARDT P., BALL G.,  
ЄГОРЕНКО В.М. Корозійно-механічний стан теплопроводу  
після тривалої експлуатації ..... 3

SAVIN A., STEIGMANN R., STANCIU M.D., MORARAS C.I.,  
DOBRESCU G. Оцінка механічних властивостей  
композитів армованого вуглецевим волокном пластику та  
моделювання його відшарування..... 13

ШАРАБУРА О.М., МУРАВСЬКИЙ Л.І., КУЦЬ О.Г. Виявлення  
круглих підповерхневих дефектів у шаруватих композитах  
за допомогою оптико-акустичної системи неруйнівного  
контролю ..... 18

ТОРОП В.М., РАБКІНА М.Д., ДАВИДОВ Є.О. Дослідження  
міжкристалітного корозійного розтріскування зварних  
з'єднань трубопроводів Чорнобильської АЕС. Матеріа-  
лознавчий аспект ..... 23

БЕЗВЕСІЛЬНА О.М., ТОЛОЧКО Т.О., ТРОХИМЧУК Д.В.  
Основні похибки балістичного гравіметра ..... 32

## ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

ЛОБАНОВ Л.М., ШУТКЕВИЧ О.П., КИЯНЕЦЬ І.В.,  
ШКУРАТ І.Л., ШИЯН К.В., САВИЦЬКИЙ В.В. Виявлення  
внутрішніх дефектів надмалих розмірів у алюмінієвих  
зварних з'єднаннях методом широгографії ..... 38

ТРОЇЦЬКИЙ В.О., КАРМАНОВ М.М., МИХАЙЛОВ С.Р.,  
ШАЛАЄВ В.О. Підвищення точності рентгенівського 2D  
сканування з використанням мінісенсора ..... 43

## ІНФОРМАЦІЯ

Розробки Асоціації «ОКО» на ринку засобів  
неруйнівного контролю рейок..... 47

Щодо вдосконалення сертифікації спеціалістів  
і атестації лабораторій неруйнівного контролю  
в атомній енергетиці ..... 49

Пам'яті А.Я. Недосеки..... 50

Новини Українського товариства неруйнівного контролю  
та технічної діагностики ..... 51

Видання журналу підтримують:

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

**EDITORIAL BOARD**

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

**Publisher**

International Association «Welding»

**Address of Editorial Office**

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

The Journal is included in the list of publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine for the publication of works of applicants for academic degrees in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal.  
ISSN 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print  
Doi.org/10.37434/tdnk

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

**Subscription 2025**

Subscription index 74475.

4 issues per year (issued quarterly), back issues available.  
\$128, subscriptions for the printed (hard copy) version, air postage and packaging included.

\$104, subscriptions for the electronic version.

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

**CONTENT**

**SCIENTIFIC AND TECHNICAL**

*YUKHYMETS P.S., NYRKOVA L.I., DMYTRIENKO R.I., KAMINSKI H., ZARUBA C., LINHARDT P., BALL G., YEHO-RENKO V.M.* Corrosion-mechanical state of the heat pipeline after long-term operation ..... 3

*SAVIN A., STEIGMANN R., STANCIU M.D., MORARAS C.I., DOBRESCU G.* Evaluation of the mechanical characteristics of CFRP composites and modeling of the delamination phenomenon... 13

*SHARABURA O.M., MURAVSKY L.I., KUTS O.G.* Detection of circular subsurface defects in laminated composites using optical-acoustic nondestructive testing system..... 18

*TOROP V.M., RABKINA M.D., DAVYDOV E.O.* Study of inter-crystalline corrosion cracking in welded joints of Chernobyl NPP pipelines. Materials science aspect..... 23

*BEZVESILNA O.M., TOLOCHKO T.O., TROKHYMCHUK J.V.* Main errors of the ballistic gravimeter..... 32

**INDUSTRIAL**

*LOBANOV L.M., SHUTKEVYCH O.P., KYVANETS I.V., SHKURAT I.L., SHYYAN K.V., SAVITSKY V.V.* Detection of internal microdefects in aluminum welded joints by the shearography method..... 38

*TROITSKIY V.A., KARMANOV M.N., MIKHAILOV S.R., SHALAEV V.A.* Increasing the accuracy of 2D X-ray scanning using a mini sensor..... 43

**INFORMATION**

Developments of the «OKO» Association in the market of non-destructive testing of rails ..... 47

Improving the certification of specialists and non-destructive testing laboratories in nuclear energy ..... 49

In memory of A.Ya. Nedoseka ..... 50

News of the Ukrainian society for non-destructive testing ..... 51

**JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:**

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

# КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИЙ СТАН ТЕПЛОПРОВОДУ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

П.С. Юхимець<sup>1</sup>, Л.І. Ниркова<sup>1</sup>, Р.І. Дмитрієнко<sup>1</sup>, Н. Kaminski<sup>2</sup>, С. Zaruba<sup>2</sup>, P. Linhardt<sup>2</sup>, G. Ball<sup>2</sup>, В.М. Єгоренко<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>TU Wien. 1040, Vienna, Karlsplatz, 13, Austria. E-mail: heinz.kaminski@tuwien.ac.at

<sup>3</sup>КП «Київтеплоенерго». 01001, м. Київ, пл. Івана Франка, 5. E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

Властивості металу стоншених в експлуатаційних умовах ділянок теплопроводу є необхідною складовою для визначення його реального стану, тому їх дослідження є актуальним завданням. У роботі досліджено корозійно-механічний стан теплопроводу зі сталі ВСтЗсп після понад 40 років експлуатації. На основі проведених досліджень встановлено, що корозія подавального трубопроводу інтенсивніша, ніж зворотного, а зовнішня корозія трубопроводів інтенсивніша за внутрішню. Розтріскування оксидного шару прискорюється зі зростанням напружень у діапазоні розрахункового тиску та призводить до активації корозійних процесів і утворення наскрізних дефектів, що перешкоджає руйнуванню за механізмом малоциклової втоми. Показано, що границя міцності та текучості сталі відповідають мінімальним нормованим значенням. Зниження пластичності металу подавального трубопроводу не перевищує 10 %, зворотного – нижче за мінімальне нормоване значення, що, вірогідно, пов'язане з деформаційним старінням. Найменш пошкоджений шар, прилеглий до внутрішньої поверхні труб, має підвищені характеристики міцності та пластичності завдяки технології їх виготовлення. Хоча гідравлічне випробування може не призвести до очікуваного руйнування в місці наскрізних дефектів, його ймовірність зростає зі збільшенням випробувального тиску. Бібліогр. 14, табл. 5, рис. 15.

*Ключові слова:* теплопроводи, корозія, механічні властивості, твердість, наскрізні дефекти

**Вступ.** Надійна робота теплопроводів життєво необхідна для безпеки населення, захисту навколишнього середовища та економічної стабільності. Процеси загальної і локальної корозії є одними з основних чинників зниження експлуатаційного ресурсу трубопроводів теплових мереж, а також погіршення механічних характеристик, деформаційного старіння та стійкості їх металу до руйнування. Корозія призводить до зменшення товщини стінки труби, виникнення концентраторів напружень, зниження опору зародженню та поширенню тріщин, що може спричинити руйнування трубопроводу при експлуатації і випробувальному тиску [1, 2].

Знати реальні механічні властивості металу трубопроводів після тривалої експлуатації необхідно для оцінювання їх фактичної міцності, залишкового ресурсу, дослідження причин відмови. Експериментальне визначення механічних властивостей трубних сталей 19Г і 17Г1С після тривалої експлуатації у газонафтопроводах виявило їх незначні зміни [3]. Водночас залишається недостатньо вивченим питання щодо впливу тривалої експлуатації на механічні властивості конструкційних матеріалів теплопроводів, що зазнають специфічних навантажень і впливу зовнішнього та внутрішнього середовища. Характерною особливістю трубопроводів теплової мережі після тривалої експлуатації є наявність локальних потоншень стінки внаслідок нерівномірної корозії до-

суть великої площі, які з часом можуть переходити до розряду критично потоншених ділянок, де спостерігаються пластичні деформації при тиску гідравлічного випробування та нижче. У [4, 5] наведено результати лабораторного моделювання роботи теплопроводу. Отримані дані щодо корозійно-механічних властивостей труби дали змогу обґрунтувати можливість малоциклового руйнування критичних потоншень і надати рекомендації щодо тиску періодичних гідравлічних випробувань теплопроводів. Дані про властивості металу ділянок, потоншених в умовах реальної експлуатації, є одним із необхідних компонентів для визначення їх дійсного стану, а, отже, їх дослідження є актуальним завданням.

**Об'єкт дослідження.** Для проведення досліджень було використано два фрагменти труб з глибокими корозійними виразками завдовжки ~2 м кожна, вирізані з подавального та зворотного трубопроводів магістральної теплотраси Д325, прокладених у непрохідному каналі (рис. 1). Обидва фрагменти за результатами періодичних гідравлічних випробувань (ГВ) визнані експлуатуючою організацією – КП «Київтеплоенерго» – непридатними до подальшої експлуатації і передані в ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Відповідно до технічної документації магістральний теплопровід із розрахунковими параметрами температури  $T_d = 150\text{ }^\circ\text{C}$  і внутрішнім

П.С. Юхимець – <https://orcid.org/0000-0002-8824-9024>, Л.І. Ниркова – <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>,

Р.І. Дмитрієнко – <https://orcid.org/0000-0001-8842-5051>, P. Linhardt – <https://orcid.org/0000-0002-4523-2185>

© П.С. Юхимець, Л.І. Ниркова, Р.І. Дмитрієнко, Н. Kaminski, С. Zaruba, P. Linhardt, G. Ball, В.М. Єгоренко, 2024



Рис. 1. Подавальний і зворотний трубопроводи в непрохідному каналі (а); наскрізні корозійні пошкодження подавального трубопроводу (б)

Таблиця 1. Хімічний склад металу труби

Джерело	Масова частина елементів, мас. %									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	As	Mo
[5]	0,14...0,22**	0,40...0,65	0,12...0,30	<0,055	<0,045	<0,30	<0,30	<0,30	<0,08	–
подавальна труба*	0,11	0,46	0,22	0,015	0,011	0,09	0,08	0,086	–	0,009
зворотна труба*	0,11	0,47	0,22	0,018	0,012	0,09	0,08	0,090	–	0,009

Примітки. \*Результати спектрального аналізу металу; \*\*відхилення від нижньої межі вмісту вуглецю не є ознакою браку [6].

Таблиця 2. Механічні властивості труб за сертифікатом\*

Джерело	$\sigma_t^{stm}$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
сертифікат	438...465	441...456	–	32..38
[6]	–	372...480	245	26
[7]	>372	>372	>225	>22

Примітка. \* $\sigma_t^{stm}$  – міцність на розрив металу зварного з’єднання;  $\sigma_r/\sigma_{0,2}$  – границя текучості/умовна границя текучості основного металу;  $\delta$  – відносне подовження.

Таблиця 3. Товщина заготовок

Номер з/п	Мінімальна товщина (мм) лівої/правої бокової грані заготовки
1	0,9/1,3
2	0,8/0,9
3	0,5/1,3
4	1,1/1,7
5	1,5/1,7
6	0,9/1,3

тиском  $P_d = 1,6$  МПа був змонтований у 1976 р. з електрозварних термооброблених труб 325×8 (зовнішній діаметр × товщина стінки, мм) зі сталі ВСтЗсп [6] (табл. 2, 3), покритих бітумно-перлітовою ізоляцією.

Для подальшого дослідження властивостей металу були відібрані заготовки з найбільш потоншених ділянок подавальної труби (табл. 3).

**Методи дослідження.** Корозійний стан. Візуально-вимірювальний контроль наданих фрагментів трубопроводу проводили згідно з [8], їх корозійний стан оцінювали згідно з [9]. Енергодисперсійну спектроскопію (EDS) оксидного шару проводили з використанням скануючого електронного мікроскопа Philips XL30-SFEG з блоком детектора EDAX Sapphire.

Експериментальна установка для дослідження впливу величини внутрішнього тиску на зов-

нішню корозію включала (рис. 2): заготовку № 4 (табл. 3); електрохімічну комірку з акрилового скла, приклеєну до поверхні зразка, що відповідає зовнішній поверхні труби, безкислотним клеєм із силіконового каучуку в зоні з невеликою кількістю видимих під мікроскопом дефектів оксидного шару; електроліт – розчин  $\text{NaHCO}_3$ , виготовлений з деіонізованої води з 500 мг/л  $\text{HCO}_3$ , обраний через його відносно інертну поведінку при корозії сталі та буферний ефект рН, що мінімізувало коливання потенціалу відкритого контуру; електрод порівняння срібло-хлоридне срібло (SSE) для безперервного вимірювання потенціалу відкритого контуру (ОСР).

Безперервне вимірювання ОСР використовувалося для виявлення утворення тріщин в оксидному шарі під час випробування на розтяг з кроком зусилля 200 Н зі швидкістю переміщення траверси 0,1 мм/хв і періодичними витримками 2 хв для стабілізації ОСР.

Механічні властивості металу зони з незначними корозійними пошкодженнями. Для дослідження механічних властивостей металу ( $\sigma_r$ ;  $\sigma_{0,2}$ ;  $\delta_5$ ;  $\psi$  – відносне звуження поперечного перерізу) виготовляли плоскі пропорційні ( $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$ ) зразки завтовшки 3 мм і з робочою частиною завширшки 8 мм з механічною обробкою обох поверхонь у напрямку товщини (рис. 3). Зразки вирізали з труб в окружному та поздовжньому на-

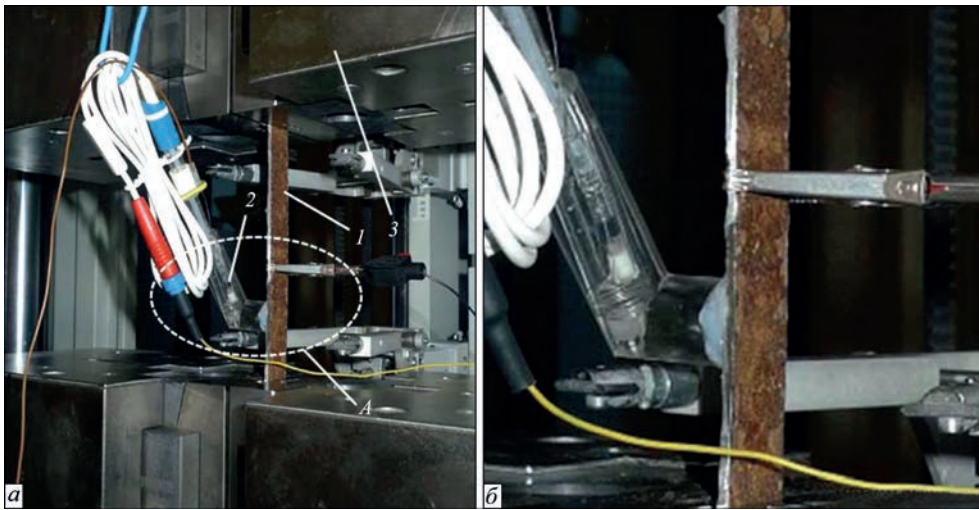


Рис. 2. Корозійна дослідна установка: 1 – заготовка № 4; 2 – електрохімічна комірка з SSE електродом порівняння, наповнена електролітом; 3 – траверса машини розтягу (а); позиція А (збільшено) (б)

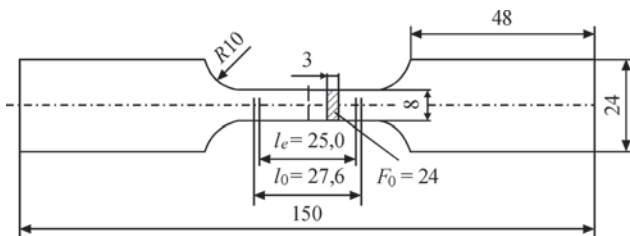


Рис. 3. Зразок для випробувань на розтяг:  $l_e$  – початкова база тензометра;  $l_0$  – початкова розрахункова довжина;  $F_0$  – початкова площа поперечного перерізу

прямок. Місця захватів окружних зразків перед фрезеруванням виправляли на пресі таким чином, щоби не деформувати робочу частину.

Механічні випробування проводили на універсальному випробувальному комплексі МТС-318.25 зі швидкістю деформації 2 мм/хв за температури  $\sim 22^\circ\text{C}$ , початкова база тензометра – 25 мм, інтервал опитування – 0,1 с.

*Механічні властивості металу найбільш потоншеної зони.* Випробування на розтяг зразка № 3 (рис. 4, а), виготовленого із заготовки № 3 (табл. 3), проводили на випробувальній машині Zwick Z050 згідно з [10] зі швидкістю деформації 1,25 мм/хв за температури  $\sim 23^\circ\text{C}$ , початкова база тензометра – 40 мм, інтервал опитування – 0,02 с.

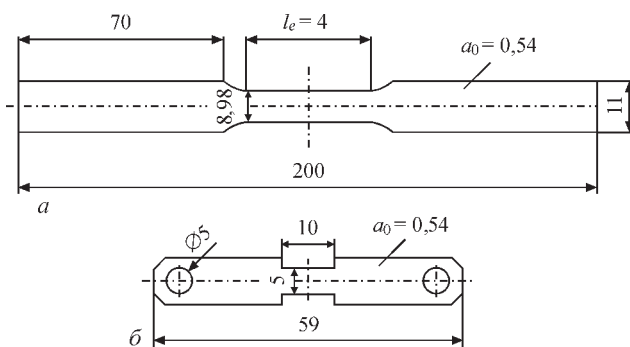


Рис. 4. Зразок для випробувань на розтяг:  $l_e$  – початкова база тензометра;  $l_0$  – початкова розрахункова довжина;  $F_0$  – початкова площа поперечного перерізу

За результатами випробувань визначали механічні властивості металу ( $\sigma_r$ ;  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$ ).

Випробування на розтяг зразків (рис. 4, б), виготовлених із заготовки № 1 (табл. 3), проводили на дилатометрі за постійної кімнатної температури. Для визначення границі міцності  $\sigma_r$  і границі текучості  $\sigma_{0,2}$  матеріалу використовували короткі зразки, що дало змогу оптимізувати обсяг механічного оброблення.

*Вимірювання твердості HV за низької сили.* Вимірювання твердості за Віккерсом HV1, HV0.3 проводили згідно з [11] за допомогою мікроскопа CARL ZEISS Axio Imager.M2m і твердоміра EMCO Test M1C 010.

*Розмір зерен.* Розмір зерна фериту та перліту в зоні вимірювання твердості визначали за допомогою мікроскопа CARL ZEISS Axio Imager.M2m при збільшенні 500:1 згідно з [12].

**Результати дослідів та їх аналіз.** Результати візуального огляду показали, що обидві труби – подавальна та зворотна – є одношовними, звареними струмами високої частоти. На момент огляду захисне покриття було практично відсутнє. Зовнішня поверхня обох труб вкрита шаром коричневих продуктів корозії, є залишки захисного покриття, ймовірно, бітумного. Виявлено локальні корозійні пошкодження на поверхні труб, ідентифіковані згідно з [9] як корозійні плями та поглиблення різного розміру. Внутрішня поверхня покрита шаром коричневих продуктів корозії, які легко відокремлюються від стінки труби та розсипаються. Корозія внутрішньої поверхні суцільна, рівномірна. Корозійний стан фрагментів труби незадовільний, значніші корозійні пошкодження має подавальна труба. Товщина стінки подавальної труби нерівномірно зменшена, ймовірно за рахунок корозії, і становить від 7...8 до 1...2 мм; товщина залишків захисного покриття становить 280...470 мкм. Візуально корозійні поглиблення на

зовнішній поверхні мають більшу глибину, ніж внутрішній, тому слід вважати, що зовнішня корозія інтенсивніша, ніж внутрішня. Корозійні поглиблення на зовнішній поверхні мають розміри: від 3×3 до 25×50 мм; в області найменшої товщини стінки виявлено 3 наскрізних корозійних дефекти розмірами ~7×5, 6×5, 13×7 мм (рис. 1, б). Корозійне руйнування, ймовірно, почалося з боку зовнішньої поверхні. На зворотній трубі відзначено потоншення стінки від 7...8 до 3...4 мм, товщина залишків захисного покриття – 0,25...6,7 мм.

На рис. 5 наведено результати мікроаналізу EDS оксидного шару подавального трубопроводу. Як видно, основним компонентом шару є залізо, імовірно, у вигляді оксидів FeO і Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, які утворилися внаслідок перебігу електрохімічної реакції між залізом і водою або її конденсатом з повітря. Потенціал відкритого контуру виявився достатньо чутливим до розтріскування захисного шару. Упродовж всього часу розтягування зразка спостерігали зміщення потенціалу до від’ємних значень від –0,527 до –0,565 В, що вказувало на втрату оксидним шаром захисних властивостей, імовірно, внаслідок розтріскування та відшаровування. За пружної деформації  $S < 1200$  Н, що з урахуванням товщини поперечного перерізу зразка ~2 мм у місці розташування електрохімічної комірки відповідає тиску  $P \approx 0,5$  МПа в трубопроводі D325, потенціал майже не змінювався та становив –0,523 В. При збільшенні напруження розтягу до 3000 Н потенціал відкритого контуру зменшився незначно, приблизно на 5...7 мВ, але при зростанні напруження від 3000 до 4000 Н відзначили різке зміщення потенціалу від –0,530 до –0,555 В, що обумовлено утворенням ділянок свіжеоголеного металу.

Опис сили та ОСР у часі (рис. 6) показує, що існує критичне пружне навантаження  $S = \sim 3000$  Н (що відповідає внутрішньому тиску  $P \approx 1,3$  МПа в трубопроводі D325 завтовшки  $a = 2$  мм у зоні потоншення), де ОСР швидко зменшується зі зростанням сили розтягу. Це свідчить про початок утворення глибоких тріщин в оксидному шарі, які значною мірою активізують локальні корозійні процеси.

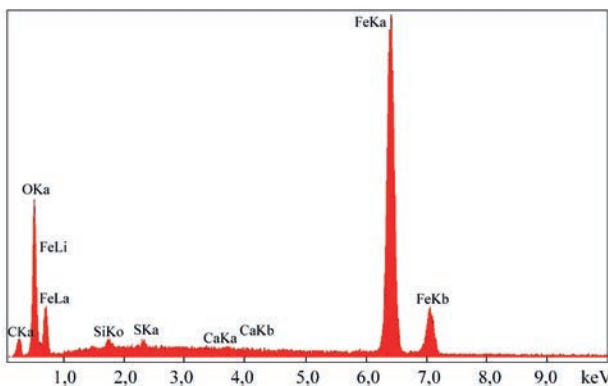


Рис. 5. EDS спектр оксидного шару на поверхні подавальної труби

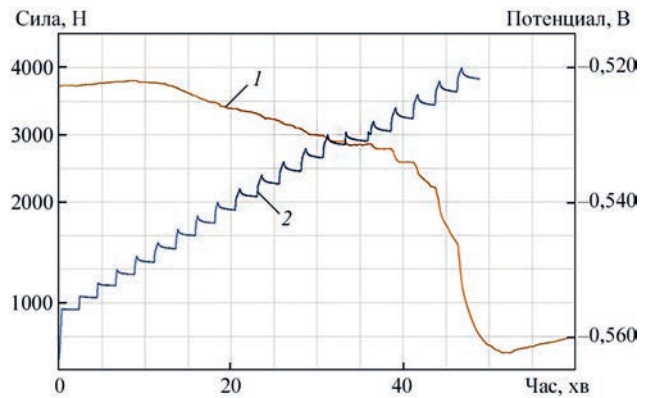


Рис. 6. Зміна потенціалу відкритого контуру зразка (1) за прикладення сили розтягу (2)

У той же час ОСР не надає кількісної інформації про процеси корозії, спричинені розтріскуванням. З іншого боку, справжній кількісний ефект на практиці навряд чи доступний за допомогою лабораторних експериментів, оскільки він залежить від великої кількості параметрів реального середовища (наявності вологи або рідкої води, хімічного складу води, можливих гальванічних ефектів у системі, циклів зволоження–висихання тощо).

Результати візуального контролю та вимірювання ОСР задовільно узгоджуються з даними корозійно-механічних випробувань труби D630 зі сталі 17Г1С [5], згідно з якими:

- за температури 80 °С (середня робоча температура подавального теплопроводу) швидкість корозії вдвічі вище, ніж за температури 40 °С (середня робоча температура зворотного трубопроводу);
- процес корозії прискорюється зі збільшенням робочого тиску (внутрішній тиск у подавальному трубопроводі в ~2 рази вищий, ніж у зворотному) і стає істотнішим, коли напруження періодично досягають рівня, що відповідає тиску гідравлічних випробувань ( $P = 2$  МПа).

Порівняння результатів випробувань на розтяг із даними сертифіката (рис. 7, 8) показує, що після тривалої експлуатації (понад 40 років) значення міцності на розтяг в осьовому напрямку  $\sigma_t^a$

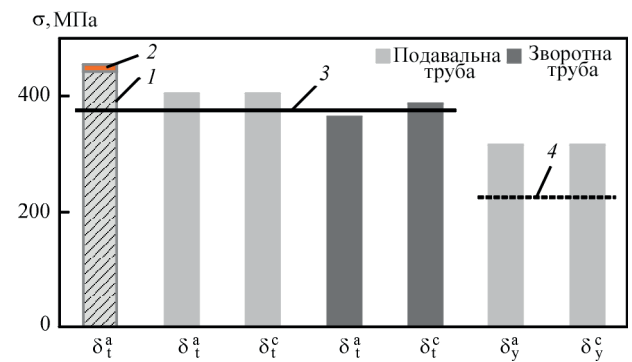


Рис. 7. Границя міцності ( $\sigma$ ) і текучості ( $\sigma_y$ ) металу подавальних і зворотних труб; верхні індекси:  $a$  – осьовий напрямок,  $c$  – окружний напрямок; 1 – дані сертифіката; 2 – діапазон значень; 3, 4 – найменше значення  $\sigma_r$ ,  $\sigma_y$  згідно з [7] відповідно

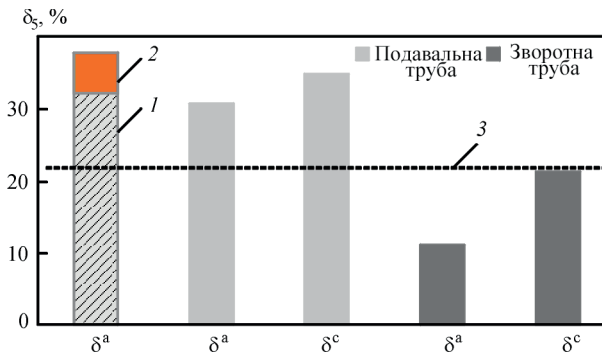


Рис. 8. Відносне подовження після руйнування  $\delta_5$  металу подавальних і зворотних труб; верхні індекси:  $a$  – осьовий напрям,  $c$  – окружний напрям; 1 – дані сертифіката; 2 – діапазон значень; 3 – найменше значення  $\delta_5$  згідно з [7].

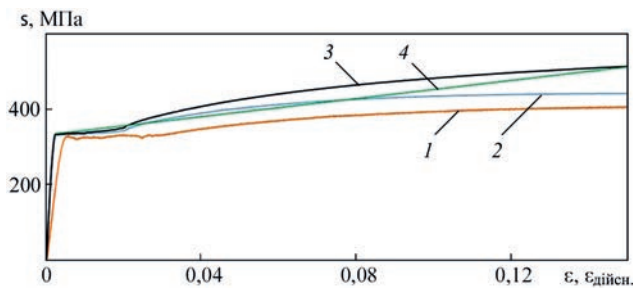


Рис. 9. Діаграми напружень розтягу зразків № 1 і № 3 в межах рівномірного потоншення: 1 – зразок № 1, регулярна діаграма ( $\epsilon = \Delta l_e / l_e$  ( $l_e$  – початкова база екстензометра,  $\Delta l_e$  – подовження початкової бази екстензометра),  $\sigma = S / F_0$ , ( $S$  – сила розтягу,  $F_0$  – площа поперечного перерізу зразка)); 2 – зразок № 3, регулярна діаграма; 3 – істинна діаграма напруження-деформації зразка № 3 ( $\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon)$ ;  $\sigma_{true} = \sigma(1 + \epsilon)$ ); 4 – апроксимована білінійна діаграма зміцнення зразка № 3

матеріалу подавального трубопроводу знизилося на  $\sim 10\%$ , зворотного трубопроводу – на  $\sim 18\%$ . Характеристики міцності  $\sigma_r$  і  $\sigma_{0,2}$  матеріалу подавального та зворотного трубопроводів в окружному та осьовому напрямках практично однакові та відповідають мінімальним вимогам нормативної документації, що узгоджується з результатами [4], отриманими за відсутності залишкової деформації. Зниження пластичності матеріалу подавального трубопроводу в круговому та осьовому напрямку не перевищує  $10\%$  і відповідає вимогам [7]. Зниження пластичності матеріалу зворотного трубопроводу суттєвіше, особливо в поздовжньому напрямку, де воно нижче за мінімальне нормативне значення на  $\sim 50\%$ , що, вірогідно, є наслідком деформаційного старіння в умовах локального згину та підвищує схильність до крихкого руйнування, зокрема за вибухового навантаження.

Результати випробувань на розтяг матеріалу подавального трубопроводу наведено в табл. 4 і на рис. 9.

Підвищені характеристики міцності та пластичності матеріалу значно потоншеної зони труби пояснюються відбором зразків на розтяг з найменш пошкодженого шару, прилеглому до внутрішньої поверхні труби, властивості якого є специфічними внаслідок технології виготовлення труб, а також впливом масштабного фактору (товщина зразків відрізняється в  $\sim 6$  разів).

Тенденції зміни твердості по товщині заготовок № 4 і № 6 (рис. 10, в) узгоджуються з ре-

Таблиця 4. Механічні властивості матеріалу подавального трубопроводу в осьовому напрямку

Номер зразка	1	3	D1-1	D1-2
Випробувальна машина	MTS	Zwick	Ділатометр	
Місце відбору зразка	незначна корозія	суттєве корозійне потоншення		
$\sigma_r$ , МПа	408,0	442,1	449,7	443,7
$\sigma_{0,2}$ , МПа	320,0	333,1	338,3	333,2
$\delta_5$ , %	30,8 ( $l_e = 25$ мм)	23,70 ( $l_e = 40$ мм)/37,8*	–	–
$\psi$ , %	56,4	73,8	–	–

Примітка. \*Значення відносного подовження  $\delta_5 = 37,8\%$  непропорційного зразка № 3 розраховано згідно з [13] для порівняння з відносним подовженням пропорційного зразка № 1.

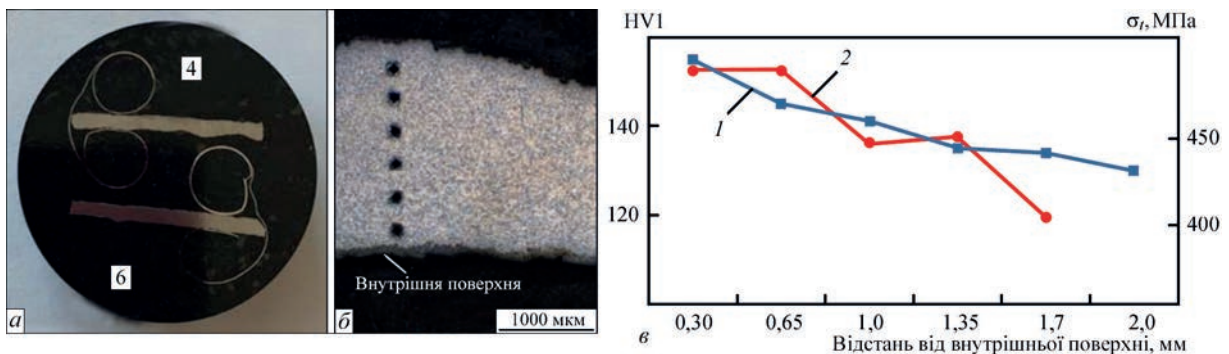


Рис. 10. Вимірювання твердості по товщині стінки труби зі значним корозійним потоншенням: а – вимірювальний темплет, цифрами позначено номери використаних заготовок (табл. 3); б – зразок із заготовки № 4 після індентування; в – твердість HV1 та міцність на розрив  $\sigma_r$  по товщині зразків (розрахунок значень  $\sigma_r$  згідно з [11])

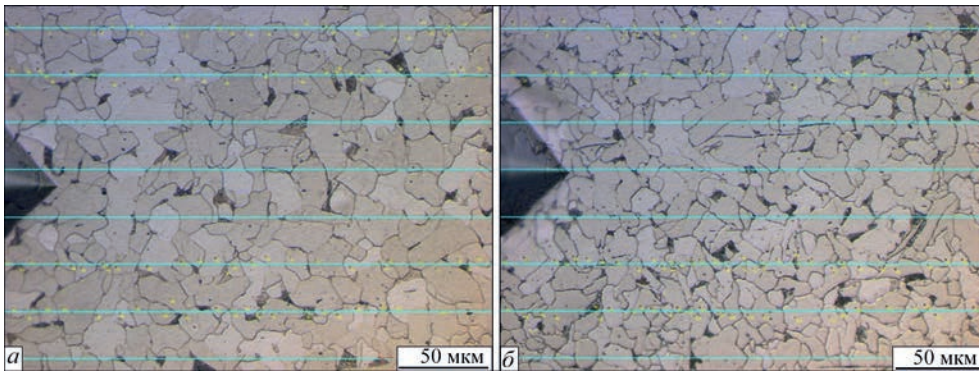


Рис. 11. Вимірювання розміру зерна зразка № 4 на: *a* – середині товщини стінки; *б* – біля внутрішньої поверхні

зультатами механічних випробувань (табл. 4). Зростання твердості біля внутрішньої поверхні труби свідчить про технологічне зміцнення металу в процесі виготовлення труби, а також незначну внутрішню корозію. Зміцнений приповерхневий шар із зовнішнього боку, очевидно, внаслідок інтенсивнішої корозії не зберігся. Зазначене підтверджується результатами вимірювань розмірів зерен (рис. 11). Середній розмір зерна біля внутрішньої поверхні труби на ~2 % (заготовка № 6) і ~10 % (заготовка № 4) менший, ніж у середній частині поперечного перерізу по товщині.

На рис. 12 наведено результати вимірювань твердості в зоні значного потоншення заготовки № 4, виконаних на бічній грані (у напрямку максимальних напружень розтягу, обумовлених внутрішнім тиском). Незважаючи на те, що мінімальна товщина потоншення  $a_{min} = 0,68$  мм є помітно нижчою за порогове значення товщини  $a_{max}^{CTA} = 0,97$  мм, яке розраховане шляхом підстановки механічних властивостей зразка № 1 (табл. 4) у (1) і визначає початок пластичного деформування стінки трубопроводу при тиску гідравлічних випробувань  $P = 2$  МПа:

$$a_{max}^{CTA} = \frac{PD_0}{2(\sigma_{0,2} + \frac{P}{2})}, \quad (1)$$

отримані значення практично однакові в середині товщини та в приповерхневих шарах металу. Це свідчить про відсутність, внаслідок інтенсивної корозії, вихідних технологічно зміцнених шарів зовнішньої та внутрішньої поверхонь, а також накопичених залишкових деформацій, що знаходиться підтвердження при розрахунках МСК і вимірюваннях твердості бічної поверхні зразка після випробувань на розтяг.

Для побудови геометричної моделі трубопроводу були використані розміри фрагмента поздовжнього перерізу подавального трубопроводу Д325 (рис. 12, *a*). Моделювання дефектів на поверхні труби здійснювали обертанням відповідних доповнюючих сегментів навколо осей, розташованих співвісно трубі (рис. 13). Товщина труби  $a = 2$  мм приблизно відповідає, за даними візуального контролю, середньому значенню товщини стінки суміжних ділянок у зоні розташування зазначеного фрагменту поздовжнього перерізу. У розрахунку використана дійсна діаграма розтягу зразка №3 (рис. 9), апроксимована дволінійним методом ( $\sigma_{0,2} = 334$  МПа,  $\sigma_t = 516$  МПа, тангенціальний модуль  $G_t = 1200$  МПа). У табл. 5 наведено максимальні пластичні деформації трьох дефектів із різними геометричними параметрами за тиску гідравлічного випробування  $P = 2$  МПа. Відносно

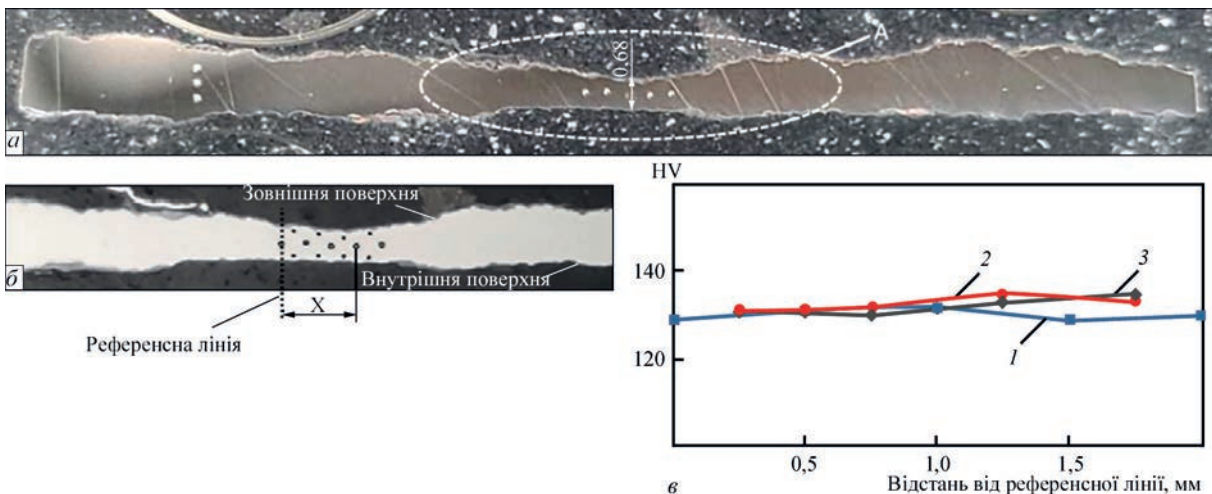


Рис. 12. Вимірювання твердості по товщині значно потоншеної стінки: *a* – темплет після вимірювання HV1; *б* – зона А після вимірювань HV1 і HV0.3,  $x$  – відстань від референтної лінії до точки вимірювання;  $v$  – твердість по товщині стінки



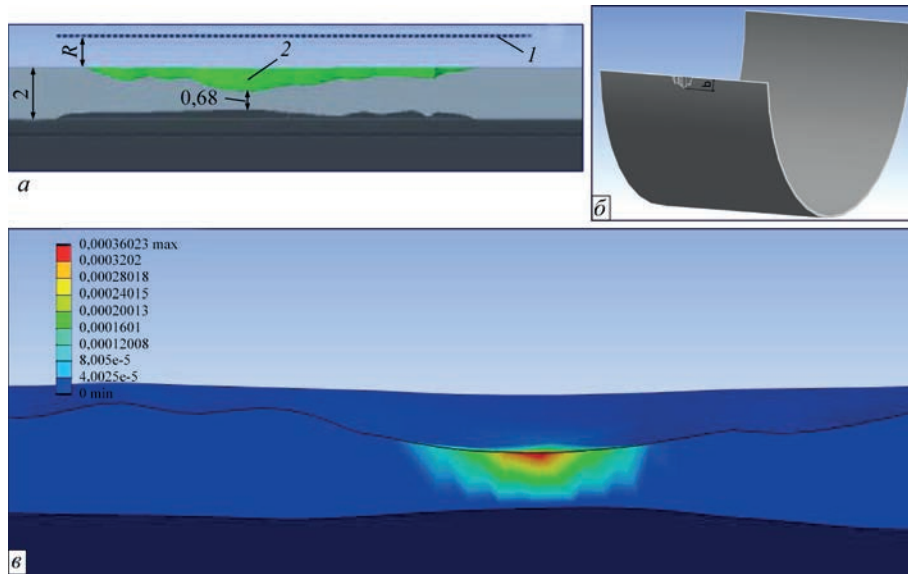


Рис. 13. Модель дефекту: *a* – схема моделювання дефекту: 1 – вісь обертання, 2 – доповнюючий сегмент, *R* – радіус обертання; *b* – дефект на зовнішній поверхні; *c* – половина ширини дефекту; 3 – розподіл пластичних деформацій

Таблиця 5. Максимальна пластична деформація  $\epsilon$  у дефекті

Номер варіанта	Радіус <i>R</i> , мм	Ширина <i>b</i> , мм	$\epsilon \cdot 10^{-2}$ , %
1	3	2,5	0,07
2	50	8,2	4
3	100	11,4	10

низькі величини максимальних деформацій на зовнішній поверхні в зоні найбільшого потоншення є наслідком розвантажувального згину, спричиненого дією внутрішнього тиску. Результати вимірювання твердості за Віккерсом під навантаженням 0,3 кг (HV0.3) на бічній поверхні зразка Д1-1 після його випробування на розтяг наведено на рис. 14.

Орієнтовне значення залишкової пластичної деформації  $\epsilon_r$  в *i*-й точці вимірювання твердості визначали як:  $\epsilon_{ri} = \ln(a_0/a_i)$ , де  $a_0$  – початкова товщина

поперечного перерізу зразка;  $a_i$  – товщина поперечного перерізу зразка в *i*-й точці після випробувань.

Наведені дані (рис. 14, *в*) підтверджують, що значення максимальних пластичних деформацій  $\epsilon_r < 0,1$  % зразка з мінімальною товщиною  $a_{min} = 0,68$  мм помітно не впливають на твердість. Подальше зменшення товщини стінки труби призводить до збільшення не тільки залишкової пластичної деформації, але й одночасного накопичених малоциклових пошкоджень у поверхневому шарі найбільш потоншених ділянок і корозійних виразок [4]. Наявність наскрізних корозійних дефектів свідчить про те, що внаслідок швидкого розвитку корозії стінки накопичені втомні пошкодження в постійно поновлюваному поверхневому шарі не встигають досягти критичного значення.

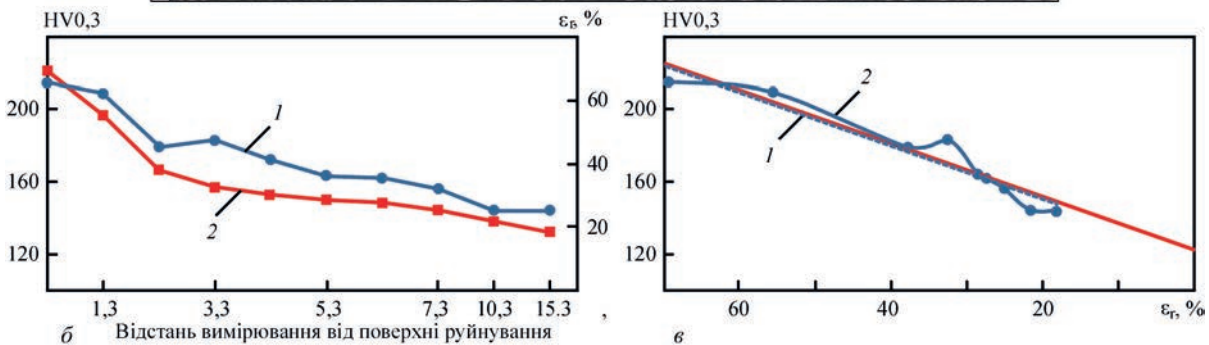
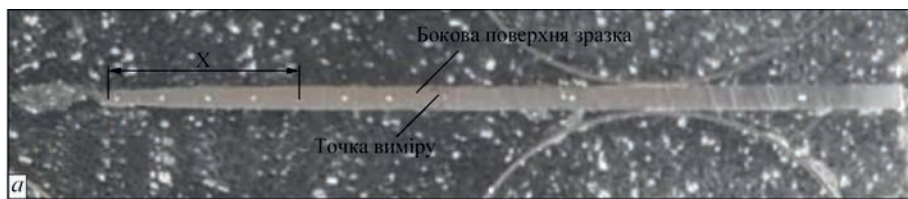


Рис. 14. Твердість по довжині бічної поверхні зразка Д1-1 після випробування на розтяг: *a* – бічна поверхня зразка, *x* – відстань точки вимірювання від поверхні руйнування; *b* – результати вимірювання твердості як функції відстані від поверхні руйнування – (1) та залишкової пластичної деформації  $\epsilon_r$  – (2); *в* – лінійна апроксимація значень твердості HV (1) залежно від залишкової деформації  $\epsilon_r$  – (2)

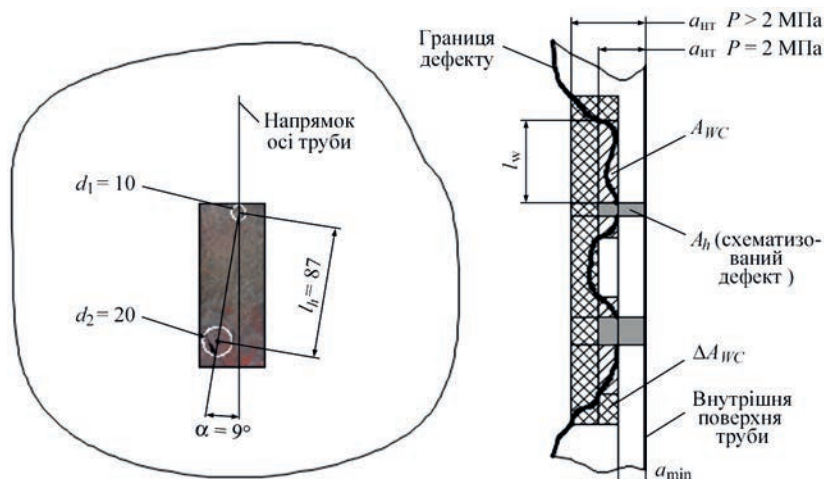


Рис. 15. Схематизація наскрізних дефектів: *a* – вид згори:  $d_1, d_2$  – діаметри кіл, що описують дефекти; *b* – розрахункова схема:  $a_{HT}$  – мінімальна допустима товщина за тиску  $P$ ;  $l_w$  – довжина прилеглої зони послаблення;  $a_{min}$  – мінімальна залишкова товщина;  $A_{WC}$  – розрахункова площа прилеглої зони послаблення;  $A_h$  – площа отвору, що схематизує дефект;  $\Delta A_{WC}$  – приріст площини послаблення при збільшеному тиску

Оцінку міцності за наявності наскрізного дефекту можна виконати з використанням гіпотези, згідно з якої несуча здатність трубопроводу зменшується, якщо:  $A_d > A_0$ , де  $A_d$  – площа послаблення повздовжнього перерізу, обумовлена наявністю дефекту;  $A_0$  – площа повздовжнього перерізу найбільшого кругового отвору, що не зменшує несучої здатності трубопроводу.

Згідно з [14] у випадку труби 328×8:  $A_0 = d_0^P \cdot a = 100,8 \text{ мм}$ , де  $d_0^P$  – найбільший діаметр кругового отвору за руйнівного тиску  $P_b$  труби:  $d_0^P = 0,25 \sqrt{D_m \cdot a}$ , де  $D_m$  – середній діаметр труби;  $a$  – номінальна товщина стіни труби.

Для оцінки міцності фрагменту подавального трубопроводу, що розглядається, схематизуємо наскрізні дефекти круговими отворами з діаметром  $d_1$  і  $d_2$  (рис. 15, *a*). Оскільки (рис. 15, *b*):  $l_d < 2\sqrt{D_m \cdot a}$  та  $\alpha < 15^\circ$ , будемо вважати ці отвори як такі, що знаходяться в одному поздовжньому перерізі та належать одному дефекту складної форми. Через те, що під час гідравлічного випробування ( $P = 2 \text{ МПа}$ ) руйнування не відбулося, можна стверджувати, що відносно зазначеного дефекту виконується умова:  $A_d = \Sigma A_h + \Sigma A_{WC} < A_0$ , де площа кругового отвору, що схематизує дефект:  $A_h = d \cdot a_{HT}$ , де  $d$  – діаметр кругового отвору, що описує дефект;  $a_{HT}$  – найменша допустима товщина під час гідравлічних випробувань згідно з (1);  $A_{WC}$  – розрахункова площа поздовжнього перерізу прилеглої до отвору зони із залишковою товщиною, меншою за  $a_{HT}$ :  $A_{WC} = (a_{HT}^P - a_{min}) \cdot l_w$ .

Таким чином, гідравлічне випробування не гарантує планове руйнування трубопроводу за наявності порівняно невеликих наскрізних дефектів. При цьому викликаний ними незначний витік води ускладнює їх виявлення, особливо коли трубопровід пролягає в непросторному каналі.

Зазначимо, що на момент проведення гідравлічного випробування інформація про наявність наскрізних дефектів та їх характерні геометричні параметри, як правило, відсутня, тому попереднє визначення руйнівного тиску пошкодженого трубопроводу є неможливим. У той же час, зі збільшенням випробувального тиску ймовірність руйнування трубопроводу з наскрізними дефектами зростає внаслідок приросту площини ослаблення  $\Delta A_{WC}$  (рис. 15, *b*).

### Висновки

На основі проведених досліджень встановлено, що після тривалої експлуатації теплопроводу:

- Корозійний стан теплопроводів незадовільний. Захисне покриття за фізико-механічними показниками не відповідає вимогам нормативних документів. Пошкодження подавального трубопроводу, який зазнав значніших експлуатаційних навантажень, суттєвіше, ніж зворотного, а зовнішня корозія трубопроводів інтенсивніша, ніж внутрішня.

- Розтріскування оксидного шару, яке починається на найбільш потоншених локальних ділянках і в корозійних виразках подавального трубопроводу, прискорюється при зростанні напружень у діапазоні розрахункового робочого тиску, що призводить до активізації корозійних процесів і формування наскрізних дефектів, що запобігає руйнуванню за малоцикловим втомним механізмом.

- Значення міцності на розрив конструкційного матеріалу (ВСтЗсп) подавального трубопроводу зменшилось на  $\sim 10 \%$ , зворотного трубопроводу – на  $\sim 18 \%$ . Границя міцності та текучості матеріалу трубопроводів в окружному та осьовому напрямку практично однакові та відповідають мінімальним нормованим значенням показників.

Зниження пластичності матеріалу подавально-го трубопроводу не перевищує 10 %, тоді як зворотного – суттєвіше, особливо в осьовому напрямку, де воно нижче за мінімальне нормоване значення, що, вірогідно, обумовлено деформаційним старінням і підвищує схильність до крихкого руйнування.

– Підвищені характеристики міцності та пластичності матеріалу значно потоншених ділянок спричинені відбором зразків на розтяг із найменш пошкодженого шару, прилеглого до внутрішньої поверхні, властивості якого є специфічними внаслідок технології виготовлення труб, а також впливом масштабного чинника використаних для порівняння зразків.

– Гідравлічні випробування можуть не призвести до очікуваного руйнування в місці розташування наскрізних дефектів залежно від геометричних параметрів пошкодження, що, враховуючи невеликі розміри дефектів і, відповідно, незначний виток води, ускладнює їх виявлення при прокладанні трубопроводу в непрохідному каналі.

### Список літератури

1. Тороп В.М. (2022) Проведення гідравлічних випробувань трубопроводів теплових мереж з метою досягнення заданої надійності їх експлуатації. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **3**, 35–41. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.06>
2. Пleshivtsev В.Г., Пак Ю.А., Филиппов Г.А. (2008) Факторы, снижающие конструктивную прочность металла труб и перспективы создания новых трубных сталей для тепловых сетей. *3-я научно-практическая конференция «Тепловые сети. Современные практические решения»*. [www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2076](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2076)
3. Пенкин А.Г., Терентьев В.Ф., Маслов Л.Г. (2004) Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости. [www.sds.ru/articles/degradation/index.html](http://www.sds.ru/articles/degradation/index.html)
4. Юхимець П.С., Дмитриенко Р.І., Палиєнко О.Л., Єгоренко В.М. (2022) Механічні властивості металу критично потоншених ділянок теплопроводу та особливості їх руйнування. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **4**, 34–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.06>
5. Yukhymets, P.S., Nyrkova, L.I., Gopkalo, O.P. (2022) Specific features of corrosion heating network pipelines made of 17G1S steel. *Materials Science*, **58(1)**, 35-40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00627-5>
6. (2005) ГОСТ 380 *Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки*.
7. (1980) ГОСТ 10705 *Трубы стальные электросварные. Технические условия*.
8. (2005) ДСТУ EN 13018 *Неруйнівний контроль. Контроль візуальний. Загальні вимоги*.

9. (1985) ГОСТ 9.908 *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной и коррозионной стойкости*.
10. (2009) DIN EN ISO 6892-1 *Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature*.
11. (2018) ISO 6507-1 *Metallic material. Vickers hardness test. Part 1: Test method*.
12. (2024) ASTM E112 *Standard test methods for determining average grain size*.
13. (1999) EN ISO 2566-1 *Conversion of elongation values. Part 1: Carbon and low alloy steels*.
14. (1989) Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86.

### References

1. Torop, V.M. (2022) Performance of hydraulic testing of piping of heat networks to achieve the specified reliability of their operation. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 35–41 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.06>
2. Pleshivtsev, V.G., Pak, Yu.A., Filippov, G.A. (2008) Factors that reduce the structural strength of pipe metal and the prospects for creating new pipe steels for heating networks. In: *Proc. of 3<sup>rd</sup> Sci.-Pract. Conf. on Heat Networks. Modern Practical Solutions* [in Russian]. [www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2076pov](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2076pov)
3. Penkin, A.G., Terentyev, V.F., Maslov, L.G. (2004) Assessment of the degree of degradation of mechanical properties and residual service life of pipe steels using acoustic emission and kinetic hardness methods [in Russian]. [www.sds.ru/articles/degradation/index.html](http://www.sds.ru/articles/degradation/index.html)
4. Yukhymets, P.S., Dmytrienco, R.I., Palienco, O.L., Yehorenko, V.M. (2022) Mechanical properties of metal of critically thinned sections of the heat pipelines and features of their destruction. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **4**, 2022, 34–46 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.06>
5. Yukhymets, P.S., Nyrkova, L.I., Gopkalo, O.P. (2022) Specific features of corrosion heating network pipelines made of 17G1S steel. *Materials Sci.*, **58(1)**, 35–40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00627-5>
6. (2005) ГОСТ 380 *Carbon steel of ordinary quality. Brands* [in Russian].
7. (1980) ГОСТ 10705 *Electric-welded steel pipes. Technical conditions* [in Russian].
8. (2005) DSTU EN 13018 *Non-destructive testing. Visual control. General requirements* [in Ukrainian].
9. (1985) ГОСТ 9.908 *Unified system of protection against corrosion and aging. Metals and alloys. Methods of determining corrosion indicators and corrosion resistance* [in Russian].
10. (2009) DIN EN ISO 6892-1 *Metallic materials. Tensile testing. Pt 1: Method of test at room temperature*.
11. (2018) ISO 6507-1 *Metallic material. Vickers hardness test. Pt 1: Test method*.
12. (2024) ASTM E112 *Standard test methods for determining average grain size*.
13. (1999) EN ISO 2566-1 *Conversion of elongation values. Pt 1: Carbon and low alloy steels*.
14. (1986) PNAE G-7-002 *Standards for calculation of strength of equipment and pipelines of nuclear power installations* [in Russian].

## CORROSION-MECHANICAL STATE OF THE HEAT PIPELINE AFTER LONG-TERM OPERATION

P.S. Yukhymets<sup>1</sup>, L.I. Nyrkova<sup>1</sup>, R.I. Dmytriienko<sup>1</sup>, H. Kaminski<sup>2</sup>, C. Zaruba<sup>2</sup>, P. Linhardt<sup>2</sup>, G. Ball<sup>2</sup>, V.M. Yehorenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Е.О. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: [yupeter@ukr.net](mailto:yupeter@ukr.net)

<sup>2</sup>TU Wien. 13 Karlsplatz, 1040, Vienna, Austria. E-mail: [heinz.kaminski@tuwien.ac.at](mailto:heinz.kaminski@tuwien.ac.at)

<sup>3</sup>СЕ «Київтеплоенерго». 5 Ivan Franko Sq., 01001, Kyiv, Ukraine. E-mail: [yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua](mailto:yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua)

Metal properties of heat pipeline areas thinned under operating conditions are a necessary component for determining its real state, and therefore their research is an actual task. The work investigates the corrosion-mechanical state of a heat pipeline made

of VSt3sp steel after more than 40 years of operation. Based on the conducted research, it was established that corrosion of the feeding pipeline is more severe than that of the return pipeline, while the external corrosion of the pipelines is more intense than the internal one. Cracking of the oxide layer accelerates with increasing stresses in the range of the design pressure and leads to activation of the corrosion processes and formation of through defects that prevents destruction by the mechanism of low-cycle fatigue. It is shown that tensile and yield strengths of the steel correspond to the minimum normalized values. The reduction in plasticity of the feeding pipeline metal does not exceed 10 %, while that for return pipeline is below the minimum normalized value which is probably due to strain aging. The least damaged layer adjacent to the inner surface of pipes has increased strength and plasticity characteristics due to the pipe manufacturing technology. While hydraulic test may not lead to the expected destruction at the location of through defects, its probability rises with increase of the test pressure. 14 Ref., 5 Tabl., 15 Fig.

*Keywords: heat pipelines, corrosion, mechanical properties, hardness, through defects*

Отримано 26.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 02.12.2024

Прийнято 20.12.2024



Розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона

## АКУСТИКО-ЕМІСІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ПРОМИСЛОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Об'єкти технічного діагностування та контролю: Одеський припортовий завод, ТЕЦ-5 та ТЕЦ-6 (м. Київ), підприємства Укртрансгазу та ін.

Раннє попередження аварій та руйнувань відповідальних металевих конструкцій.

Визначення терміну подальшої експлуатації відповідальних металевих конструкцій, що працюють під навантаженням.



# ОЦІНКА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ АРМОВАНОГО ВУГЛЕЦЕВИМ ВОЛОКНОМ ПЛАСТИКУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЙОГО ВІДШАРУВАННЯ

A. Savin<sup>1,2</sup>, R. Steigmann<sup>1</sup>, M.D. Stanciu<sup>2</sup>, C.I. Moraras<sup>3</sup>, G. Dobrescu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nondestructive testing Department, National Institute of R&D for Technical Physics, Iasi, Romania. E-mail: [asavin@phys-iasi.ro](mailto:asavin@phys-iasi.ro)

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Transilvania University of Braşov, Romania

<sup>3</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Technical University Gh. Asachi Iasi, Romania

У категорії нових і передових матеріалів композиційні матеріали з армованого вуглецевим волокном пластику (АВВП) використовуються в таких сферах, як конструкційні матеріали в авіонавтиці, транспорті тощо. Двофазна структура АВВП вимагає знання властивостей як волокна, так і матриці. В умовах, коли можливе відшарування відбувається під час використання, це залежить як від властивостей на їх границях, так і від прошарку. Відповідні методи ультразвукового (УЗ) контролю дозволяють визначити швидкість поширення поздовжніх і поперечних хвиль, які використовуються для оцінки модуля пружності  $E$ , модуля зсуву  $G$  у трьох основних напрямках. Ультразвукове  $S$ -сканування з використанням фазованої решітки дозволяє виділити та описати місця з пористістю, які з'являються під час виготовлення композиту або через локальний перегрів. При порівнянні з результатами, отриманими за допомогою динамічного механічного аналізатора (ДМА), виявлено хорошу кореляцію. Ці процедури дозволяють також виявити пошкодження матриці внаслідок використання високої температури або встановити максимальну температуру для використання. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 6.

*Ключові слова:* пластик, армований вуглецевим волокном; неруйнівний контроль, ультразвуковий контроль, динамічний механічний аналізатор

**Вступ.** Зменшення ваги комплектуючих, що використовуються в авіаційній промисловості, а також в автомобілебудуванні, спрямоване на зменшення споживання енергії та спонукає використовувати композитні матеріали в якості модульних конструктивних елементів. Вибір і використання композитів, пов'язаних з продуктивністю та вартістю [1, 2], є нагальною проблемою. Збільшення терміну експлуатації транспортних засобів і вплив вібрацій та шумів на зовнішню ізоляцію, а також поглинання енергії удару також є проблемами, які стосуються автомобільної промисловості і не тільки її [3].

За результатами аналізу механічних властивостей цих модульних компонентів, а також з'єднань між композитними та металевими конструкціями, з метою попередження поломки, формуються відповідні процедури. Армвані вуглецевим волокном композити (АВВП) використовуються в більшості галузей завдяки їхній низькій щільності, зниженому впливу явищ механічної втоми та високому відношенню міцності до ваги [4, 5].

Однак композити мають низьку ударостійкість у напрямку, перпендикулярному до площини волокна, здатні викликати розшарування/розрив волокна при високих енергіях. Поведінка міжшарових руйнувань композитів потребує експериментального дослідження як армування, так і

матриці. Це можна зробити за допомогою методів неруйнівного контролю на основі ультразвуку, вихрових струмів тощо.

Епоксидна смола є найпоширенішою матрицею для вуглепластиків [6], її властивості кращі, але в процесі старіння вони чутливі до водопоглинання [7] через полярну гідроксильну групу всередині [8]. Незважаючи на те, що ці матеріали використовуються у значній кількості, вони, як і будь-який новий матеріал, мають недоліки, пов'язані з продуктивністю, обробкою та вартістю [9, 10].

Існує багато досліджень, які аналізують явища розшарування в шаруватих композитах, багато з них викликані ударами, але напруження всередині матеріалів, які з'являються протягом їхнього життя і постійно контролюються, визначають момент, коли деталь, конструкція чи вузол більше не можуть задовольняти своїм проектним характеристикам. Стійкі напруження компонентів з'єднання композитів або адгезивів можуть бути недиагностованими причинами, які викликають утворення тріщин [11]. Просторове розташування, а також розміри виробу іноді можуть врятувати композитну конструкцію від поломки.

**Метою** статті є представлення взаємодоповнюючих результатів (з використанням теоретичних та експериментальних методів), отриманих при

A. Savin – <https://orcid.org/0000-0001-9863-3110>, R. Steigmann – <https://orcid.org/0000-0003-1618-7650>,

M.D. Stanciu – <https://orcid.org/0000-0001-6414-9427>, C.I. Moraras – <https://orcid.org/0000-0001-6300-2255>

© A. Savin, R. Steigmann, M.D. Stanciu, C.I. Moraras, G. Dobrescu, 2024

комплексному дослідженні пружних властивостей композитів, армованих вуглецевими волокнами.

**Матеріали та методи.** Поведінка АБВП-композитів під навантаженням є корисною для розуміння того, як навантаження впливає на складні АБВП-композитні структури. Зусилля щодо досліджень за допомогою аналітичного моделювання для пояснення результатів, отриманих під час експериментальних випробувань, фактично подвоюються [12]. Під час випробувань можуть з'явитися великі концентратори напруги, що призведе до невідомого змішаного режиму навантаження, змінного вздовж зразка, що може генерувати несподівані результати.

**Виготовлення зразків.** Композиційні матеріали, запропоновані для теоретичного та експериментального аналізу, належать до типу АБВП, виготовленого з використанням вуглецевих/епоксидних ламінатів, отриманих за технологією автоклавної обробки. Дослідження конструктивної поведінки композитів АБВП показали, що їх властивості залежать від застосованої технології [13, 14]. У [15] представлено метод отримання ламінатів, використаних у випробуваннях, представлених у статті, АБВП з 8-ми шарів тканини полотняного переплетення GG200P-PL1/1 (група SLG) з діаметром волокна 7 мкм Тогауса T300 [16] з різними послідовностями укладання шарів  $[0]_8$  і  $[(45/0)2]_8$  і смоли ЕТ445. Виготовлена у вигляді дошок розміром  $295 \times 205$  мм<sup>2</sup>, завтовшки 2,2 мм і з об'ємним коефіцієнтом  $V_f = 0,45$ , щільністю 1,58 кг/дм<sup>3</sup>, реалізована конфігурація забезпечує ламінату квазіізотропну структуру з модулем пружності  $0,44 \pm 0,03$ . У ви-

падку аналізованого композиту полімерна матриця забезпечує адгезію між волокнами та матрицею та надає їй структуру, яка чинить опір, поки волокна не розірвуться. Звичайна тканина забезпечує простий повторюваний малюнок (рис. 1).

Окрім умов роботи та ступеня навантаження, структура композиту, полімерна матриця та розподіл волокон можуть визначати вклад до загального механізму пошкодження на мікроструктурному рівні.

**Скінченно-елементний аналіз (CEA).** Аналіз скінченних елементів дозволяє отримати детальну інформацію про розподіл напружень і деформацій у композиті в залежності від оптимізації конструкції та її характеристик. Тривимірну графічну модель, створену в SolidWorks, було імпортовано в програмне забезпечення Ansys версії R17.0 (рис. 2).

Для моделювання використовувався метод чотирикутної дискретизації. Дані, наведені в таблиці, були уніфіковані та була введена функція розміру елементів 1 мм для забезпечення точності, отримуючи геометрію перерізу, що має 22505 вузлів і 3936 елементів. Зразок розглядався без розривів, з його поверхні (тієї, що потрапила між торцями) у дослідженні використовувалася лише частина (рис. 2), моделювання проводилося для випробування на розтяг. На рис. 2, б показано напружений стан зразка, що розтягується. Можна спостерігати розподіл напружень по всьому його поперечному перерізу по всьому об'єму з максимальними значеннями на рівні виступів, які продовжуються до центральної області.

**Методи.** Наявність пористості в композитному матеріалі аналізували за допомогою ультразву-

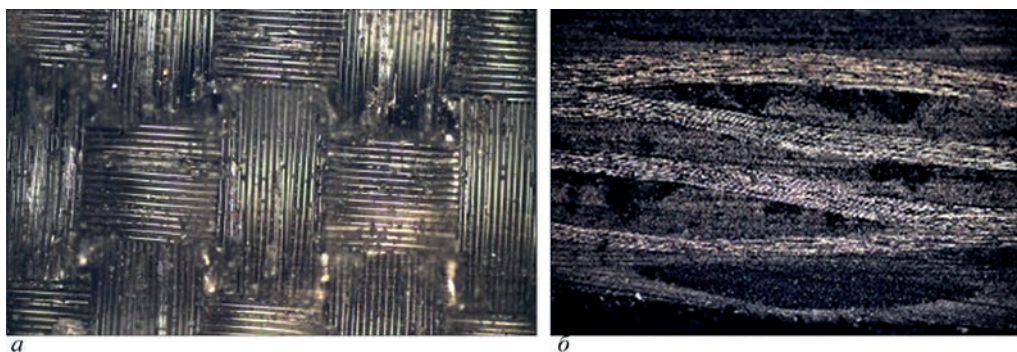


Рис. 1. Досліджувані зразки: зразок передньої поверхні,  $\times 10$  (а); переріз під оптичним мікроскопом (б)

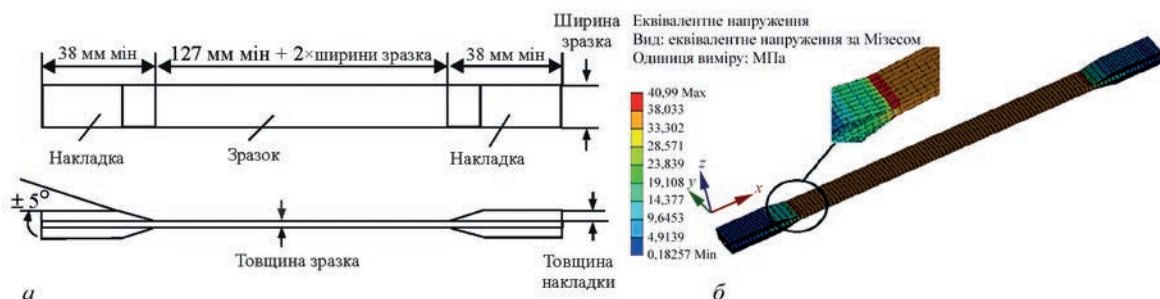


Рис. 2. 3D модель, створена в SolidWorks (а); зразок із сітчастою структурою та зрізом, що аналізується (б)

кового (УЗ) методу, пружні хвилі створювалися в АБВП за допомогою обладнання Phasor XS у поєднанні з матрицею датчиків із центральною частотою 5 МГц і лінією затримки.

Ультразвукове затухання в композитах є мірою ступеня пористості. Аналіз швидкості поширення УЗ хвиль в композитах був отриманий за допомогою перетворювачів, підключених до US PR 5073 Pulser Receiver – обладнання Panametrics.

Оскільки композитні пластини є тонкими, для аналізу відбитих УЗ хвиль була застосована лінія затримки з оргскла. Хвилі стиснення збуджували перетворювачем G5KB GE з центральною частотою 5 МГц, зсувні – перетворювачем MB4Y з центральною частотою 4 МГц, сигнали аналізували на екрані цифрового осцилографа Le Croy Wave Runer64Xi. Значення модуля пружності та пружних властивостей композиту визначаються за швидкостями поширення хвилі:

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}; C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

де  $E$  – модуль пружності;  $G$  – модуль зсуву;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\rho$  – щільність.

Динамічний механічний аналізатор DMA 242C фірми Netzsch (Німеччина) з пристроєм для триточкового згинання з використанням програмного забезпечення Protheus v.4.8.5 було використано для визначення основних характерних величин, модуля пружності вздовж головної осі ( $E_x, E_y, E_z$ ). Отримані значення порівнювали з тими, що були визначені за допомогою тягових випробувань за класичною процедурою з використанням машини INSTRON E1000 з гідравлічним пристроєм.

**Результати експериментів.** Ступінь пористості знаходиться в лінійній кореляції з ослабленням УЗ хвиль в композитах і з механічними властивостями, тобто опором зсуву. Підготовлені таким чином пластини (&2.1) сканували з використанням сканування одним обертом ультразвукового перетворювача частотою 5 МГц, який переміщався за допомогою осьового сканера ENCSTD. Процедура, застосована до матеріалу, призводить до аналізу результатів сканування зображень, показаних на рис. 3.

Наявність локалізованої пористості означає порушення суцільності середовища. Можна помітити, що в цьому випадку записані вимірювання показують матеріал без розривів.

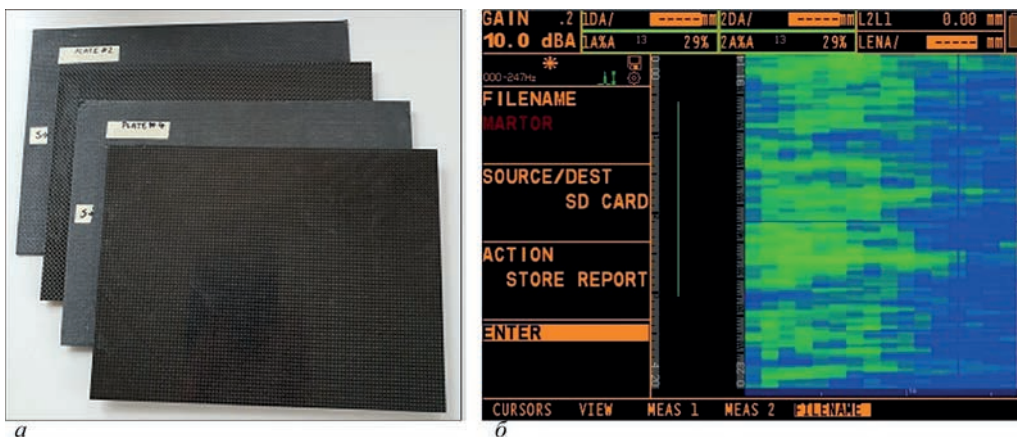


Рис. 3. Зразки АБВП (а), С-скан з модами поширення УЗ хвиль (б)

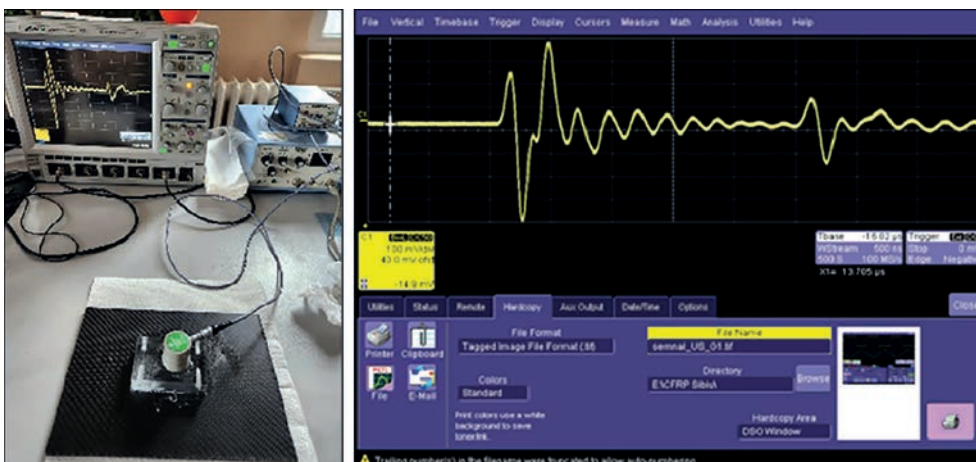


Рис. 4. Визначення швидкості поширення ультразвуку в досліджуваних зразках

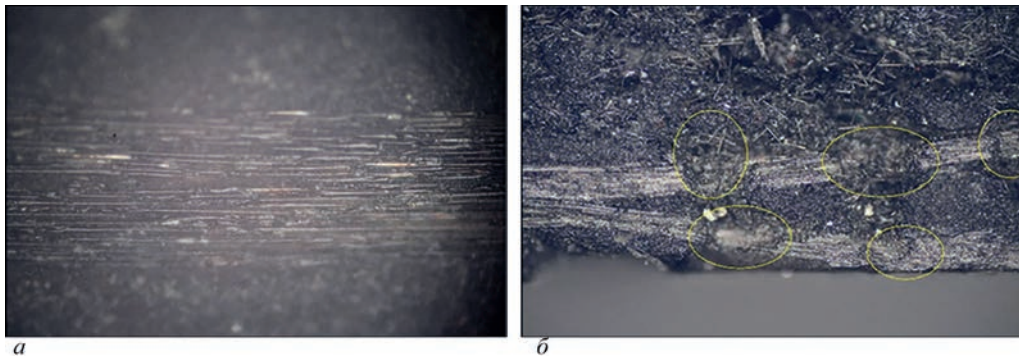


Рис. 5. Зображення під мікроскопом поперечного перерізу досліджуваних зразків ДМА

За допомогою УЗ методики визначення швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль у матеріалі визначено модуль пружності  $E_2$  і модуль зсуву  $G_{12}$ . Середня швидкість поширення УЗ хвиль становила  $C_1 = 2732$  м/с – для поздовжніх і  $C_t = 1937$  м/с – для поперечних хвиль.

Із зразків АВВП, випробуваних УЗ на відсутність розривів, були вирізані зразки розмірами  $50 \times 10 \times 2,2$  мм<sup>3</sup> для динамічного механічного аналізу ДМА. Ці зразки були проаналізовані оптично, тому що під час процесу різання можуть з'явитися розриви, деякі ламелі можуть змінити свій напрямок орієнтації, деякі волокна можуть розірватися, можуть статися відриви від ламелей. Зразки з цим типом дефектів були видалені (рис. 5, б).

В аналізі ДМА зразок, навантажений коливальною синусоїдальною силою 6Н на різних заданих частотах, надає інформацію про в'язкопружні властивості як функцію частоти, температури та часу. Параметри, отримані під час випробувань, надають інформацію про склоутворення, яке відноситься до  $T_g$  (перехід у скло), що є результатом реакції зшивання. Визначення проводили на одній частоті 1 Гц, у температурному діапазоні (25...260 °C).

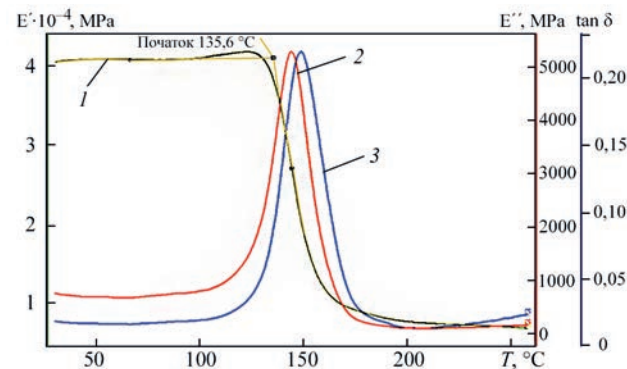


Рис. 6. Результати ДМА для зразка АВВП: 1 –  $E'$ ; 2 –  $E''$ ; 3 –  $\tan \delta$

**Пружні характеристики досліджуваних зразків**

$E_x$ , ГПа	$E_y$ , ГПа	$E_z$ , ГПа	$\nu_{xy}$	$\nu_{yx}$	$\nu_{xz}$	$G_{xy}$ , ГПа	$G_{yz}$ , ГПа	$G_{xz}$ , ГПа
42	40	9	0,30	0,3	0,03	8,2	8,4	5,1

Спостерігається незначне збільшення модуля пружності  $E'$  від 40000 до 42000 МПа. Після цього збільшення досягається максимум модуля Юнга, після чого відбувається зменшення з тим самим нахилом модуля пружності  $E'$ , так що він залишається постійним навколо значення 180°C. Були виділені механізми зміни пружних і в'язкопружних механічних властивостей: модуль пружності ( $E'$ ), поведінка композиту в часі при температурних змінах, модуль втрат ( $E''$ ), коефіцієнт втрат ( $\tan \delta$ ), температура склування ( $T_g = 135,6$  °C).

Аналіз ДМА показує зміни динамічного модуля АВВП під навантаженням із температурою наступним чином: модуль втрат відображає адгезію матеріалу; модуль пружності відображає жорсткість матеріалу; співвідношення між модулем втрат і модулем пружності, тобто амортизація матеріалу  $\tan \delta = \frac{E''}{E'}$ , де  $\delta$  – фазовий кут напружень і деформацій. Відношення напруги ( $\sigma$ ) до деформації ( $\epsilon$ ) під дією динамічного навантаження визначається як комплексний модуль Юнга матеріалу ( $E^*$ ), який можна виразити наступним чином:

$$E^* = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} e^{i\delta} = E' + iE'' \quad (2)$$

Основні механічні характеристики зразків композиту  $E_x, E_y, E_z$  визначали за графіками ДМА. Коефіцієнти Пуассона  $\nu_{xy}$  і  $\nu_{yx}$  були визначені шляхом вимірювання швидкостей УЗ хвиль. Модуль зсуву розраховували тільки за методикою УЗ. Результати представлені в таблиці.

Дані, отримані за допомогою додаткових методів ДМА та випробувань на розтяг, доповнених даними УЗ, дозволяють повністю отримати характеристики композитів з полімерною матрицею, армованою вуглецевими волокнами.



**Висновки**

Характеристики вуглець-епоксидних композитів можна отримати з використанням ультразвукового методу, який доповнює руйнівний контроль за допомогою динамічного механічного аналізу. Використовуючи С-сканування, можна легко оцінити ділянки з пористістю, що виникли під час виробництва. Для визначення модулів пружності та зсуву, коефіцієнта Пуассона композиційних матеріалів з армуванням з вуглецевого волокна запропоновано використання комбінованих ультразвукових методів, а саме луна-імпульсного – для хвиль стиснення, луна-дзеркального методу – для поперечних хвиль. Чисельні аналізи та додаткові випробування необхідні для різних зразків АВВП, щоб уникнути розривів навколо кріплень і передбачити еволюцію поширення тріщин у процесі руйнування.

**Список літератури/References**

1. Tran, P., Wu, C., Saleh, M. et al. (2021) Composite structures subjected to underwater explosive loadings: A comprehensive review. *Composite Structures*, **263**, 113684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113684>
2. Ozkan, D., Gok, M.S., Karaoglanli, A.C. (2020) Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Adv. Struct. Mater.*, **124**, 235–253. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4_20)
3. Mathes, V. (2018) The composites industry: Plenty of opportunities in a heterogeneous market. *Reinforced Plastics*, **62(1)**, 44–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.repl.2017.05.002>
4. Zorko, D., Tavčar, J., Bizjak, M. et al. (2021) High cycle fatigue behavior of autoclave-cured woven carbon fiber-reinforced polymer composite gears. *Polymer Testing*, **102**, 107339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107339>
5. Othman, R., Ismail, N.I., Pahmi, M.A.A.H. et al. (2018) Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: A review. *J. Mech. Manuf.*, **1**, 144–154.
6. Kaw, A.K. (2006) *Mechanics of composite materials*. 2<sup>nd</sup> Ed. Taylor and Francis, NY.
7. Sang, L., Wang, Y., Wang, C. et al. (2019) Moisture diffusion and damage characteristics of carbon fabric reinforced polyamide 6 laminates under hydrothermal aging. *Composites, Pt A: Applied Science and Manufacturing*, **123**, 242–252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.05.023>
8. Ortiz, J.D., Khedmatgozar Dolati, S.S., Malla, P. et al. (2023) FRP-reinforced/strengthened concrete: State-of-the-art review on durability and mechanical effects. *Materials*, **16(5)**, 1990. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16051990>
9. Hübner, M., Lepke, D., Hardi, E. et al. (2019) Online monitoring of moisture diffusion in carbon fiber composites using miniaturized flexible material integrated sensors. *Sensors*, **19(8)**, 1748. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19081748>
10. Lei, Y., Kang, Z., Zhang, J. et al. (2022) Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of continuous carbon fiber-reinforced polyamide 6 composites. *Polymer Testing*, **114**, 107704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107704>
11. Romanowicz, M. (2012) A numerical approach for predicting the failure locus of fiber reinforced composites under combined transverse compression and axial tension. *Computational Materials Sci.*, **51(1)**, 7–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.039>
12. Cugnoni, J., Amacher, R., Kohler, S. et al. (2018) Towards aerospace grade thin-ply composites: Effect of ply thickness, fiber, matrix and interlayer toughening on strength and damage tolerance. *Composites Sci. and Technology*, **168**, 467–477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.08.037>
13. Van de Werken, N., Tekinalp, H., Khanbolouki, P. et al. (2020) Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective. *Add. Manuf.*, **31**, 100962. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100962>
14. Bhatt, A.T., Gohil, P.P., Chaudhary, V. (2018) Primary manufacturing processes for fiber reinforced composites: History, development & future research trends. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin.*, **330**, 012107. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012107>
15. Bergant, Z., Savin, A., Grum, J. (2018) Effects of manufacturing technology on static, multi-frequency dynamic mechanical analysis and fracture energy of cross-ply and quasi-isotropic carbon/epoxy laminates. *Polymers and Polymer Composites*, **26(5–6)**, 358–370. DOI: <https://doi.org/10.1177/0967391118798266>
16. (2022) *Technical Information. Sigrafil® continuous carbon fiber tow*. Wiesbaden, SGL Group, August 2022.

**EVALUATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CFRP COMPOSITES AND MODELING OF THE DELAMINATION PHENOMENON**

A. Savin<sup>1,2</sup>, R. Steigmann<sup>1</sup>, M.D. Stanciu<sup>2</sup>, C.I. Moraras<sup>3</sup>, G. Dobrescu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nondestructive testing Department, National Institute of R&D for Technical Physics, Iasi, Romania. E-mail: [asavin@phys-iasi.ro](mailto:asavin@phys-iasi.ro)

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Transilvania University of Braşov, Romania

<sup>3</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Technical University Gh. Asachi Iasi, Romania

In the category of new and advanced materials, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite materials are used in areas such as structural materials in aeronautics, transport, etc. The bi-phasic structure of CFRP requires knowledge of both fiber and matrix properties. In the conditions where possible delamination's occur during use, these depend both on the properties of the interfaces and of the interlaminar. The appropriate ultrasound (US) techniques allow the determination of the propagation speed of the longitudinal and transverse waves which are used in the evaluation of the elastic modulus E, shear modulus G on the three principal directions. C-scan US using phased array allows the emphasizing and characterization of ones with porosities that appear during composite fabrication or due to local overheating. The results are compared with those obtained by a dynamic mechanical analyzer (DMA), being found a good correlation. These procedures allow also the emphasizing of matrix damages due to high temperature used or establishing maximum temperature for used. 16 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

*Keywords: carbon fiber reinforced plastic, nondestructive testing, ultrasound, dynamic mechanical analyzer*

Отримано 31.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 12.11.2024

Прийнято 20.12.2024

# ВИЯВЛЕННЯ КРУГЛИХ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ У ШАРУВАТИХ КОМПЗИТАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИКО-АКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

О.М. Шарабура, Л.І. Муравський, О.Г. Куць

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

Створено макет оптико-акустичної системи неруйнівного контролю підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах. Виявлення та локалізація підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах за допомогою макета оптико-акустичної системи виконується шляхом формування серій динамічних спекл-зображень поверхні композиту, збудженого згинальною пружною хвилею, подальшої їх реєстрації і накопичення з метою генерування різницевого цифрових спекл-зображень та виділення оптичних просторових відгуків від дефектів. Для оцінювання ефективності виявлення таких дефектів виготовляли склопластикові шаруваті структури, які містили три шари склотекстолітових пластин і круглі плоскі дефекти різних розмірів у середньому шарі. На основі проведених досліджень отримано експериментальну залежність основної резонансної частоти круглих підповерхневих дефектів від їх розмірів, яка близька до побудованої теоретичної. Показано, що за допомогою створеного макета оптико-акустичної системи можна виявляти такі дефекти у широкому діапазоні зміни їх розмірів. Бібліогр. 24, рис. 5.

*Ключові слова:* оптико-акустична система, динамічне спекл-зображення, круглий підповерхневий дефект, область інтересу, різницеве цифрове спекл-зображення, пружна хвиля, шаруватий композит

**Вступ.** Постійне вдосконалення матеріалів і елементів конструкцій, які використовують у машинобудуванні, авіакосмічній галузі, будівельній індустрії тощо, вимагає неперервного розвитку методів і засобів їх неруйнівного контролю (НК) і технічної діагностики. Для розробки нових та удосконалення наявних засобів НК матеріалів і конструкцій використовують процеси, що мають у своїй основі різноманітну фізичну природу. Багато залежить від умов, за яких передбачається проведення процесу контролю, властивостей матеріалів, з яких виготовлено об'єкт дослідження, які типи дефектів необхідно виявити тощо. В останні роки інтенсивного розвитку набули засоби швидкісного НК, які побудовані на принципах термографії, цифрової спекл-інтерферометрії та ширографії [1–4], і дають можливість паралельного відбору дво- і тривимірних масивів даних з великої площі об'єкта досліджень і подальшої їх цифрової обробки.

Перевагою термографічних методів є велика площа об'єкта та безконтактність процедури нагрівання матеріалу. Проте мала товщина матеріалу об'єкту дослідження, значні енергетичні витрати на його нагрівання та висока вартість обладнання, зокрема інфрачервоної камери, обмежують їх можливості. До того ж, потреба в попередньому нагріванні об'єкта дослідження наносить шкоду оточуючому середовищу та погіршує екологічний стан навколишньої місцевості.

Для НК поверхонь значної площі ефективно використовують методи ширографії [3–6]. Широ-

графічні системи дають можливість опрацьовувати велику площу об'єкта дослідження з високою швидкістю без потреби в додатковому нагріванні. Їх використовують для виявлення, вимірювання та локалізації аномалій шляхом відтворення та візуалізації мікроскопічних змін на досліджуваній поверхні під час відповідного навантаження. Цифрова камера ширографа перевіряє все поле зору практично одночасно на відміну від сканувальних віброметричних та ультразвукових (УЗ) засобів НК [3]. Існує низка способів прикладання навантаження у таких системах, зокрема різноманітні механічні та вібраційні навантаження, навантаження під дією звукових чи УЗ сигналів, тиску тощо, які призводять до незначних локальних деформацій поверхні, зумовлених наявністю як поверхневих, так і підповерхневих дефектів. Це можуть бути пошкодження від удару, роз'єднання, відшарування, пористість, термічні пошкодження, тріщини тощо. Такі деформації легко розпізнати за допомогою ширографічних систем НК [1, 2, 5, 6]. Проте у таких системах необхідно використовувати ширографічний інтерферометр, що ускладнює та робить громіздкою їх загальну конструкцію.

На відміну від інтерферометричних методів НК, в оптико-акустичному методі (ОАМ) для виявлення підповерхневих дефектів у композитних структурах використовують лише спекл-зображення поверхні, яку збуджують пружними хвилями від джерел акустичного випромінювання. Формування когерентних спекл-зображень відбувається без використання

О.М. Шарабура – <https://orcid.org/0000-0002-5712-4114>, Л. І. Муравський – <https://orcid.org/0000-0001-8839-2819>

© О.М. Шарабура, Л.І. Муравський, О.Г. Куць, 2024

опорного лазерного променя, завдяки чому значно спрощуються оптико-цифрові системи НК, що реалізують ОАМ. Метод полягає у збудженні композитної структури згинальною пружною хвилею, освітленні ділянки поверхні композиту розширеним лазерним променем, формуванні серій динамічних спекл-зображень ділянки поверхні композиту з частотою, яка відповідає частоті пружної хвилі, що монотонно зростає або спадає, реєстрації цифрових спекл-зображень (ЦСЗ) як результату накопичення серій динамічних спекл-зображень, отриманих за протилежних полярностей пружної хвилі, а також у формуванні оптичних просторових відгуків від областей інтересу, розташованих безпосередньо над дефектами, шляхом швидкісної обробки ЦСЗ. Далі за побудованими мапами дефектів визначають розташування, розміри та глибини залягання підповерхневих дефектів. ОАМ детально описаний у [7–11].

**Оптико-акустична система неруйнівного контролю підповерхневих дефектів.** Для технічної реалізації ОАМ створено макет оптико-акустичної системи (ОАС) НК підповерхневих дефектів [7–11], блок-схему якого зображено на рис. 1. Одна з ключових відмінностей ОАС полягає в тому, що вона порівняно з відомими інтерферометричними системами виявлення внутрішніх дефектів не містить інтерферометра або широкографічного вузла, завдяки чому має набагато простішу конструкцію та малочутлива до вібрацій та інших зовнішніх впливів.

Оптичний просторовий відгук від підповерхневого дефекту в ОАС отримують шляхом порів-

няння зареєстрованих ЦСЗ  $I_{n1}(i, j)$ , отриманих за максимальних значень амплітуди пружної хвилі, з ЦСЗ  $I_{n2}(i, j)$ , отриманих за її мінімальних значень. Процедура взаємної кореляції ЦСЗ детально описана в [9–11] і виконується шляхом одержання різницевого ЦСЗ:

$$I_n(i, j) = |I_{n1}(i, j) - I_{n2}(i, j)| \quad (1)$$

Після отримання різницевого ЦСЗ, яке можна трактувати як мапу дефектів, виникає закономірне питання, яким чином на основі отриманої мапи визначити параметри дефекту. Для цього слід встановити зв'язок між формою підповерхневого дефекту та розміром і глибиною його залягання. Один із можливих підходів до розв'язання такої проблеми полягає у застосуванні методів математичної фізики для побудови математичної моделі відповідного дефекту. Щоб отримати вирази, які поєднують фізичні параметри матеріалу, з якого виготовлено об'єкт діагностики, з параметрами дефекту та його резонансними частотами, використовують підходи, розвинуті в теорії пластин та оболонок [12, 13]. У працях, проаналізованих і узагальнених у [13], наведено результати досліджень для плоских ізотропних і анізотропних пластин різної форми, зокрема для прямокутних [14, 15], круглих і еліптичних [16–19], у тому числі з різними граничними умовами. Теорія коливань пластин та оболонок [12, 13] у різних варіантах запису широко застосовується в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики [20–24]. У [9–11], зокрема, використано формули для моделі квадратного підповерхневого дефекту. Згідно з цією моделлю, область інтересу над плоским дефектом можна розглядати як тонку квадратну мембрану, затиснуту по краях. Якщо такий дефект збуджують на одній з його резонансних частот, тобто на одній з резонансних частот області інтересу над дефектом, то на виході ОАС формуватиметься оптичний просторовий відгук від дефекту. Для круглого плоского підповерхневого дефекту також можна використати модель затиснутої по краях круглої пластини з ізотропного матеріалу, яку можна розглядати як область інтересу над підповерхневим дефектом, розміри якої відповідають розмірам дефекту. Згідно з [13, 20], формула для визначення основної частоти  $f_{01}$  резонансного коливання такої пластини має вигляд:

$$f_{01} = 0,47 \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}, \quad (2)$$

де  $a$  – радіус мембрани, мм;  $h$  – глибина залягання дефекту, мм;  $E$  – модуль Юнга, ГПа;  $\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

**Експериментальні дослідження.** Експериментальні дослідження з виявлення та ідентифіка-

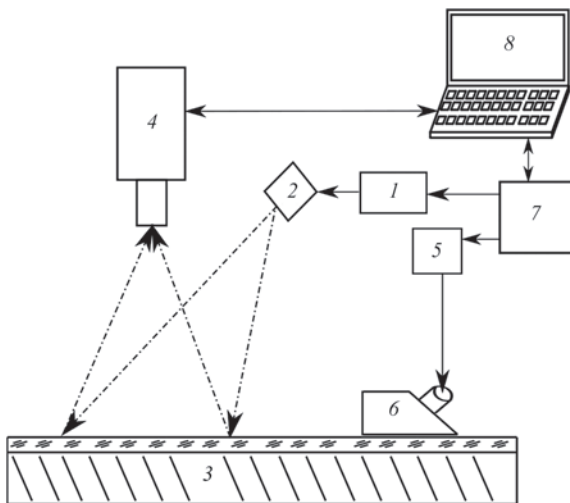


Рис. 1. Спрощена оптична схема макета ОАС: 1 – напівпровідниковий лазер з амплітудною модуляцією; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – склопластикові шарувата структура, що містить шари склотекстоліту СТЕФ-1 та підповерхневі дефекти у середньому шарі; 4 – цифрова камера з об'єктивом; 5 – ширококутовий генератор сигналу для п'єзоперетворювача; 6 – п'єзоперетворювач; 7 – блок керування; 8 – комп'ютер

ції підповерхневих круглих площинних дефектів проведено на зразках склопластикових шаруватих структур розмірами 400×250 мм, кожен з яких був виготовлений із трьох пластин склотекстоліту СТЕФ-1 та епоксидно-фенольної полімерної смоли як сполучного матеріалу [10]. Нижній шар, пластина склотекстоліту СТЕФ-1 завтовшки 5 мм, забезпечував жорсткість структури. У середньому шарі, у пластині склотекстоліту завтовшки 1,5 мм, вирізали серію круглих і квадратних отворів. Виготовлені з того ж матеріалу верхні шари у зразках мають різну товщину. У зразку № 1 склопластикової шаруватої структури, який досліджували, верхній шар має товщину 0,41 мм, тобто глибина залягання дефектів у цьому зразку становить  $h = 0,41$  мм. На рис. 2 зображено схему розташування круглих підповерхневих дефектів у виділеній секції зразка № 1 з товщиною верхньої пластини склотекстоліту  $h = 0,41$  мм, пронумерованих від 1 до 5 у порядку зменшення діаметрів дефектів.

У розробленому макеті ОАС реалізовано спосіб швидкого тестування досліджуваної поверхні в режимі реального часу. Для цього після встановлення всіх необхідних параметрів системи проводимо аналіз різницевого ЦСЗ у широкому діапазоні зміни частоти збудження зразка пружною хвилею. Кожне різницеве ЦСЗ попіксельно аналізуємо на предмет перевищення певного наперед встановленого рівня шуму (РШ) і за умови його перевищення у конкретному пікселі зображення фіксуємо цю подію лічильником. Після такої перевірки для кожного різнищевого ЦСЗ і для кожної заданої частоти збудження отримуємо  $M$  пікселів із перевищенням рівня шуму. Далі це число ділимо на повну кількість пікселів у зображенні та в результаті отримуємо відсоток від площі оптичного просторового відгуку від області інтересу, що перевищує рівень шуму, а, отже, може містити підповерхневий дефект. Під час цієї процедури для кожної частоти збудження у разі перевищення РШ відбувається збереження різнищевих ЦСЗ. Отримане різницеве ЦСЗ у подальшому аналізуємо та опрацьовуємо за допомогою найпростіших алгоритмів цифрової обробки зображень (ЦОЗ).

Під час НК зразка № 1 за допомогою макета ОАС отримували різницеві ЦСЗ поверхні зразка і аналізували оптичні просторові відгуки від дефектів №№ 1–4 у діапазоні зміни частоти п'єзо-

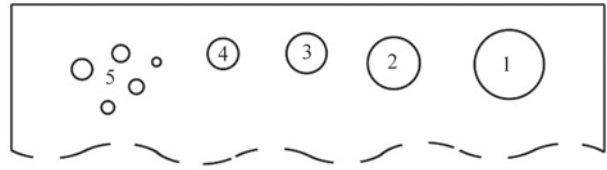


Рис. 2. Схема розташування круглих підповерхневих дефектів у виділеній секції зразка № 1 склопластикової шаруватої структури та їх діаметри, мм: 1 – 45; 2 – 35; 3 – 25; 4 – 20; 5 – група з п'яти дефектів діаметром від 1 до 14, 12, 10, 8, 6 мм

лектричного перетворювача 1...50 кГц. На рис. 3 зображено різницеві ЦСЗ після застосування процедури ЦОЗ, на яких чітко виділилися оптичні просторові відгуки від круглих дефектів різних діаметрів.

З аналізу зображень на рис. 3 можна простежити кореляцію між площами оптичних відгуків і площами відповідних дефектів, причому зі зменшенням розмірів дефектів відбувається зменшення площі відгуків від них. Так, наприклад, на рис. 3, а наведено оптичний відгук від підповерхневого дефекту № 1 діаметром 45 мм на резонансній частоті  $f_{01} = 1,8$  кГц. На рис. 3, б на резонансній частоті  $f_{01} = 2,8$  кГц зображено оптичний відгук від дефекту № 2 діаметром 35 мм. Однак відгук від круглого дефекту № 3 (рис. 3, в) на резонансній частоті  $f_{01} = 4,6$  кГц є значно меншим за його діаметр, що можна пояснити занадто слабким відгуком поверхні зразка, викликаним значною відстанню між джерелом збудження та цим дефектом. Тому для отримання різнищевих ЦСЗ від решти тестових дефектів джерело збудження перемістили ближче до місця їх розташування. На рис. 3, г показано оптичний відгук від дефекту діаметром 20 мм на резонансній частоті  $f_{01} = 7,6$  кГц, розмір якого також менший за розмір дефекту. Незважаючи на відсутність можливості точного визначення радіуса круглого підповерхневого дефекту, оцінювання його розміру є задовільним і достатнім для задач НК. На рис. 4 наведено покращені різницеві ЦСЗ для групи дефектів № 5. На рис. 4, а, б, в зображено область поверхні зразка, де зосереджено чотири з п'яти дефектів групи № 5, у тому числі найбільший дефект діаметром 14 мм (рис. 4, а) отриманий на резонансній частоті  $f_{01} = 13,8$  кГц. Найменший дефект з групи дефектів № 5 діаметром 6 мм у досліджуваному діапазоні частот побачити не вдалося. На рис. 4, б можна спостері-

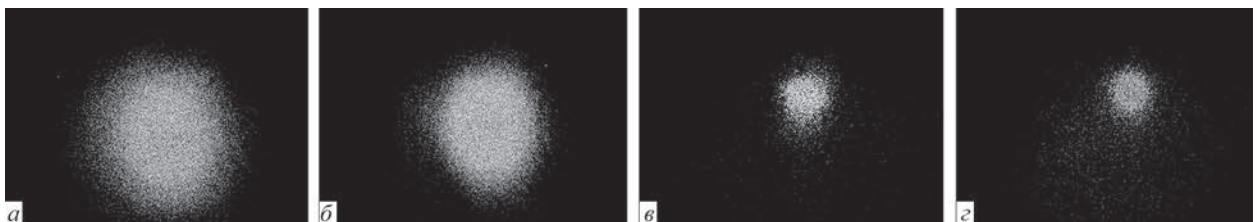


Рис. 3. Оптичні просторові відгуки від підповерхневих дефектів № 1 – діаметром 45 мм (а), № 2 – 35 (б), № 3 – 25 (в), № 4 – 20 (г), що виділилися на різнищевих ЦСЗ

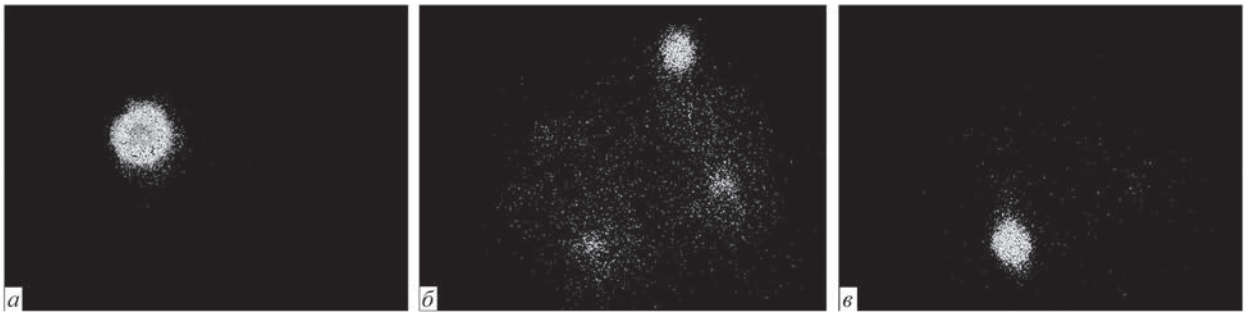


Рис. 4. Різницеві ЦСЗ групи підповерхневих дефектів № 5 (рис. 2), зафіксовані за найбільшої інтенсивності оптичних відгуків від дефектів діаметром 14 (а), 12 (б), 8 мм (в)

гати одночасно дефекти з діаметром 12, 10 і 8 мм на резонансній частоті  $f_{01} = 21,6$  кГц. На цій частоті найбільший відгук формує дефект діаметром 12 мм. На рис. 4, в показано оптичний відгук від дефекту діаметром 8 мм на частоті  $f_{01} = 35,8$  кГц.

На рис. 5 зображені теоретична (крива 1) та експериментальна (крива 2) залежності резонансної частоти  $f_{01}$  від розмірів підповерхневих дефектів у зразку № 1. Номерами помічені експериментальні дані, отримані для круглих дефектів, пронумерованих на рис. 2. Для отримання теоретичної залежності (кривої 1) використано формулу (2), значення параметрів якої взято з [10] на підставі експериментальних даних для склотекстолітової пластини СТЕФ-1. Тут глибина залягання дефекту  $h = 0,41$  мм, модуль пружності  $E = 23,3 \pm 1,3$  ГПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,14 \pm 0,02$  та густина матеріалу  $\rho = (1,7 \pm 0,05) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Як показують отримані залежності, найкраща збіжність між ними спостерігається для радіуса круглого дефекту в межах 6...18 мм, що відповідає підповерхневим дефектам №№ 2–5. Незважаючи на це, результати дослідження свідчать про придатність використання формули (2) для встановлення глибини залягання дефекту з достатньою точністю в усьому дослідженому діапазоні. Відхилення експериментальних результатів від теоретичних, зображені на рис. 5, можна

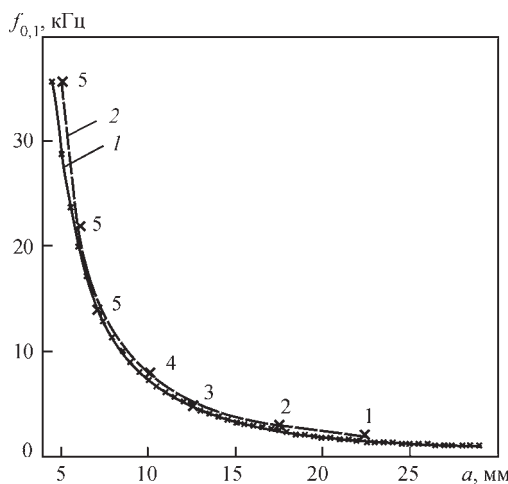


Рис. 5. Теоретична (1) та експериментальна (2) залежності резонансної частоти  $f_{01}$  від радіуса круглого дефекту  $a$

пояснити, зокрема, недосконалістю формули (2) для визначення основної резонансної частоти  $f_{01}$ , відхиленнями у розмірах виготовлених дефектів, ортотропією матеріалу тощо. Одним із способів покращення точності визначення параметрів підповерхневого дефекту невідомих розмірів та глибини залягання є визначення не лише основної резонансної частоти  $f_{01}$ , але й частот вищого порядку. Визначивши ці частоти експериментально та використавши формулу (2), а також відповідні коефіцієнти для знаходження кратних резонансних частот для ізотропного матеріалу, можна за просторовою структурою оптичних відгуків експериментально визначити ці резонансні частоти, а відтак при незмінних параметрах поверхневого шару композитної пластини встановити глибину залягання дефекту. Зауважимо, що для круглого підповерхневого дефекту просторова структура оптичних відгуків на основній і кратних резонансних частотах відповідає структурі вузлів і пучностей круглої мембрани такого ж діаметра, що і діаметр дефекту, на тих же резонансних частотах.

Таким чином, результати досліджень круглих підповерхневих дефектів за допомогою макета ОАС та отримана експериментальна залежність резонансної частоти  $f_{01}$  від радіуса дефекту  $a$  на глибині залягання  $h = 0,41$  мм свідчать про принципову можливість оцінювання площі підповерхневого дефекту та його геометричних параметрів.

### Висновки

На основі розробленого ОАМ створено макет ОАС, який дає змогу виявляти підповерхневі дефекти в композитних шаруватих структурах за допомогою серій динамічних спекл-зображень поверхні шару композиту над дефектом, збудженого згинальною пружною хвилею, після рестрації яких формують різницеві ЦСЗ і виявляють оптичні просторові відгуки від дефектів за їх наявності в полі зору цифрової камери. Формування динамічних спекл-зображень не вимагає використання додаткового опорного променя в ОАС, що дає можливість конструювати на її основі швидкодіючі оптико-цифрові пристрої НК підповерхневих дефектів, малочутливі до вібрацій та інших зовніш-

ніх факторів і здатні працювати в натурних умовах. Показано, що за допомогою різницевого ЦСЗ, отриманих на основних резонансних частотах  $f_{01}$  круглих підповерхневих дефектів, можна їх виявляти у склопластикових шаруватих структурах і визначати їх розміри з діаметрами в межах 8...45 мм.

### Список літератури/References

1. Newman, J.W. (2012) *Laser Testing: Shearography & Holography*. Ed. by P.O. Moore. The Nondestructive Testing Overview, Columbus Ohio, American Society for Nondestructive Testing.
2. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A. (2014) Diagnostics of structures by the methods of electron shearography and speckle-interferometry. *Materials Sci.*, **49**, 442–448. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9635-5>
3. Howell, P.A. (2020) *Nondestructive Evaluation (NDE) Methods and Capabilities: Handbook*, NASA/TM–2020-220568, Vol I. Langley Research Center, Hampton, VA, USA.
4. Nazarchuk, Z., Muravsky, L., Kuryliak, D. (2023) Digital speckle pattern interferometry for studying surface deformation and fracture of materials. In: *Optical Metrology and Optoacoustics in Nondestructive Evaluation of Materials*. Springer Series in Optical Sciences, **242**. Singapore: Springer, 149–217. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1_4)
5. Chatters, T., Pouet, B., Krishnaswamy, S. (1992) *Shearography with Synchronized Pressure Stressing*. Eds. by D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Review of Progress in Quantitative NDE, La Jolla, CA, Plenum Press, 426. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2848-7\\_54](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2848-7_54)
6. Hung, Y.Y., Yang, L.X., Huang, Y.H. (2013) Non-destructive evaluation (NDE) of composites: Digital shearography. Ed. by V.M. Karbhari, In: *Non-destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*. Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 84–115.
7. Muravsky, L., Kuts, O., Gaskevych, G., Suriadova, O. (2019) Detection of subsurface defects in composite panels using dynamic speckle patterns. In: *Proc. Of IEEE XI Inter. Scientific and Practical Conf. on Electronics and Information Technologies, 2019*, 7–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/LIT.2019.8892294>
8. Nazarchuk, Z., Muravsky, L., Kuryliak, D. (2019) To the problem of the subsurface defects detection: Theory and experiment. *Procedia Structural Integrity*, **16**, 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.016>
9. Nazarchuk, Z.T., Muravsky, L.I., Kuts, O.G. (2022) Non-destructive testing of thin composite structures for subsurface defects detection using dynamic laser speckles. *Research in Nondestructive Evaluation*, **33**, 59–77. DOI: <https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2049407>
10. Muravsky, L., Nazarchuk, Z., Kuts, O., Sharabura, O. (2023) Identification of internal planar square defects in composite panels using optoacoustic technique. In: *Proc. of IEEE 13th Inter. Conf. on Electronics and Information Technologies, ELIT 2023*, 265–269. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELIT61488.2023.10310846>
11. Nazarchuk, Z., Muravsky, L., Kuryliak, D. (2023) Methods for processing and analyzing the speckle patterns of materials surfaces. In: *Optical Metrology and Optoacoustics in Nondestructive Evaluation of Materials*. Springer Series in Optical Sci., **242**. Singapore: Springer, 249–323. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1_6)
12. Timoshenko, S.P., Woinowsky-Krieger, S. (1959) *Theory of Plates and Shells*. 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill, New York.
13. Leissa, A.W. (1969) *Vibration of Plates*. Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Administration.
14. Li, W.L. (2004) Vibration analysis of rectangular plates with general elastic boundary supports. *J. of Sound and Vibration*, **273**(3), 619–635. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00562-5](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00562-5)
15. Guguloth, G.N., Singh, B.N., Ranjan, V. (2019) Free vibration analysis of simply supported rectangular plates. *Vibroengineering Procedia*, **29**, 270–273. DOI: <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21135>
16. Chakraverty, S., Jindal, R. Agarwal, V.K. (2007) Effect of non-homogeneity on natural frequencies of vibration of elliptic plates. *Meccanica*, **42**, 585–599. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11012-007-9077-3>
17. Maiz, S., Rossit, C.A., Bambill, D.V., Susca, A. (2009) Transverse vibrations of a clamped elliptical plate carrying a concentrated mass at an arbitrary position. *J. of Sound and Vibration*, **320**(4–5), 1146–1163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.09.013>
18. Zhou, Z.H., Wong, K.W., Xu, X.S., Leung, A.Y.T. (2011) Natural vibration of circular and annular thin plates by Hamiltonian approach. *J. of Sound and Vibration*, **330**(5), 1005–1017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.09.015>
19. Anjomshoa, A., Tahani, M. (2016). Vibration analysis of orthotropic circular and elliptical nano-plates embedded in elastic medium based on nonlocal Mindlin plate theory and using Galerkin method. *J. of Mechanical Sci. and Technology*, **30**, 2463–2474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0506-x>
20. Cawley, P. (1984) The impedance method of non-destructive inspection. *NDT Intern.*, **17**(2), 59–65. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(84\)90045-2](https://doi.org/10.1016/0308-9126(84)90045-2)
21. Cawley, P., Theodorakopoulos, C. (1989) The membrane resonance method of non-destructive testing. *J. of Sound and Vibration*, **130**(2), 299–311. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(89\)90555-5](https://doi.org/10.1016/0022-460X(89)90555-5)
22. Ma, C.C., Huang, C.H. (2004) Experimental whole-field interferometry for transverse vibration of plates. *J. of Sound and Vibration*, **271**(3–5), 493–506. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00276-1](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00276-1)
23. Bruno, F., Laurent, J., Prada, C. et al. (2014) Non-destructive testing of composite plates by holographic vibrometry. *J. of Applied Physics*, **115**(15), 154503. DOI: <https://dx.doi.org/10.1063/1.4871178>
24. Lamboul, B., Giraudo, O., Osmont, D. (2015) Detection of disbands in foam composite assemblies using flexural waves and shearography. In: *AIP Conf. Proceedings*, **1650**(1), 1155–1161. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4914725>

## DETECTION OF CIRCULAR SUBSURFACE DEFECTS IN LAMINATED COMPOSITES USING OPTICAL-ACOUSTIC NONDESTRUCTIVE TESTING SYSTEM

O.M. Sharabura, L.I. Muravsky, O.G. Kuts

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

An optical-acoustic system layout for nondestructive testing of subsurface defects in laminated composites is created. Detection and localization of subsurface defects in composite laminated structures with the help of the optical-acoustic system layout is performed by forming a series of dynamic speckle patterns of the composite surface, which is excited by a flexural elastic wave, their subsequent registration and accumulation in order to generate differential digital speckle patterns and extract optical spatial responses from defects. To assess the efficiency of detecting such defects, fiberglass laminated structures were manufactured containing three layers of glass textolite plates and circular flat defects of various sizes in the middle layer. Based on the conducted studies, an experimental dependence of the fundamental resonance frequency of circular subsurface defects on their sizes was obtained, which is close to the theoretically plotted one. It is shown that using the created optical-acoustic system layout, it is possible to detect such defects in a wide range of changes in their sizes. 24 Ref., 5 Fig.

*Keywords:* optical-acoustic system, dynamic speckle pattern, circular subsurface defect, region of interest, difference speckle pattern, elastic wave, laminated composite

Отримано 24.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 14.11.2024

Прийнято 20.12.2024

# ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖКРИСТАЛІТНОГО КОРОЗІЙНОГО РОЗТРІСКУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБОПРОВОДІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС. МАТЕРІАЛОЗНАВЧИЙ АСПЕКТ

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

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

Корозійне розтріскування під напруженням, подібно до міжкристалітної корозії у зварних швах аустенітної сталі, при контакті з корозійним середовищем вражає переважно границі зерен у зоні термічного впливу, що призводить до сенсифікації – зниження структурної цілісності, спричиняючи розтріскування та втрату зерен. Об'єктом досліджень були зразки, вирізані з «котушок» із трубопроводів 3-го енергоблоку ЧАЕС у районах пошкоджених зварних з'єднань. На підставі радіографічного та ультразвукового контролю зварних швів трубопроводів, а також визначення у досліджуваних зразках вмісту легуючих елементів, механічних властивостей, металографічних, фрактографічних і мікрорентгеноспектральних досліджень, включаючи дослідження поверхонь руйнування зразків, що циклічно навантажувалися, з урахуванням борозенок втоми, а також з огляду щодо вирішення проблеми корозійного розтріскування аустенітних сталей у киплячих реакторах, було розроблено комплекс заходів: довгострокові заходи – заміна сталей на інші, що не схильні до корозійного розтріскування; короткострокові заходи – нанесення зовнішнього зварного покриття, ремонт дефектних ділянок, зняття залишкових напружень; тимчасові заходи – обґрунтування допустимості експлуатації дефектного зварного шва. Бібліогр. 9, табл. 5, рис. 8.

*Ключові слова:* радіографічний та ультразвуковий контроль зварних з'єднань, міжкристалітна корозія, корозійне розтріскування під напруженням, корозійностійка сталь, трубопроводи, легуючі елементи, карбіди хрому, борозенки втоми

**Вступ.** Корозійне розтріскування під напруженням у зварних з'єднаннях (ЗЗ), подібно до міжкристалітної корозії (МКК), може відбуватися практично без візуальних ознак корозійного впливу [1]. Металографічні та фрактографічні дослідження зламів, які виконані на вирізаних з трубопроводів блоку № 3 пошкоджених кільцевих зварних швів (трубопроводи 1-го контуру із зовнішнім діаметром 325 мм і товщиною стінки 16 мм), виявили міжзеренний (при розповсюдженні тріщини в зоні термічного впливу) і внутрішньозеренний (при розповсюдженні тріщини по металу шва) характер руйнування. Поверхні тріщини окислені. Спостерігається суттєве корозійне пошкодження з характерним розгалуженням тріщини в обох випадках [2]. МКК, як відомо, – це вид локальної корозії сталей і сплавів, коли при контакті з корозійним середовищем виникає різниця потенціалів між границями та тілом зерен. Цей тип корозії зазвичай має місце, коли у сплаві відбувається виділення фази із твердого розчину. У більшості випадків виділення відбувається швидше на границях зерен, так звана сенсифікація, унаслідок чого матеріал поблизу границь зерен збіднюється легуючим елементом. Ознаки ураження міжкристалітною корозією нержавкої сталі, на відміну від інших форм корозії (пітингова, щілинна, фреттинг-корозія), не завжди вияв-

ляються на поверхні металу. Поява міжкристалітної корозії відбувається на мікроскопічному рівні, впливаючи на саму структуру металу, та вимагає певних умов, яких у деяких випадках можливо уникнути. Виділення карбідів хрому на границях зерен у нержавких аустенітних сталях зазвичай відбувається при нагріванні від 540 до 845 °С, що призводить до збіднення границь зерен за хромом і, отже, посилення чутливості до корозії. Найчастіша причина сенсифікації – зварювання. Крім того, вказані температури найбільш поширені під час термічної обробки або експлуатації у високо-температурному середовищі.

Таким чином, міжкристалітна корозія у зварному шві нержавкої сталі вражає переважно границі зерен у зоні термічного впливу, що призводить до зниження структурної цілісності, викликаючи розтріскування та втрату зерен. У той же час у зварних конструкціях із феритних сталей руйнування відбувається як в області, безпосередньо прилеглої до місця зварювання, так і у самому зварному шві. Ігнорування ризиків міжкристалітної корозії може призвести до катастрофічного виходу з ладу або часткового порушення відповідальних зварних споруд і різних компонентів конструкцій із нержавкої сталі, у тому числі обладнання АЕС, трубопроводів, що використовують при транспортуванні нафти та газу тощо.

В.М. Тороп – <https://orcid.org/0000-0002-8807-9811>, М.Д. Рабкіна – <https://orcid.org/0000-0003-3498-0716>,

Є.О. Давидов – <https://orcid.org/0000-0003-3470-2329>

© В.М. Тороп, М.Д. Рабкіна, Є.О. Давидов, 2024

**Вплив легуючих елементів на механізм МКК у нержавкх сталях.** Нержавкі сталі традиційно використовуються трьох класів: феритні, мартенситні та аустенітні, рідше двофазні. До найбільшої групи серед всіх нержавкх сталей належать аустенітні корозійностійкі сталі, які становлять 60...70 % світового споживання. Вони зазвичай містять 16...25 % Cr, 6...14 % Ni, іноді 2...6 % Mo і невелику кількість інших елементів. Найрозповсюдженішим прикладом є сталь марки 08X18H10T. Слід зазначити, що сталь 08X18H10T, яка застосовується для виготовлення труб, є аналогом нержавкої аустенітної сталі AISI 321, стабілізованої титаном.

Основним легуючим елементом у корозійностійких сталях, що забезпечує здатність сталі до пасивації у широкому інтервалі потенціалів, є хром. Нестійкість хрому виявляється тільки в області потенціалів  $-0,58$  В у сильно відновлювальних середовищах і  $1,3$  В у сильно окислювальних середовищах (табл. 1).

Вплив хрому на МКК тісно пов'язаний з карбідоутворенням. При постійній температурі загартування мінімальний час  $\tau_{min}$ , необхідний для утворення карбідів, залежить від швидкості дифузії вуглецю та хрому. В області низьких температур поява схильності до МКК контролюється дифузиею хрому, а при вищих температурах – дифузиею вуглецю. Через те, що здатність вуглецю утворювати карбіди визначається його термодинамічною активністю, на яку істотно впливає хімічний склад сталі, допустимий вміст вуглецю залежить від вмісту легуючих елементів у сталі – нікелю, молібдену та ін.

Нікель, кремній та кобальт підвищують активність вуглецю, тобто полегшують утворення карбідів; молібден, вольфрам, ванадій, ніобій та марганець знижують активність вуглецю, тобто гальмують утворення карбідів. Нікель у корозійностійкі сталі вводиться для забезпечення стабільності аустенітної структури та для підвищення корозійної стійкості сталі в основному в

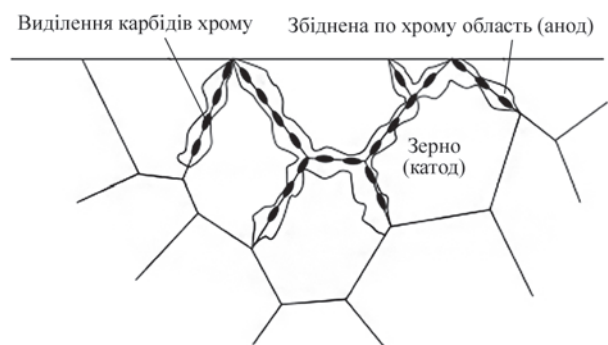
**Таблиця 1. Вплив легуючих елементів у сталі на підставі анодних поляризаційних кривих чистих металів [3]**

Значення потенціалу E, В	Характеристика середовища	Швидкість розчину металу в ряду
-0,5	сильно відновлювальне	Ni < Mo < W < Fe < Cr < Mn
-0,05	неокислювальне	Mo < Cr < W < Ni < Fe < Mn
+0,2	слабо окислювальне	Mo < Cr < W < Ni < Fe < Mn
+0,6	середньо окислювальне	Cr < Ni < Fe < W < Mo < Mn
+1,1	окислювальне	Cr < Ni < Fe < W < Mo < Mn
+1,3	сильно окислювальне	Fe < Ni < W < Cr < Mo

середовищах відновлювального характеру, хоча він має задовільну корозійну стійкість у широкому діапазоні потенціалів. Молібден посилює здатність хромонікелевих сталей до самопасивації та суттєво підвищує їх стійкість у неокислювальних і слабо окислювальних середовищах. У окислювальних і сильно окислювальних середовищах швидкість корозії молібдену та багатих на них фаз велика (табл. 1).

Один з найпоширеніших способів запобігання МКК – легування корозійностійких сталей карбідоутворюючими елементами. Найстійкіші карбіди утворюють титан, ніобій і тантал, але частіше використовується стабілізація титаном і ніобієм. Відповідно до стехіометричної формули карбідів титану та ніобію для зв'язування вуглецю рекомендується вводити титан у 5-кратній, а ніобій – у 8–11-кратній кількості по відношенню до вуглецю. Спеціальні карбіди TiC і NbC не є повністю нерозчинними. Їх розчинність залежить від ступеня стабілізації, але температура їх розчинення значно вище температури розчинення карбідів хрому. У порівнянні з низьковуглецевими, стабілізовані сталі схильні до МКК приблизно в тому ж інтервалі температур, але в стабілізованій сталі схильність до МКК при тривалих витримках зникає. Останнє пояснюється тим, що в стабілізованих сталях залежно від ступеня стабілізації спочатку утворюється деяка кількість  $M_{23}C_6$ , а не спеціальний карбід TiC або NbC через уповільнену дифузиею титану та ніобію. Зі збільшенням витримки утворюються карбіди TiC або NbC – відбувається розчинення карбіду хрому та збіднення по хрому зникає.

Оскільки виділення карбідів з твердого розчину відбувається швидше на границях зерен (рис. 1), матеріал поблизу границь зерен збіднюється легуючим елементом, створюючи різницю потенціалів, що сприяє кращому розчиненню приграничних зон сплаву. МКК спостерігається в Cr-і Cr-Ni-сталях і призводить до різкого зниження міцності та пластичності сплаву, що може викликати передчасне руйнування конструкції. До МКК призводить повільне охолодження сплаву з про-



**Рис. 1. Схематичне зображення виділення карбідів на границях зерен в аустеніті [4]**



ходженням небезпечної області температур і навіть тривалі зварювальні роботи. При швидкому охолодженні цього не спостерігають.

Таким чином, МКК сталей і сплавів відбувається, коли при контакті з корозійним середовищем – електролітом – виникає різниця потенціалів між границями та тілом зерен. У цілому, в корозійностійких Cr- і Cr–Ni-сталях можна виділити три основні механізми міжкристалітної корозії:

- збіднення приграничних областей зерен елементами, що зумовлюють стійкість матеріалу в даному середовищі;
- низька хімічна стійкість фаз, що виділяються по границях;
- сегрегація на границях зерен поверхнево активних елементів, що знижують стійкість основи у цьому середовищі.

Зазначені механізми МКК можуть діяти в різних сталях одночасно, але визначальний вплив на швидкість корозії має якийсь один. Зазвичай має місце виділення фази із твердого розчину.

**Міжкристалітне корозійне розтріскування під напруженням (МККРПН).** Проблема корозійного розтріскування зварних швів аустенітних сталей у киплячих ядерних реакторах (BWP) та легководних ядерних реакторах (LPW) вперше виникла у 70-х роках ХХ-го століття [5]. Західні країни та Японія з проблемою розтріскування зварних з'єднань трубопроводів, виготовлених із аустенітних нержавіючих сталей на АЕС із реакторами типу LPW, стикнулися на початку 70-х років ХХ-го століття. У США вперше тріщини було виявлено на другому блоці АЕС «Дрезден» у вересні 1974 р. Потім на АЕС США проблема корозійного розтріскування набула великих масштабів. У середньому 25 % зварних з'єднань мали тріщини, причому на деяких блоках рівень дефектності сягав 50 %.

У зв'язку з цим було розроблено спеціальну програму технологічних, розрахункових та експериментальних робіт [5] з метою вирішення питань:

- необхідності ремонту виявлених тріщин;
- дефектоскопії всіх зварних швів;
- оцінки довговічності дефектних чи відремонтованих перерізів;
- довгострокових рішень, які включають заміну трубопроводних систем.

Великі капітальні вкладення були спрямовані на пошук покращувальних заходів. Як найбільш доступні та обгрунтовані були запропоновані наступні:

- індукційне нагрівання для зняття залишкових напружень;
- нанесення зовнішнього зварювального покриття;
- механічне обтиснення зовнішньої поверхні труби поблизу дефектного ЗЗ.

Як довгострокову мету та як основний напрямок боротьби з явищем МККРПН на фірмі KWU Siemens було почато розробку нових видів сталей, не схильних до сенсibiliзації та корозії [6].

У Японії дослідження МККРПН виконувалося у межах національної програми забезпечення надійності трубопроводних систем, основною метою якої було:

- демонстрація цілісності трубопроводної системи в період експлуатації з урахуванням як втоми, так і особливо МККРПН за достатніх коефіцієнтів запасу;
- верифікація концепції «течія перед руйнуванням» у трубопроводних системах;
- демонстрація ефективних захисних пристроїв при гільйотинному руйнуванні.

Таким чином, на підставі огляду щодо вирішення проблеми корозійного розтріскування аустенітних сталей у киплячих реакторах було розроблено наступний комплекс заходів:

- довгострокові заходи – заміна сталей на інші, не схильні до корозійного розтріскування;
- короткострокові заходи – нанесення зовнішнього зварного покриття, ремонт дефектних ділянок, зняття залишкових напружень;
- тимчасові заходи – обгрунтування допустимості експлуатації дефектного зварного шва.

**Матеріалознавчі аспекти стану трубопроводів Ду300 блоку № 3 ЧАЕС.** Енергоблок № 3 Чорнобильської АЕС (ЧАЕС) належить до блоків другого покоління реакторів потужності 1000 МВт (РБМК-1000) і являє собою гетерогенний каналний реактор на теплових нейтронах з графітовим уповільнювачем і киплячим легководним теплоносієм. РБМК-1000 має типову для одноконтурних реакторів, що охолоджуються киплячою водою, теплову схему, яка складається з каналних труб і трубопроводів різного діаметра, що утворюють у сукупності контур багаторазової примусової циркуляції (КМПЦ), а також паропроводу, що подає пару до турбін. Більша частина трубопроводів Ду300 КМПЦ (опускні трубопроводи (ОТ), напірні трубопроводи (НТ), система автоматичного охолодження реактору (САОР) та інші) мають зовнішній діаметр 325 мм, номінальну товщину стінки 16 мм і виготовлені із аустенітної сталі, стабілізованої титаном 08X18H10T, яка є аналогом нержавіючої аустенітної сталі AISI 321.

Під час зупинки третього енергоблоку ЧАЕС на планово-попереджувальний ремонт у 1997 р. було проведено 100%-й радіографічний контроль зварних швів трубопроводів ОТ, НТ і САОР (табл. 2). На цей час обладнання блоку № 3 ЧАЕС виробило ресурс 99230,33 годин експлуатації. У відповідності до Інструкції [7] та на основі «Ро-

**Таблиця 2. Результати радіографічного контролю зварних швів трубопроводів системи безпеки енергоблоку № 3 ЧАЕС, отримані в 1997 р.**

Тип трубопроводів	№ приміщення	Кількість проконтрольованих зварних швів	Кількість виявлених дефектів	
			тріщин	дефектів зварних
Опускні трубопроводи	804/1 БС 21	120	9	4
	БС 22	96	9	6
	804/2 БС 11	96	21	10
	БС 12	120	17	4
	403/1 БС 21	84	7	-
	БС 22	84	6	3
	403/2 БС 11	84	9	6
	БС 12	84	11	6
Разом		768	89	39
Напірні трубопроводи	404/1	88	23	-
	404/2	88	17	3
	403/1	160	23	4
	403/2	160	17	3
	Разом	496	80	10
Трубопроводи системи аварійного охолодження реактора	404/1	15	4	2
	404/2	12	6	1
	405	51	14	6
	216	14	5	3
	02	95	1	2
	Разом	187	30	14
Всього		1451	199	63

бочої програми по вирізці ділянок трубопроводів 3-го блоку для проведення досліджень стану основного металу і зварних з'єднань після 100 тис. год. експлуатації» була проведена вирізка ділянок трубопроводів. Ділянки трубопроводів, що вирізались, знаходилися в експлуатації з грудня 1981 р.

Програма включала: визначення механічних властивостей ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_r$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) і ударної в'язкості при температурах кімнатній (20 °С) і 350 °С; твердість (НВ) за поперечним перерізом труб; визначення хімічного складу основного металу і зварних з'єднань; дослідження мікроструктури; визначення характеристик циклічної тріщиностійкості основного металу і зварного з'єднання. У процесі ра-

діаційного контролю 1451 зварних з'єднань ОТ, НТ і трубопроводів САОР Ду 300 були виявлено 199 дефектів у вигляді тріщин і 63 дефекти зварювання. Усі виявлені дефекти було відремонтовано в 1997 р. Оскільки впевненості в тому, що всі дефекти зварних швів методом радіографічного контролю були виявлені, керівництвом ЧАЕС було прийняте рішення щодо проведення 100%-го ультразвукового контролю (УЗК) доступних для УЗК зварних швів. Результати УЗК, що були отримані протягом 1997–1998 рр., наведені у табл. 3.

У зв'язку з тим, що відремонтувати всі знову виявлені дефекти на ЧАЕС не було можливим, то було прийнято рішення оцінити спроможність по-

**Таблиця 3. Результати ультразвукового контролю зварних швів трубопроводів системи безпеки енергоблоку № 3 ЧАЕС, отримані в 1997–1998 рр.**

Тип трубопроводів	№ приміщення	Кількість проконтрольованих зварних швів	Кількість виявлених дефектів
Опускні трубопроводи	804/1 БС 21	107	9
	БС 22	81	7
	804/2 БС 11	65	6
	БС 12	99	19
	403/1 БС 21	77	12
	БС 22	75	11
	403/2 БС 11	69	9
	БС 12	67	9
Разом		640	82
Напірні трубопроводи	404/1	65	18
	404/2	68	17
	403/1	111	26
	403/2	118	32
	Разом	368	93
Трубопроводи системи аварійного охолодження реактора	404/1	9	-
	404/2	5	3
	405	31	2
	216	6	2
	02	92	1
	Разом	143	8
Всього		1145	183

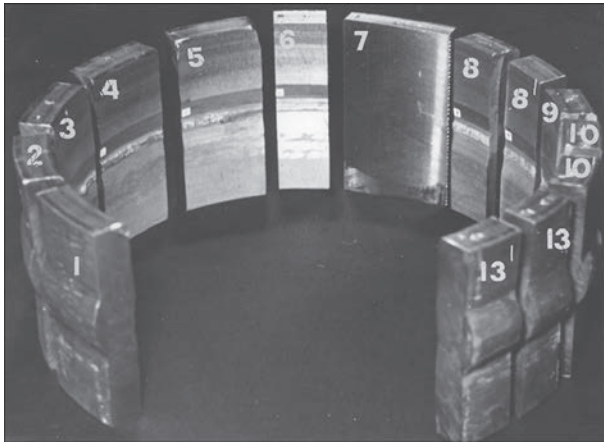


Рис. 2. Загальний вид «котушки» зі зварним швом, розрізаної на темплеті

дальшої експлуатації трубопроводів систем безпеки ЧАЕС з виявленими дефектами ще один рік (до наступного планово-попереджувального ремонту).

У процесі дослідження пошкоджених зварних з'єднань трубопроводів вивчали:

- якість металу зварюваних труб;
- зони переважного зародження тріщин і характер їх поширення;
- механізм поширення розкритих тріщин (фрактографія).

Об'єктом досліджень були зразки, вирізані з «котушок» (рис. 2) із трубопроводів 3-го енергоблоку ЧАЕС у районах пошкоджених зварних з'єднань, у тому числі: опускних – 53 одиниці, напірних – 32 одиниці та 4 одиниці САОР.

На рис. 2 показано розрізану на темплеті «котушку», яка містить зварний шов (у даному випадку це шов №8 напірного трубопроводу). Темплеті розташовані в тому ж порядку, що й у нерозрізаної «котушки», а вказані на темплетях номери дозволяють локалізувати наступні дослідження шляхом посилення на відповідний номер темплета.

Визначення вмісту легуючих елементів досліджуваних зразків проводили на скануючому електронному мікроскопі Camascan з рентгенівським спектрометром System 860 CP2-50 фірми Link System. Для отримання достовірних результатів

Таблиця 4. Хімічний склад (мас. %) металу труб зі сталі 08X18H10T

Ділянка зварного з'єднання	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Ti	Cu
Основний метал ліворуч	0,08	1,41	0,55	19	10,17	–	0,035	0,4	0,07
Основний метал праворуч	0,08	0,99	0,23	19,28	10,21	0,018	–	0,428	0,3
Вимоги згідно з ТУ 14-3-197-73 на поставку за ГОСТ 5632-72	≤ 0,08	≤ 1,5	≤ 0,8	17÷19	10÷11	≤ 0,02	≤ 0,035	5C±0,06	≤ 0,3

Таблиця 5. Механічні властивості трубчастих зразків із досліджуваної сталі 08X18H10T

Зразки з труб	T, °C	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCV, кгс·м/см <sup>2</sup>
Діаметр 325×16	+20	434	641	49,1	58,8	19,0
		473	656	41,8	64,8	22,9
		361	665	42,5	66,3	19,1

виміри проводили в декількох точках. Приклад результатів наведено в табл. 4.

Визначення механічних властивостей здійснювали на плоских або п'ятикратних циліндричних зразках (тип IV ГОСТ 1497-84) діаметром 4 мм в інтервалі температур –196...+350 °С. Стандартизовані випробування із визначення механічних властивостей в інтервалі температур 77...293 °К проводили на спеціалізованій установці «Ала-Тоо» і універсальній випробувальній машині Instron-1251, що були обладнані спеціальними крио- і термокамерами для створення та підтримки відповідних температур випробування. Схему вирізки зразків та їх основні розміри наведено на рис. 3. Ударна в'язкість визначалася за результатами випробувань зразків Шарпі з V-подібним надрізом на сертифікованому маятниковому копрі МК-30А згідно з ГОСТ 9454-78. Крім ударних випробувань зразків Шарпі, критичну температуру крихкості (КТК) визначали за температурною залежністю відносного звуження і за методом рентгенографічного аналізу.

Деякі результати випробувань трубчастих зразків із сталі 08X18H10T наведено в табл. 5.

*Металографічні дослідження.* На площинках різі (див. рис. 2) були виготовлені макрошліфи з наступним травленням у реактиві 1 ч. HNO<sub>3</sub> + 2 ч. HCL, що дозволило виявити контури та структуру зварного шва (рис. 4), а також тріщини, якщо вони були присутні (рис. 5).

Необхідно зазначити, що схильність сталей до міжкристалітної корозії, яка визначалася за стандартною методикою [8], не була виявлена навіть у дефектних зварних з'єднаннях. Однак проведені ретельні металографічні дослідження на темплетях, вирізаних з котушок опускних, напірних та трубопроводів системи аварійного охолодження реактору виявили вузьку (до 1 мм) зону сенсibiliзації металу, яка розташовувалася вздовж лінії сплавлення (зона більшого зерна аустеніту). У цій зоні спостерігалася утворення сітки карбідів Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> вздовж границь аустенітних зерен. У підтвердження цьому мікрорентгеноспектральним аналізом виявлений підвищений (до 38 %) вміст хрому у вузькій зоні на границях аустенітних зе-

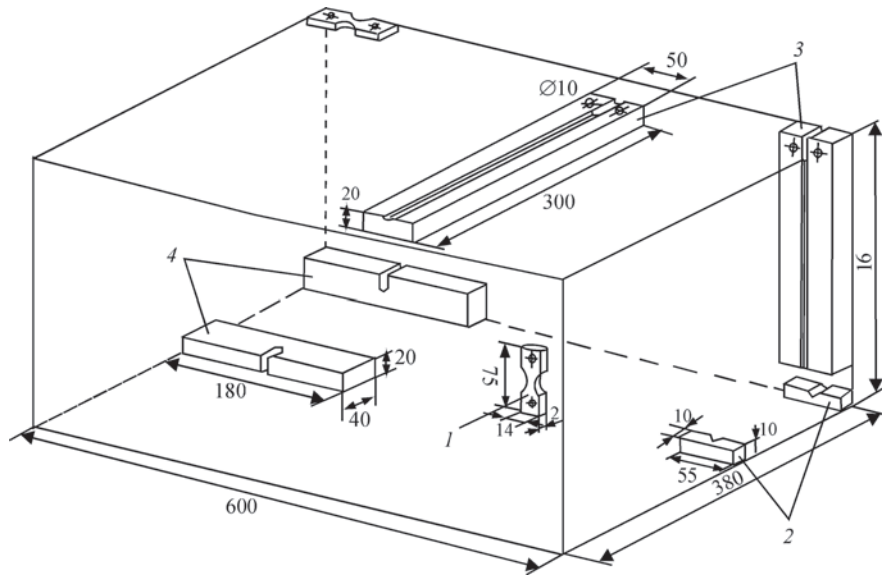


Рис. 3. Схема вирізки зразків та їх основні розміри

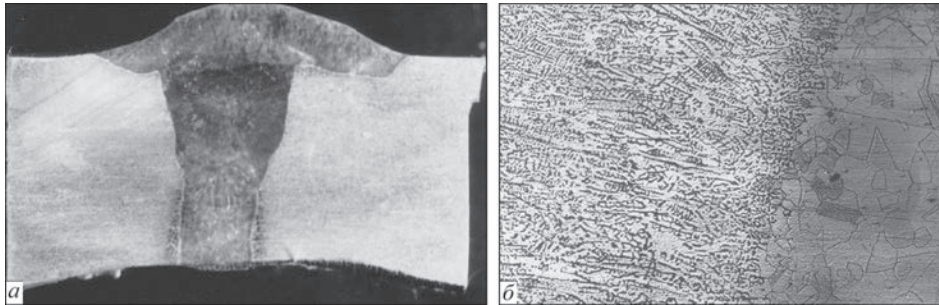


Рис. 4. Структура матеріалу трубопроводу (325×16, сталь 08X18H10T) у блоку №3 ЧАЕС після 100 тис. год. експлуатації: *a* – макроструктура, ×3; *б* – мікроструктура, ×100

рен, у той час як у тілі зерна вміст хрому становив 11...13 %.

Металографічні дослідження дозволили виявити на внутрішній поверхні труби (як у зварному шві, так і в пришовній зоні) тріщини окружної орієнтації. Тріщини, що спостерігаються в пришовній, зоні мали вигляд тріщин з розгалуженнями (рис. 5).

Тріщини, що розгалужуються, як правило, розповсюджувались вглиб основного металу труби міжзеренно, по вузькій зоні вздовж лінії сплавлення зерен аустеніту, що зросли в ході проведення зварювання.

Зародження тріщин на внутрішній поверхні труби носило багатозародковий характер, а розвиток магістральних окружних тріщин відбувався шляхом злиття різнорівневих зародкових тріщин. Спостерігалися випадки розташування тріщин як з однієї, так і з обох сторін зварного шва.

Фрактографічні дослідження проводили на растровому електронному мікроскопі Camscan. Ці дослідження підтвердили міжзеренний (при зростанні тріщини в зоні термічного впливу) і внутрішньозеренний (при зростанні тріщини по металу шва) характер поширення тріщини з численними слідами корозійного впливу на зернограничні фасетки (рис. 6). На поверхні руйнування спостері-

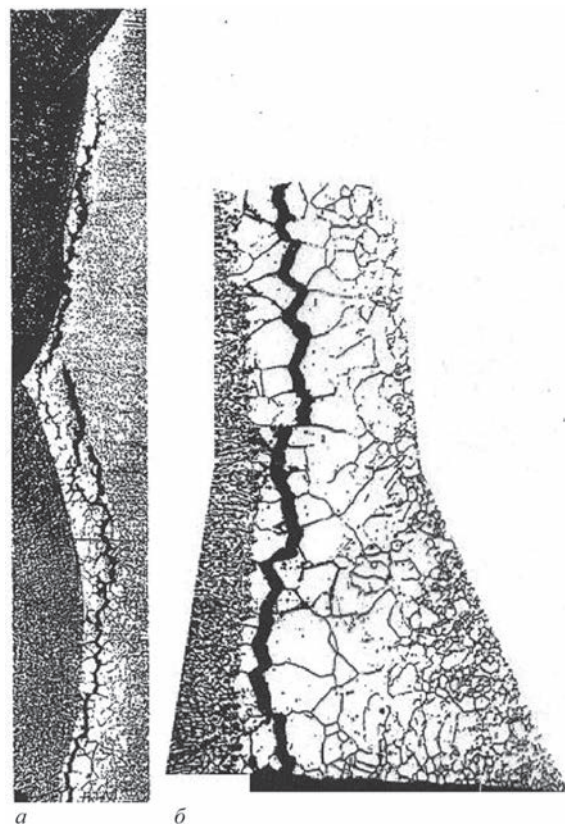


Рис. 5. Вигляд тріщини в пришовній зоні зварного з'єднання: *a* – ×30; *б* – ×80

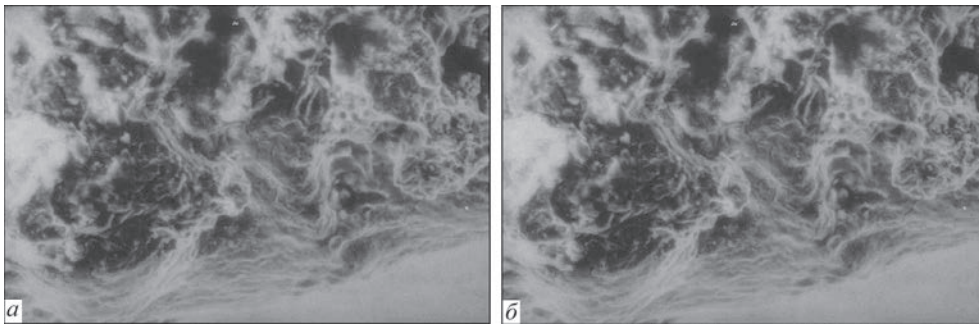


Рис. 6. Мікрофрактограми поверхні корозійної тріщини: *a* – до очищення; *б* – після очищення (середній крок борозенки втоми  $\Delta \approx 1,0$  мкм)

гаються вторинні тріщини, що йдуть углиб металу. Аналіз продуктів корозії на поверхні зламу показав наявність хлору в кількості 0,15 % ваги.

Фрактографічні та металографічні дослідження поверхні тріщини, очищеної від корозійного відкладення, показали, що основним механізмом є міжзеренне руйнування з характерним для корозії гілкуванням (розгалуженням) тріщини. На поверхні зламу, вільного від продуктів корозії, виявлено ознаки втомного руйнування у вигляді борозенок, які можна виявити навіть безпосередньо біля джерела зародження тріщини (рис. 6, *б*). Спостерігаються чіткі борозенки втоми, що є відбитком фронту тріщини на кожному циклі навантаження, причому їх крок становив 0,4 мкм. У міру просування тріщини крок борозенок збільшився до 1,0 мкм.

Фрактографічні дослідження поверхонь руйнування зразків, що циклічно навантажувалися, виявили борозенки втоми, які чітко спостерігалися з постійним кроком, відповідним кожному ступеню циклічного навантаження (рис. 7). Ця постійність кроку борозенок зумовлена умовами випробувань – постійністю амплітуди навантаження на кожному ступені навантаження. Вимірний при цьому крок борозенок відносився до середньої ділянки кінетичної діаграми втомного руйнування, причому у всьому діапазоні навантажень, де спостерігалися борозенки втоми, їх крок відповідав середній швидкості тріщини, вимірній безпосередньо на зразку в процесі експерименту.

Така відповідність між мікрошвидкістю тріщини, вимірної за кроком борозе-

нок, і макрошвидкістю тріщини спостерігалась при швидкостях тріщини, що перевищувала  $10^{-7}$  м/цикл, а вимірний крок борозенок був у межах 0,3...2,0 мкм. Це добре узгоджується з багатьма дослідженнями (наприклад [9]), де було показано, що крок борозенок добре корелює з макроскопічною швидкістю тріщини при її швидкостях, вищих за  $10^{-7}$  м/цикл.

Менш регулярні борозенки втоми, що спостерігалися на поверхні тріщин міжкристалічної корозії зварних швів труб, показали інтервал вимірних борозенок між 0,4 і 1,0 мкм (див. рис. 7, *б*), що попадає у вказаний вище інтервал кроку борозенок, виміряного на зразках. Цю відповідність можна розглядати як свідчення того, що циклічна складова напружень у трубі впливає на зростання корозійної тріщини, тобто накладення процесів корозійного розтріскування під напруженням і втомного зростання тріщини. Іншими словами, ми спостерігаємо розвиток тріщин за механізмом корозійної втоми.

**Особливості розвитку тріщин міжкристалічної корозії.** Як показали дослідження, що виконані на вирізаних із трубопроводів блоку № 3 пошкоджених кільцевих зварних швів (трубопроводи 1-го контуру із зовнішнім діаметром 325 мм і товщиною стінки 16 мм), тріщини міжкристалічної корозії зароджуються біля кореневого шва на внутрішній стінці труби та розвиваються, як правило, у зоні термічного впливу вздовж лінії сплавлення шва. Місцями зародження тріщини є локальні концентратори напружень, викликані або

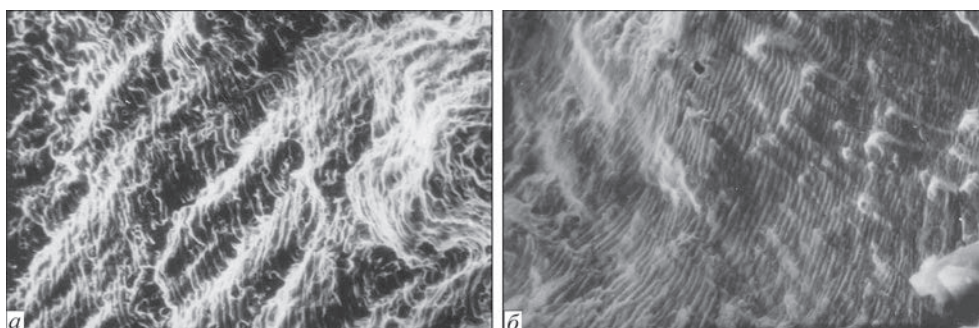


Рис. 7. Поверхня руйнування зразка зі сталі 08X18H10T, що випробовувався на циклічну тріщиностійкість: *a* – при 20 °С, середній крок борозенки втоми  $\Delta \approx 1,5$  мкм; *б* – при 50 °С, середній крок борозенки втоми  $\Delta \approx 2,0$  мкм

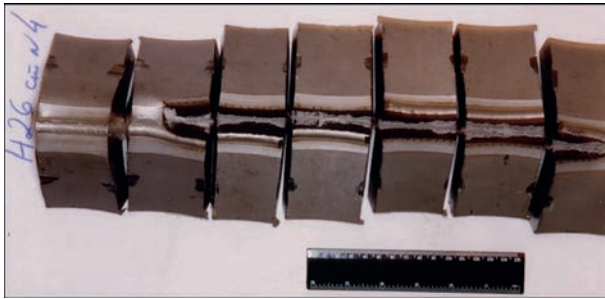


Рис. 8. Зовнішній вигляд поверхневої тріщини на зруйнованих темплетях

утяганням металу при охолодженні кореневого зварного шва, або грубими рисками механічного оброблення внутрішньої поверхні труби при зварюванні. Велика кількість таких концентраторів на внутрішній стороні шва та у пришовній зоні призводить до зародження декількох тріщин. Ці тріщини, що мають декілька зародків, які розташовані в різних паралельних перерізах труби, у процесі розвитку часто зливаються в одну тріщину. У зв'язку з тим, що моменти зародження цих тріщин не співпадають за часом, одні тріщини випереджають інші, що при злитті їх у загальну магистральну тріщину призводить до її звивистого фронту. Зовнішній вигляд поверхні однієї з таких тріщин показано на рис. 8, де представлені сім сусідніх зруйнованих темплетів, вирізаних з пошкодженого зварного шва.

Кожна протилежна половинка темплета містить поверхню у відповідь однієї й тієї ж корозійної тріщини (темного кольору, звернена назовні знімка) і поверхню тріщини долому (світла, що всередину), отриману в результаті механічного долому темплетів при їх згині.

Поверхні корозійної тріщини покриті товстим шаром корозійних відкладень, що мають темно-коричневе забарвлення та значну радіоактивність. При вивченні особливостей зростання корозійних тріщин було помічено, що вибір тріщиною траєкторії її зростання значною мірою визначається місцем її зародження, яке, у свою чергу, залежить від ефективності (тобто гостроти) місцевого концентратора напружень. Тому на вирізаних з труб пошкоджених зварних стіках спостерігалися як тріщини, що розповсюджуються по зоні термічного впливу поблизу лінії сплавлення, так і (рідше) тріщини, зростаючі по металу зварного шва. Щоби врахувати ці особливості, потрібно, по-перше, визначити міцність металу зварного шва, а по-друге, визначити граничне навантаження руйнування перерізу зварного шва, що залишився непошкодженим тріщиною.

## Висновки

1. Металографічні та фрактографічні дослідження зварних з'єднань трубопроводів енергоблоку № 3 Чорнобильської АЕС виявили міжзеренний (при зростанні тріщини у зоні термічного впливу) і внутрішньозеренний (при зростанні тріщини по металу шва) характер руйнування. Спостерігається суттєве корозійне ушкодження з характерним розгалуженням тріщини в обох випадках.

2. Додатковими фрактографічними дослідженнями поверхонь корозійного руйнування зварних швів підтверджено наявність ознак впливу циклічних навантажень (борозенок втоми) на значній площі зламу.

3. У результаті проведених комплексних металографічних, фрактографічних та мікрорентгеноспектральних досліджень розроблено комплекс заходів щодо вирішення проблеми корозійного розтріскування під напруженням аустенітних сталей.

4. У разі можливого розвитку МКК особливо значимим для надійної експлуатації силового устаткування стає контроль виникнення та розвитку тріщин. Особливо важливо вміти вимірювати геометричні характеристики тріщин, що суттєво розширює можливості тимчасових і короткострокових заходів підтримки експлуатаційної надійності. Тому розвиток та оптимізація неруйнівних методів контролю зварних з'єднань, схильних до МКК, є актуальним завданням.

## Список літератури

1. IAEA. Report of a regional workshop on environmentally assisted cracking of NPP austenitic piping. Slavytch, Ukraine, 22–26 June 1998. Introduction, p.p. 7–38.
2. Красовский А.Я., Маковецкая И.А., Тороп В.М., Чугунов В.А. (2000) Экспертиза причин коррозионного растрескивания под напряжением трубопроводов 1-го контура АЭС. В кн.: Труды конференции «Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций», Киев, 6–9 июня 2000 г., ИПП НАНУ, Т.1, сс. 27–34.
3. Lai, J.K., Shek, C.H., Lo, K.H. (2015) *Stainless steels: An introduction and their recent development*. Hong Kong, Bentham Books.
4. Lawrynowicz, Z. (2018) *Diagnostics of the effect of prior cold deformation and aging time on intergranular corrosion resistance in case of austenitic stainless steel: proceedings*. 17<sup>th</sup> International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. MATEC Web of Conferences 182, 2018. 01011.
5. (1975) *US NRC Pipe Crack Study Group. Investigation and Evaluation of Cracking in Austenitic Stainless Steel Piping of BWR Plants*. NUREG –75/061.
6. (1986) *Pressure Vessel and Piping Codes. Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping*. Trans. of ASME. *J. of Pressure Vessels Technology*, 3, 357.
7. (1988) *Инструкция по исследованию состояния металла трубопроводов АЭС с помощью вырезов после 100 тысяч часов эксплуатации (АИ-35-17-86)*. Москва, ВНИИ-АЭС. Введ. 30.04.88.
8. ГОСТ 6032-89 *Стали и сплавы коррозионностойкие*. М., Издательство стандартов, 1990.
9. (2002) *IAEA-EBP-IGSCC Mitigation of intergranular stress corrosion cracking in RBMK reactors. Final Report of the Programme's Steering Committee. IAEA-EBP-IGSCC. A publication of the extrabudgetary programme on mitigation of intergranular stress corrosion cracking in RBMK reactors*.

References

1. IAEA. Report of a regional workshop on environmentally assisted cracking of NPP austenitic piping. Slavutych, Ukraine, 22–26 June 1998. Introduction, p.p. 7–38.
2. Krasovsky, A.Ya., Makovetskaya, I.A., Torop, V.M., Chugunov, V.A. (2000) Examination of causes of stress corrosion cracking in 1<sup>st</sup> pipeline circuit of NPP. In: Book: Proc. of Conf. on Assessment and Substantiation of Extension of the Service Life of Structural Elements. Kyiv, 6-9 June, 2000, IPS, Vol. 1, 27–34 [in Russian].
3. Lai, J.K., Shek, C.H., Lo, K.H. (2015) Stainless steels: An introduction and their recent development. Hong Kong, Bentham Books.
4. Lawrynowicz, Z. (2018) Diagnostics of the effect of prior cold deformation and aging time on intergranular corrosion resistance in case of austenitic stainless steel. In: Proc. of 17<sup>th</sup> Inter. Conf. on Diagnostics of Machines and Vehicles. MATEC Web of Conferences 182, 2018. 01011.
5. (1975) US NRC Pipe Crack Study Group. Investigation and Evaluation of Cracking in Austenitic Stainless Steel Piping of BWR Plants. NUREG –75/061.
6. (1986) Pressure Vessel and Piping Codes. Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping. Trans. of ASME. J. of Pressure Vessels Technology, 3, 357.
7. (1988) Instruction on investigation of state of metal of NPP pipelines using cut-out samples after 100 thou h of operation (AI-35-17-86). Moscow, VNIIAES. Introd. 30.04.88 [in Russian].
8. GOST 6032-89: Corrosion-resistant steels and alloys. Moscow, Izd-vo Standartov, 1990 [in Russian].
9. (2002) IAEA-EBP-IGSCC Mitigation of intergranular stress corrosion cracking in RBMK reactors. Final Report of the Programme's Steering Committee. IAEA-EBP-IGSCC. A publication of the extrabudgetary programme on mitigation.

STUDY OF INTERCRYSTALLINE CORROSION CRACKING IN WELDED JOINTS OF CHORNOBYL NPP PIPELINES. MATERIALS SCIENCE ASPECT

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

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

Stress corrosion cracking, similar to intergranular corrosion in austenitic steel welds, primarily affects grain boundaries in the heat-affected zone when exposed to a corrosive environment, leading to sensitization – a reduction in structural integrity, which causes cracking and grain loss. The object of research were samples cut out of «coils» of pipelines of the 3rd power unit of the Chernobyl NPP in the areas of damaged welded joints. Based on radiographic and ultrasonic inspection of pipeline welds, as well as determination in the examined samples of the content of alloying elements, mechanical properties, metallographic, fractographic and micro-X-ray spectral studies, including investigation of fracture surfaces of samples that were cyclically loaded, taking into account fatigue grooves, and with regard to solution of the problem of corrosion cracking of austenitic steels in boiling water reactors, a set of measures was developed: long-term measures – replacement of steels with others not prone to corrosion cracking; short-term measures – application of external weld coating, repair of defective areas, relieving residual stresses; temporary measures – justification of the admissibility of the defective weld for operation. 9 Ref., 5 Tabl., 8 Fig.

Keywords: radiographic and ultrasonic inspection of welded joints, intergranular corrosion, stress corrosion cracking, corrosion-resistant steel, pipelines, alloying elements, chromium carbides, fatigue grooves

Отримано 17.10.2024  
Отримано у переглянутому вигляді 27.11.2024  
Прийнято 20.12.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2025

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

\*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

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

Передплата на електронну версію журналів. Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf.

На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 pp.

Адреса видавництва

Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90  
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com

## ОСНОВНІ ПОХИБКИ БАЛІСТИЧНОГО ГРАВИМЕТРА

О.М. Безвесільна, Т.О. Толочко, Д.В. Трохимчук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: prilad168@gmail.com, asnk@kpi.ua

Встановлено, що на сьогоднішній день відсутня інформація про розрахунок та оцінку основних похибок балістичних лазерних гравіметрів та рекомендації по їх зменшенню. Тому метою даної роботи є розрахунок і проведення аналізу основних похибок балістичного лазерного гравіметра. Пробна маса у період вільного падіння знаходиться у взаємодії з усіма фізичними об'єктами всесвіту, які за допомогою гравітаційних та інших сил впливають на закон руху пробного тіла. Виключення впливу інерційних сил на результати вимірювання гравіметра є на даний момент часу одними з основних труднощів на шляху підвищення точності визначення прискорення сили тяжіння (ПСТ). Шлях, що пройшла пробна маса, вимірюється відносно інерційної системи координат, яка не є абсолютно інерційною. Тому кінематичні похибки можна розділити на дві групи: обумовлені впливом факторів, що діють на пробне тіло, та ті, що діють на інерційну систему відліку координат пробної маси. Сукупність показників вказаних похибок дозволяє визначити структуру показників точності балістичного гравіметра. Проблема відтворення одиниць довжини та часу в абсолютній гравіметрії зводиться переважно до підвищення точності та тривало-часової стабільності їх відтворення, оскільки саме похибки цих одиниць є основною перешкодою у підвищенні точності вимірювання ПСТ. Встановлено, що точність визначення ПСТ залежить від точності вимірювання наступних величин: шляху пробного тіла; ступеня фіксації інерційної системи, відносно якого вимірюються шляхи; часу; гравітаційних сил; інерційних сил. Визначено, що вимірювання прискорення сили тяжіння точніше ніж  $10^{-9}$  принципово неможливо внаслідок квантово-механічних обмежень, а також – флуктуацій мір довжини та часу. Бібліогр. 29, табл. 1, рис. 2.

*Ключові слова:* прискорення сили тяжіння, балістичний лазерний гравіметр, похибки, пробне тіло

**Вступ.** Вимірювання абсолютного значення прискорення сили тяжіння  $g$  з високою точністю необхідне для вирішення широкого спектру наукових задач: визначення форми Землі, побудови моделей руху глибинних мас, оцінки пружних деформацій поверхні планети, передбачення землетрусів, винаходження глибинних щільнісних неоднорідностей, пошуку покладів корисних копалин та ін. Для визначення  $g$  призначені гравіметри. Серед них найвідомішими для наземних вимірювань є балістичні лазерні гравіметри (БЛГ) [1–29]. Однак вони не автоматизовані, мають низьку точність і швидкодію, що є неприпустимим для сучасного використання. Тому дослідження можливості підвищення точності та швидкодії БЛГ шляхом застосування цифрового двовимірного відеозображення є актуальною задачею.

Теорія та практика абсолютної гравіметрії на базі балістичних методів (терміни «абсолютний» і «балістичний» є синонімами) вимірювання є надзвичайно перспективними. Балістичні методи вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ) для різних високоточних вимірювань можна вважати технічно забезпеченими, хоча ще мають місце розходження в результатах, одержаних різними приладами за однакових умов. Розповсюдження балістичних гравіметрів підтверджено великою кількістю приладів, що знаходяться в експлуатації, великим попитом на балістичні гравіметри серед практиків [6, 7]. На сьогоднішній день відсутня інформація про розрахунок та оцінку основних похибок БЛГ, рекомендації по їх зменшенню.

**Мета роботи** – розрахунок і проведення аналізу основних похибок балістичного лазерного гравіметра.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Проведені дослідження показали, що великий внесок у розвиток методів і засобів гравіметричних вимірювань внесли наукові школи, сформовані в Інституті геофізики під керівництвом академіка НАНУ В.І. Старостенка (м. Київ), в ННЦ «Інститут метрології» під керівництвом к.т.н. Г.С. Сидоренка і КПІ ім. Ігоря Сікорського на приладобудівному факультеті під керівництвом д.т.н., проф. О.М. Безвесільної.

Сучасні дослідження в області розробки гравіметричної апаратури зосереджені у двох основних напрямках: перший – підвищення точності вимірювань  $g$  балістичними гравіметрами шляхом усунення впливу сейсмічних коливань на процес вимірювання, другий – побудова ефективних автоматизованих систем процесу гравіметричних вимірювань.

Найвідомішими у галузі гравіметричних вимірювань є роботи Л. Ла-Коста, Д. Гаррисона, А. Графа, Ю. Престона-Томоди, М. Гальвані, Кука, Тейта, Фаллера та інших [4, 5, 8–13].

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Вільно падаюче тіло рухається у просторі під дією деякої рівнодіючої сили  $F$ , що дорівнює векторній сумі всіх сил, відомих у природі: гравітаційних, електромагнітних, аеродинамічних та ін. У цьому випадку:

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i. \quad (1)$$

Розкладемо множину сил  $F_i$  на дві підмножини: гравітаційні та інерційні сили, які, відповідно, позначимо:  $\sum_i \vec{F}_i^{(r)}$  та  $\sum_i \vec{F}_i^{(i)}$ .



Причому будь-яка гравітаційна сила може бути записана у вигляді:

$$\bar{F}_k^{(r)} = \gamma \cdot \left( \frac{m \cdot M_k}{R_k^3} \right) \cdot \bar{R}_k, \quad (2)$$

де  $\gamma$  – гравітаційна стала;  $m$  – маса пробного тіла;  $M_k$  – гравітаційна маса;  $R_k$  – відстань між центрами мас  $M_k$  і  $m$ .

Будь-яка інерційна сила записується наступним чином:

$$F_k^{(i)} = \bar{x}_n \cdot m, \quad (3)$$

де  $\bar{x}_n$  – парціальне прискорення пробного тіла.

З урахуванням рівнянь (1) і (2), суму рівнянь (3) можна записати у наступному вигляді:

$$\bar{F} = m \cdot \left[ \gamma \cdot \sum_i \frac{M_i}{R_i^3} \bar{R}_i + \sum_i \bar{x}_i \right], \quad (4)$$

де величина, що стоїть дужках, – прискорення, що включає ПСТ  $g$ .

Розв’язавши це рівняння відносно  $g$ , одержимо:

$$g_0 = 2 \cdot S \left[ t^2 - \left( \sum_i \bar{F}_k^{(r)} + \sum_i \bar{F}_i^{(i)} \right) \right] \cdot m, \quad (5)$$

звідки випливає, що точність визначення  $g_0$  залежить від точності вимірювання наступних величин:

- шляху  $S$  пробного тіла;
- ступеня фіксації інерційної системи, відносно якої вимірюють шлях  $S$  (тобто від точності  $S_0$  і  $V_0$ );
- часу  $t$ ;
- гравітаційних сил, що складають множину  $F_i^{(r)}$ ;
- інерційних сил, що складають множину  $F_i^{(i)}$ .

Фактори  $F$  під знаком суми рівняння (5) можна умовно розділити на локальні, регіональні та глобальні [14, 17–21]. До локальних відносяться градієнти гравітаційного поля та температури, електричні та магнітні поля у приміщенні, де відбувається робота. До регіональних – зміни гідрологічних умов і висоти місця спостережень, барометричні ефекти, сейсмічна та вулканічна активність у регіоні тощо. До глобальних факторів відносяться, в першу чергу, приливні зміни та, меншою мірою, такі явища, як рух полюсів Землі, нерівномірність обертання планети, астрофізичні явища тощо.

Аналіз рівняння (5) дозволяє побачити, що пробна маса в період вільного падіння знаходиться у взаємодії з усіма фізичними об’єктами всесвіту, які за допомогою гравітаційних та інших сил впливають на закон руху пробного тіла. Тому визначення всіх взаємодій є надзвичайно складною задачею.

У сучасній гравіметрії сумарна взаємодія гравітаційних перешкод, за винятком впливу Сонця та Місяця, вважається настільки малою порівняно з рівнодіючою інерційних сил, що ним можна знехтувати [21–23]. Саме виключення впливу інерційних сил на результати вимірювання гравіметра є на даний момент часу одними з основних труднощів на шляху підвищення точності визначення ПСТ.

Шлях, що пройшла пробна маса, вимірюється відносно інерційної системи координат, яка не є абсолютно інерційною. Тому кінематичні похибки можна розділити на дві групи:

- обумовлені впливом факторів, що діють на пробне тіло;
- обумовлені впливом факторів, що діють на інерційну систему відліку координат пробної маси.

Сукупність показників вказаних похибок дозволяє визначити структуру показників балістичного гравіметра (рис. 1).

Метрологічна задача при розробці, виготовленні та дослідженні гравіметрів зводиться до зменшення всіх складових похибки вимірювання. Так, похибки випадкового походження зменшують шляхом збільшення числа вимірювань  $N$  згідно з виразом  $\sigma / \sqrt{N}$ , якщо є підстава вважати, що  $g = \text{const}$ .

Проблема відтворення одиниць довжини та часу в абсолютній гравіметрії зводиться переважно до підвищення точності та тривало-часової стабільності їх відтворення, бо саме похибки цих одиниць [25–28] є основною перешкодою у підвищенні точності вимірювання ПСТ.

Відтворення одиниці довжини в сучасних балістичних гравіметрах високої точності здійснюються шляхом стабілізації частоти випромінювання робочого лазера по гетеродину, що має у своєму складі осередок резонансного поглинання на парах йоду. Така будова джерела випромінювання обумовлена високими вимогами до тривало-часової стабільності довжини хвилі  $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ . Задовольнити ці вимоги без йодових лазерів неможливо. У той же час, їх вихідна потужність недостатня для інтерферометра, що вимірює шлях, пройдений пробним тілом. Внаслідок цього виникає необхідність створення систем стабілізації з гетеродуванням. Проте, як показує досвід, для надійної роботи цих систем в умовах мікросейсмічності їх необхідно доповнювати пристроями періодичного підтвердження вірності вибору номера лінії поглинання.

Існують й інші схеми прив’язки робочого лазера до гетеродинного. Це – робота йодового лазера у режимі широко-полюсного сканування. Ширини

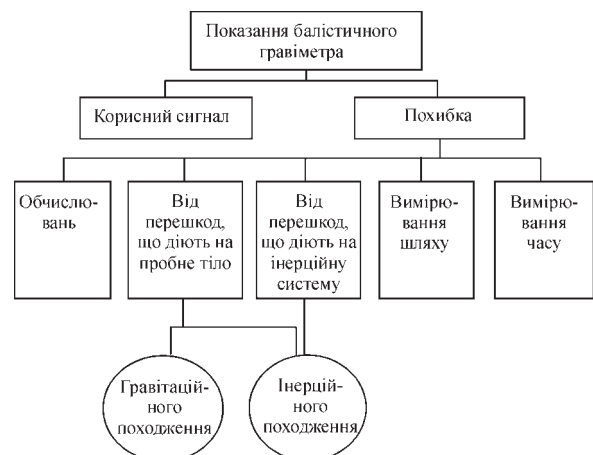


Рис. 1. Структура показників балістичного гравіметра

на смуги сканування вибирається так, щоб за один період частота генерації, як мінімум, хоча б один раз проходила через значення необхідної лінії спостереження. Робочий лазер вважається налагодженим, якщо сигнали нульових биттів, обох ОКГ (оптичних квантових генераторів) з'являються в момент проходження гетеродином лінії поглинання. У випадку запізнення або випередження сигналу биття виділяється сигнал помилки, що корегує частоту робочого лазера [29]. Така схема дає високу надійність відтворення довжини хвилі.

Значні помилки при вимірюванні ПСТ з'являються в тому випадку, якщо лазер генерує більше однієї моди, що спотворює характеристики стабілізуючого механізму. Цей ефект ліквідується шляхом регулювання струму розряду в трубці або за допомогою інших спеціальних заходів. Так, наприклад, застосовується стабілізація лазера за провалом Лемба, причому в даному випадку нестабільність довжини хвилі також залежить від системи автоналагодження. У [2, 3] пропонується метод відтворення одиниці довжини хвилі шляхом повільного сканування довжини резонатора лазера за синусоїдальним законом з амплітудою  $\pm 5$  мкм і частотою 0,01 Гц, що забезпечує усереднення мод за 100 с. Слід зазначити, що метод відтворення одиниці довжини за допомогою лазера є, на даний час, найкращим, але не єдиним. Так, за кордоном приділяють увагу вдосконаленню гравіметрів, в яких довжина задається за допомогою еталона Фабрі-Перро, а початок і кінець відліку часу здійснюється за моментами появи інтерференції пучків квазі-білого світла («ксенонова лампа») [2]. Проте довжину еталона Фабрі-Перро слід періодично контролювати за допомогою лазера, що стабілізований по йоду, а для збереження стабільності довжини еталона необхідно підтримувати температуру в термостаті з точністю до 0,01 К. Таким чином, досягнення тривало-часової стабільності одиниці довжини ( $10^{-9}$ ) є великою проблемою, хоча саме за допомогою гравіметра з еталонем Фабрі-Перро та джерелом білого світла отримано найвищу точність вимірювання ПСТ, що складає  $10^{-9}$ .

**Явища, що викликають систематичні похибки**

Фактори впливу	Фізичні явища	Оцінка кількісного впливу, мкГал	Невиключений залишок, мкГал	Висновки
Гравітаційні	Притягання Сонця та Місяця	$10^{-1}$	$10^{-2}$	Не впливає
	Притягання апаратури	–	$5 \cdot 10^{-4}$	Не впливає
	Гравітаційний градієнт	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	Не впливає
	Вплив локальних змін мас атмосфери	$\pm 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	Не впливає
	Вплив мас ґрунтових вод	$\pm 2 \cdot 10^{-2}$	$10^{-2}$	Не впливає
Інерційні	Електростатичні та магнітні сили	–	$8 \cdot 10^{-3}$	Враховано
	Градієнт магнітного поля	–	$5 \cdot 10^{-4}$	Не впливає
	Опір залишкового газу	–	$7 \cdot 10^{-3}$	Враховано
	Вплив обертання Землі	–	$5 \cdot 10^{-4}$	Враховано
Інструментальні при визначенні шляху	Нестабільність довжини хвилі лазера	$\pm 3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	Враховано
	Нестабільність температури	–	$10^{-3}$	Враховано
	Обертання пробного тіла навколо горизонтальної осі	–	$4 \cdot 10^{-3}$	Враховано
	Нестабільність тиску	–	$10^{-3}$	Враховано
	Відхилення від вертикалі	–	$10^{-3}$	Враховано
Інструментальні при визначенні часу	Нестабільність генератора	–	$5 \cdot 10^{-4}$	Враховано
	Неточність вимірювання інтервалів часу	$\pm 5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	Враховано
	Кінцева швидкість світла	25	–	Враховано

Інтервали часу руху пробного тіла вимірюються шляхом підрахунків імпульсів відомої частоти, що проходять через селектор, з пліним інтервалу часу  $T_n$ . Проте саме таким вимірюванням притаманні похибки, що обумовлені неідентичністю затримок відкриття та закриття селектора, кінцевою дією імпульсів, небездоганністю їх фронтів тощо. Кількісний сумарний вплив вказаних факторів зручно представити деяким еквівалентним розширенням інтервалу часу  $T_n$ . Похибку вимірювання прискорення, що викликана помилками вимірювання двох інтервалів часу  $T$  і  $T_n$ , представлено у вигляді:

$$\Delta g \approx 10^{-9} \cdot g \cdot \sqrt{(\alpha_1^2 \cdot \Delta T^2 + \alpha_2 \cdot \Delta T_n^2)}, \quad (6)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – відомі та сталі коефіцієнти;  $\Delta T$  і  $\Delta T_n$  – похибки вимірювання інтервалів часу  $T$  і  $T_n$ .

Якщо, наприклад,  $\Delta T = 5$  нс, а  $\Delta T_n = 10$  нс, то  $\Delta g = 0,25$  мГал. Згідно з іншими джерелами, не виключена частина систематичної похибки гравіметра, обумовлена його чутливістю до розширень інтервалу часу  $T_n$ , що складає 0,6...1 мкГал. Деякі фізичні явища, що викликають систематичні похибки, наведені в таблиці.

**Основні обмеження точності балістичних методів визначення ПСТ.** Подальшому росту точності перешкоджає цілий ряд обставин як принципового (фізичного), так і технологічного (економічного) характеру. Тому виникає питання про оптимальну точність, яка залежить від багатьох факторів і визначається обмеженнями. Ці обмеження необхідно знати, щоб, з однієї сторони, використовувати усі точні можливості, що надає теорія, а з іншої – не вдаватися до марних спроб підвищити точність за межі можливого.

Проаналізуємо, яким чином практичні міркування формують умови необхідної точності вимірювань у гравіметрії. Нехай маємо повільний (квазістатичний) процес, що протікає. Необхідно із заданою надійністю  $\beta$  отримати величину  $\Delta S(t)$  (рис. 2) вимірювання процесу  $S(t)$  за час  $t$ .

Як відомо, величина, що вимірюється, та похибка  $\delta(t)$  БЛГ повинні бути пов'язані співвідношенням:

$$\Delta S(t) \geq \beta \cdot \delta(t), \quad (7)$$

де  $\beta \geq 1$  – число, що характеризує надійність вимірювання.

Тоді теорему Лагранжа про середнє значення на інтервалі, що розглядається, можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{S(t_2) - S(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta S(t)}{\tau} = \frac{dS}{dt} = V(t),$$

звідки з урахуванням рівняння (7) одержимо:

$$\delta(t) \leq \tau \cdot \frac{V(t)}{\beta}. \quad (8)$$

Із рівняння (8) випливає, що у випадку вимірювань процесів, що повільно змінюються, крім тривіального до точності засобу вимірювання приєднуються також і не зовсім очевидні вимоги (тривіальність вимірювання – у тому, що похибка приладу  $\delta(t)$  повинна бути тим менша, чим з більшою надійністю потрібно отримати результат):

- значення похибки приладу повинно змінюватися з часом, якщо швидкість процесу  $V(t)$  змінна;
- значення похибки приладу повинно бути тим менше, чим менший проміжок часу  $\tau$ , що витрачається на вияв змін  $\Delta S$ .

На основі рівняння (8) визначимо максимальне допустиме значення  $\delta(t)$ . Якщо  $\tau = 0,1$ ;  $\beta = 1$ ;  $V = 1$  мкГал, то:

$$\delta = \frac{0,1 \cdot 1}{1} = 0,1 \text{ мкГал або у відносному виразі } \delta/g_0 = 0,1 \cdot 10^{-10}.$$

Така похибка вимірювання ПСТ потрібна на даний час для вирішення деяких геологічних задач. Приблизно той же порядок точності необхідний зразковим гравіметрам для перевірки робочих засобів вимірювання прискорення. Але ця точність на даний момент часу знаходиться поблизу тих меж, які визнаються деякими інструментальними та принциповими обмеженнями.

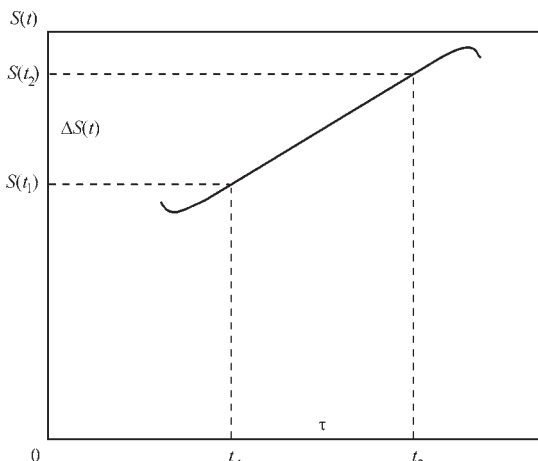


Рис. 2. Залежність допустимої похибки від швидкості дрейфу процесу вимірювання:  $S(t)$  – зміна параметра процесу, що вивчається, за час спостереження  $\tau$

Як вже зазначалось раніше, похибка лазерного інтерферометра, що є пристроєм для відтворення одиниці довжини, чинить суттєвий вплив на похибку гравіметра. Визначимо одну із похибок інтерферометра – дифракційну похибку, що обумовлена обмеженою апертурою світлового пучка:

$$\Delta g/g \gg 0,1 (\lambda/d)^2.$$

При довжині хвилі (так як і в нашому випадку)  $\lambda = 0,633$  мкм; діаметрі пучка  $d \approx 2$  мм:  $\Delta g/g = 0,1 \cdot (0,633 \cdot 10^{-6}/2 \cdot 10^{-3})^2 \approx 1,0017225 \cdot 10^{-8}$ .

При проведенні гравіметричних вимірювань вищої точності враховується цілий ряд систематичних похибок шляхом внесення відповідних поправок, таких як поправки за тиском світла, вертикальні та горизонтальні градієнти першого та другого порядку, опір вакууму та інші. Хоча в даний час точне врахування цих похибок та внесення поправок є справою складнішою, ніж саме вимірювання прискорення, проте воно принципово здійснено. Але все ж таки є обмеження фундаментального характеру, які неможливо усунути ніякими інструментальними та технологічними засобами. До них відносяться наближеність встановленої величини швидкості світла, квантово-механічні обмеження, межі точності визначення градієнтів прискорення, флуктуації тощо.

Розглянемо обмеження, що накладають квантово-механічні закони, використовуючи відношення невизначеностей:

$$(\Delta E)^2 \cdot (\Delta \bar{t})^2 \geq h^2. \quad (9)$$

Ця нерівність накладає обмеження на вимірювання енергії (швидкості) тіла, якщо її необхідно виміряти в точно заданий момент часу. Як вже зазначалось вище, прискорення  $g$  можна визначити з відношення:

$$g = \frac{V - V_0}{t - t_0}.$$

Знайдемо дисперсію ПСТ:

$$D = M_2 \{g\} = \frac{g^2}{(t - t_0)^2} \cdot [(\Delta \bar{t})^2 + (\Delta \bar{t}_0)^2] + \frac{1}{(t - t_0)^2} \cdot [(\Delta \bar{V})^2 + (\Delta \bar{V}_0)^2], \quad (10)$$

де  $(\Delta \bar{t})^2$  і  $(\Delta \bar{t}_0)^2$  – дисперсії (невизначеності) кінцевого та початкового моментів часу;  $(\Delta \bar{V})^2$  і  $(\Delta \bar{V}_0)^2$  – дисперсії кінцевої та початкової швидкостей вільно падаючого тіла.

Тоді рівняння (10), використовуючи рівняння (9), має вигляд:

$$D = \frac{g^2}{(t - t_0)^2} \cdot [(\Delta \bar{t})^2 + (\Delta \bar{t}_0)^2] + \frac{h^2}{m^2 \cdot (t - t_0)^2} \times \left[ \frac{1}{V^2 \cdot (\Delta \bar{t})^2} + \frac{1}{V_0^2 \cdot (\Delta \bar{t}_0)^2} \right]. \quad (11)$$

Досліджуючи рівняння (11) на екстремум, визначимо  $(\Delta \bar{t})^2$  і  $(\Delta \bar{t}_0)^2$ , які відповідають мінімуму  $D$ . Опускаючи проміжні викладки, маємо:

$$(\Delta \bar{t})^2 = h / (m \cdot V \cdot g) \text{ та } (\Delta \bar{t}_0)^2 = h / (m \cdot V_0 \cdot g).$$

Визначено, що вимірювання ПСТ точніше ніж  $10^{-9}$  принципово неможливо внаслідок квантово-механічних обмежень, а також – флуктуацій мір довжини та часу.

### Висновки

Проведено розрахунок та аналіз основних похибок балістичного лазерного гравіметра. Встановлено, що точність визначення ПСТ залежить від точності вимірювання наступних величин: шляху  $S$  пробного тіла; ступеня фіксації інерційної системи, відносно якої вимірюють шлях  $S$  (тобто від точності  $S_0$  і  $V_0$ ); часу  $t$ ; гравітаційних сил, що складають множину  $F_i^{(r)}$ ; інерційних сил, що складають множину  $F_i^{(i)}$ .

Визначено, що вимірювання ПСТ точніше ніж  $10^{-9}$  принципово неможливо внаслідок квантово-механічних обмежень, а також – флуктуацій мір довжини та часу.

### Список літератури

1. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О., Остапчук А.А. (2010) *Балістичний гравіметр*. Патент України на винахід 98058, МПК G 01 V 7/00, №и 2010 16009 від 31.12.2010. Бюл. № 7.
2. Безвесільна О.М., Остапчук А.А., Ткаченко С.С. (2010) *Гравіметри та їх виставка*. Монографія. Житомир, ЖДТУ.
3. Безвесільна О.М., Остапчук А.А., Тимчик Г.С. (2014) *Автоматичний лазерний балістичний гравіметр*. Житомир, ЖДТУ.
4. Безвесільна О.М., Тимчик Г.С. (2018) *Наукові дослідження у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій*. Підручник з грифом ЖДТУ. Київ, Науково-видавниче об'єднання «Пріоритети».
5. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О., Тимчик Г.С. (2011) *Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин*. Житомир, ЖДТУ.
6. Bezvesilna, O.M., Tolochko, T.O., Hrynevych, M.S. (2013) *Aviation gravimetric system with two-channel transformer gravimeter «Erbe der europäischen Wissenschaft/Heritage of European science 2023»*, series of monographs «European Science», Karlsruhe, Germany.
7. Bezvesilnaya, E.N., Kyrychuk, Y.N., Hrynevych, M.S., Tolochko, T.A. (2023) Simulation of the influence of parameters of disturbing vibration accelerations on the operation of a new two-channel transformer gravimeter. *Bulletin of the karaganda university Physics, series Web of Science*, 112(4), 23–35. DOI: <https://doi.org/10.31489/2023ph4/23-37>
8. Ткачук А.Г., Безвесільна О.М., Добржанський О.О. та ін. (2022) Налаштування польотного контролера та системи стабілізації безпілотного літального апарата із системою моніторингу наявності пожеж та витоків теплової енергії на борту. *Державний університет «Житомирська політехніка», Технічна інженерія*, 2(90), 59–69. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-59-69](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-59-69)
9. Болюх В.Ф., Данько В.Г. (2006) *Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії*. Харків, НТУ «ХПІ».
10. Болюх В.Ф., Коритченко К.В. (2009) Основні напрямки розвитку електромеханічних імпульсних прискорювачів. *Електротехніка і електромеханіка*, 4, 7–13.
11. McNab, I.R. (2003) Launch to space with an electromagnetic railgun. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(1), 295–304. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2002.805923>
12. Yamori, A., Ono, Y., Kubo, H. (2001) Development of an induction type railgun. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(1), 470–472. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.911879>

13. Balikci, A., Zabar, Z., Birenbaum, L. (2005) Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(1), 171–175. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.839283>
14. Болюх В.Ф., Щукин И.С. (2010) Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа. *Електротехніка і електромеханіка*, 5, 5–11.
15. Болюх В.Ф., Рассоха М.А. (2010) Влияние наружного электромагнитного экрана на эффективность ударного электромеханического преобразователя дисковой конфигурации. *Електротехніка*, 10, 31–38.
16. Світлов С.М. (2000) *Методи аналізу та зменшення динамічних похибок балістичних гравіметрів*. Автореферат дис. канд. тех. наук 05.11.15. Харків, Харк. держ. НДІ метрології.
17. Болюх В.Ф., Вінніченко О.І. (2019) *Балістичний гравіметр для симетричного та несиметричного способів вимірювань прискорення вільного падіння*. Пат. на винахід 118620 Україна, МПК G01V 7/14 (2006.01). № а 2017 06239; заяв. 19.06.2017; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.
18. (2003) *Метрологія та вимірювальна техніка*. Підручник. Поліщук Е.С. (ред.). Львів, Бескид Біт.
19. Занимонський Є.М. (2008) *Відтворення тривалості хвилі лазера у транспортальному балістичному гравіметрі*. У: Тези доповідей «І ВІТК. Харків, Метрологія в гравіметрії», сс. 69–71.
20. Болюх В.Ф., Вінніченко О.І., Омельченко А.В., Неєжмаков П.І. (2021) *Балістичний гравіметр для симетричного способу вимірювання прискорення вільного падіння з індукційно-динамічною катапультною, що має багатоімпульсне збудження*. Патент на винахід UA №124795 C2 від 18.11.2021, заявл. 09.04.2020, опубл. 18.11.2021.
21. Jiang, Z., Francis, O., Vitushkin, L. et al. (2011) Final report on the seventh international comparison of absolute gravimeters (ICAG 2005). *Metrologia*, 48, 246–260. DOI: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/5/003>
22. Болюх В.Ф., Вінніченко О.І. (2011) Удосконалення кінематичної схеми балістичного гравіметра за рахунок лінійного електромеханічного перетворювача. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2/7(50), 9–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2011.1817>
23. Кухарчук В.В., Володарський С.Т., Кучерук В.Ю., Грабко В.В. (2012) *Основи метрології та електричних вимірювань*. Підручник. Вінниця, ВНТУ.
24. Самотокін Б.Б. (2001) *Лекції з теорії автоматичного керування*. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Житомир, ЖІТІ.
25. Сидоренко Г.С., Мірошніченко О.М., Омельченко А.В. та ін. (2009) *Цифровий гравіметр для абсолютних вимірів прискорення сили ваги*. Пат. 80060 С2 Україна, МПК (2009) G01V 7/00, № 80060, заяв. 08.10.07, опубл. 10.09.09, Бюл. № 17.2009 р.
26. Сидоренко Г.С., Мірошніченко О.М., Омельченко А.В., Заяц І.М. (2009) *Гравігеодезичний спосіб атестації гравіметричних пунктів та пристрій для його здійснення*. Пат. 88061 С2 Україна, МПК (2009) G01V 7/00, № 88061, заяв. 08.10.07, опубл. 10.09.09, Бюл. № 17.2009 р.
27. Короткий Ю.О., Дашків В.М. (2010) *Пробне тіло для абсолютного балістичного гравіметра*. Пат. 92651 С2 Україна, МПК (2009) G01V 7/00, № 92651, заяв. 09.02.09, опубл. 25.11.10, Бюл. № 22.2010 р.
28. Ткаченко С.С., Киричук Ю.В., Остапчук А.А., Подчашинський Ю.О. (2010) Гравіметрична система з високоточним виставленням осі чутливості гравіметра. Пат. 90627 С2 Україна, МПК (2009) G01V 7/00, № 90627, заявл. 21.04.09, опубл. 11.05.10, Бюл. № 9.2010 р.
29. Подчашинський Ю.А., Ткаченко С.С., Остапчук А.А. та ін. (2010) Спосіб виставлення осей чутливості акселерометрів. Пат. 91315 С2 Україна, МПК (2009) G01B 11/26, G01P 21/00, № 91315, заяв. 06.11.09, опубл. 12.07.10, Бюл. № 13.2010 р.

### References

1. Bezvesilna, O.M., Podchashynskiy, Yu.O., Ostapchuk, A.A. (2010) *Ballistic gravimeter*. Patent UA, 98058 Int. Cl. IPC G 01 V7/00 u 2010 16009, 31.12.2010 [in Ukrainian].
2. Bezvesilna, O.M., Ostapchuk, A.A., Tkachenko, S.S. (2010) *Gravimeters and their exhibition*: Monography. Zhytomyr, ZSTU [in Ukrainian].
3. Bezvesilna, O.M., Ostapchuk, A.A., Tymchuk, G.S. (2014) *Automated laser ballistic gravimeter*. Zhytomyr, ZSTU [in Ukrainian].

4. Bezvesilna, O.M., Tymchuk, H.S. (2018) *Scientific research in the field of automation and computer-integrated technologies. Information and computerized systems in the AUPP*: Textbook, ZSTU. NGO Priorities, Kyiv [in Ukrainian].
5. Bezvesilna, O.M., Podchashynskiy, Yu.O., Tymchuk, G.S. (2011) *Scientific research in the field of measurement of mechanical quantities*. Zhytomyr, ZSTU [in Ukrainian].
6. Bezvesilna, O.M., Tolochko, T.O., Hrynevych, M.S. (2013) *Aviation gravimetric system with two-channel transformer gravimeter «Erbe der europäischen Wissenschaft / Heritage of European science 2023»*, Series of Monographs European Sci., Karlsruhe, Germany.
7. Bezvesilnaya, E.N., Kyrychuk, Y.N., Hrynevych, M.S., Tolochko, T.A. (2023) Simulation of the influence of parameters of disturbing vibration accelerations on the operation of a new two-channel transformer gravimeter. *Bulletin of the Karaganda* 35. DOI: <https://doi.org/10.31489/2023ph4/23-37>
8. Tkachuk, A.G., Bezvesilna, E.N., Dobrzhanskyi, O.O. et al. (2022) Setting up a flight controller and stabilization system for an unmanned aerial vehicle with a system for monitoring the presence of fires and thermal energy leaks on board. *ZSTU, Tekhnichna Inzheneriya*, 2(90), 59–69 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-59-69](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-59-69)
9. Bolyukh, V.F., Danko, V.G. (2006) *Linear electromechanical converters of pulse action*. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].
10. Bolyukh, V.F., Korytchenko, K.V. (2009) Main directions of development of electromechanical pulse accelerators. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 4, 7–13 [in Ukrainian].
11. McNab, I.R. (2003) Launch to space with an electromagnetic railgun. *IEEE Transact. on Magnetics*, 39(1), 295–304. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2002.805923>
12. Yamori, A., Ono, Y., Kubo, H. (2001) Development of an induction type railgun. *IEEE Transact. on Magnetics*, 37(1), 470–472. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.911879>
13. Balicki, A., Zabar, Z., Birenbaum, L. (2005) Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transact. on Magnetics*, 41(1), 171–175. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.839283>
14. Bolyukh, V.F., Shchukin, I.S. (2010) Schematic and constructive improvements of shock electromechanical transformers of the induction type. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 5, 5–11 [in Russian].
15. Bolyukh, V.F., Rassokha, M.A. (2010) The influence of the external electromagnetic shield on the effectiveness of the shock electromechanical converter disk configuration. *Elektrotehnika*, 10, 31–38 [in Russian].
16. Svitlov, S.M. (2000) *Methods of analysis and reduction of dynamic errors of ballistic gravimeters*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kharkiv, State Research Institute of Metrology, Kharkiv [in Ukrainian].
17. Bolyukh, V.F., Vinnichenko, O.I. (2019) *Ballistic gravimeter for symmetric and asymmetric methods of measuring the acceleration of free fall*. Patent 118620 UA, Int. Cl. G01V 7/14, fill. 19.06.2017; publ. 11.02.2019 [in Ukrainian].
18. (2003) *Metrology and measuring technology: Textbook*. Ed. by E.S. Polishchuk. Lviv, Beskyd Bit. [in Ukrainian].
19. Zanimonskyi, E.M. (2008) *Long-wave laser reproduction in a transportable ballistic gravimeter*. In: Abstr. of Papers. Kharkiv, Metrology in gravimetry, 69–71 [in Ukrainian].
20. Bolyukh, V.F., Vinnichenko, O.I., Omelchenko, A.V., Neezhmakov, P.I. (2021) *Ballistic gravimeter for a symmetric method of measuring the acceleration of free fall with an induction-dynamic catapult having multipulse excitation*. Patent 124795 UA, fill. 04.09.2020, publ. 11.18.2021 [in Ukrainian].
21. Jiang, Z., Francis, O., Vitushkin, L. et al. (2011) Final report on the seventh international comparison of absolute gravimeters (ICAG 2005). *Metrologia*, 48, 246–260. DOI: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/5/003>
22. Bolyukh, V.F., Vinnichenko, O.I. (2011) Improvement of the ballistic gravimeter kinematic scheme at the expense of the linear electromechanical converter. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 2/7(50), 9–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2011.1817> [in Ukrainian].
23. Kukharchuk, V.V., Volodarsky, E.T., Kucheruk, V.Yu., Grabko, V.V. (2012) *Fundamentals of metrology and electrical measurements*. Vinnytsia, VNTU [in Ukrainian].
24. Samotokin, B.B. (2001) *Lectures on the theory of automatic control: Manual for students of higher educational institutions*. Zhytomyr, ZHYTI [in Ukrainian].
25. Sydorenko, G.S., Miroshnychenko, O.M., Omelchenko, A.V. et al. (2009) *Digital gravimeter for absolute measurements of the acceleration of gravity*. Pat. 80060 UA, Int. Cl. G01V 7/00, 80060, fill. 08.10.07, publ. 10.09.09 [in Ukrainian].
26. Sydorenko, G.S., Miroshnychenko, O.M., Omelchenko, A.V., Zayats, I.M. (2009) *Gravimetric method of certification of gravimetric points and device for its implementation*. Pat. 88061 UA, Int. Cl. G01V 7/00, 88061, fill. 08.10.07, publ. 10.09.09 [in Ukrainian].
27. Korotkyi, Yu.O., Dashkiv, V.M. (2010) *Test body for an absolute ballistic gravimeter*. Pat. 92651 UA, Int. Cl. G01V 7/00, 92651, fill. 09.02.09, publ. 25.11.10 [in Ukrainian].
28. Tkachenko, S.S., Kyrychuk, Yu.V., Ostapchuk, A.A., Podchashynskiy, Yu.O. (2010) *Gravimetric system with high-precision setting of the sensitivity axis of the gravimeter*. Pat. 90627 UA, Int. Cl. G01V 7/00, 90627, fill. 21.04.09, publ. 11.05.10 [in Ukrainian].
29. Podchashynskiy, Yu.A., Tkachenko, S.S., Ostapchuk, A.A., Kondratyuk, Zh.M., Kyrychuk, Yu.V. (2010) *The method of setting the sensitivity axes of accelerometers*. Pat. 91315 UA, Int. Cl. G01B 11/26, G01P 21/00, 91315, fill. 06.11.09, publ. 12.07.10 [in Ukrainian].

## MAIN ERRORS OF THE BALLISTIC GRAVIMETER

O.M. Bezvesilna, T.O. Tolochko, J.V. Trokhymchuk

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: prilad168t@gmail.com; asnk@kpi.ua

It was established that there is currently no information on the calculation and assessment of the main errors of ballistic laser gravimeters and recommendations for their reduction. Therefore, the purpose of this work is calculation and analysis of the main errors of the ballistic laser gravimeter. The test mass during the period of free fall is in interaction with all physical objects of the universe, which with the help of gravitational and other forces affect the law of motion of the test body. Eliminating the influence of inertial forces on the results of the gravimeter measurement is currently one of the main difficulties in improving the accuracy of determining the acceleration of gravity (AG). The path traveled by the test mass is measured relative to the inertial coordinate system, which is not absolutely inertial. Therefore, kinematic errors can be divided into two groups: those due to the influence of factors acting on the test body, and those acting on the inertial reference system of the test mass coordinates. The totality of indices of the specified errors allows determination of the structure of the indices of the ballistic gravimeter accuracy. The problem of reproducing the units of length and time in absolute gravimetry is mainly reduced to increasing the accuracy and long-term stability of their reproduction, since it is the errors of these units that are the main obstacle to increased accuracy of AG measurements. It was established that the accuracy of AG determination depends on the accuracy of measurement of the following quantities: the path of the test body; the degree of fixation of the inertial system relative to which the path is measured; time; gravitational forces; and inertial forces. It was determined that measuring the acceleration of gravity more precisely than  $10^{-9}$  is fundamentally impossible due to quantum mechanical limitations, as well as fluctuations in length and time measures. 29 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

**Keywords:** acceleration of gravity, ballistic laser gravimeter, errors, test body

Отримано 11.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 23.11.202

Прийнято 20.12.2024

# ВИЯВЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ДЕФЕКТІВ НАДМАЛИХ РОЗМІРІВ В АЛЮМІНІЄВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ МЕТОДОМ ШИРОГРАФІЇ

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

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: viktor.savitsky@nas.gov.ua

У сучасній промисловості забезпечення якості зварних з'єднань, зокрема з алюмінієвих сплавів, є важливим завданням для підвищення надійності конструкцій. Особливу увагу приділяють виявленню внутрішніх дефектів, які можуть призвести до їх передчасного руйнування. Метою роботи є розробка та застосування методу ширографічного неруйнівного контролю у поєднанні з термічним навантаженням для виявлення дефектів надмалих розмірів у зварних з'єднаннях алюмінієвих сплавів. Навантаження забезпечувалось автоматизованою системою, яка дозволяла прогрівати поверхню досліджуваних зразків на 3...7 °С протягом 2...4 с. Дослідження показали, що вдосконалене ширографічне обладнання виявляє дефекти розмірами від 0,3 мм у діаметрі, завглибшки до 1,8 мм як у зоні зварного шва, так і в основному металі. Запропоновані параметри термічного навантаження та налаштування оптичної схеми інтерферометра дозволили досягти максимальної чутливості до надмалих дефектів. Метод цифрової ширографії з автоматизованим термічним навантаженням є ефективним для виявлення внутрішніх дефектів у зварних з'єднаннях алюмінієвих сплавів і може бути використаний для неруйнівного контролю у виробничих умовах. Бібліогр. 12, рис. 9.

*Ключові слова:* неруйнівний контроль якості, ширографія, алюмінієві сплави, дефекти надмалих розмірів

**Вступ.** Виробництво сучасних деталей і конструкцій високої якості та надійності пов'язано з використанням новітніх конструкційних матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями. Забезпечення високої якості створюваних конструкцій є однією з нагальних науково-технічних проблем. Тому важливо удосконалювати відомі та розробляти нові сучасні автоматизовані методи та засоби контролю якості механізмів і конструкцій. На сьогодні для виявлення дефектів у матеріалах і конструкціях використовують групу неруйнівних методів, таких як радіографічні, акустичні, люмінесцентні, метод вихрових струмів та ін. [1, 2]. Кожен з цих методів має свої недоліки та переваги, але жоден з них не є універсальним і не задовольняє всім вимогам, що висуваються до засобів і методів неруйнівного контролю. У провідних галузях сучасної промисловості, особливо в автомобіле- та суднобудуванні, енергетичному та авіаційно-космічному машинобудуванні при виготовленні тонколистових конструкцій широко використовуються нові конструкційні матеріали. Здебільшого вони працюють у складних механічних і температурних умовах. Тому навіть незначна концентрація напружень, що виникає через дефекти у зварних швах або елементах конструкцій, призводить до їх руйнування.

Однією з основних причин зниження якості конструкцій є приховані дефекти, тобто дефек-

ти, які не було виявлено під час діагностики на підприємстві. Значна частина відмов виробів на початковому етапі їх експлуатації пов'язана з проявом саме таких прихованих дефектів. У більшості випадків вони також є причиною руйнування вузлів та елементів конструкцій у подальшому процесі їх використання. Тому для підвищення якості та надійності вузлів і елементів конструкцій важливим є застосування сучасних методів неруйнівного контролю якості [3–6]. Групу вищезазначених методів контролю якості вдало доповнюють методи лазерної інтерферометрії, особливо спекл-інтерферометричні. Перспективним для інженерних застосувань є метод ширографії [7, 8]. Цей метод дає можливість безпосередньо отримати значення похідних від переміщень і є ефективним при аналізі деформацій. Метод ширографії нечутливий до переміщення об'єкта як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації, а, отже, не потребує особливого захисту від вібрацій.

Інтенсивний розвиток комп'ютерної і обчислювальної техніки дозволив суттєво удосконалити метод ширографії і розробити метод цифрової ширографії [9]. Важливою характерною особливістю даного методу є те, що він дає можливість спостерігати динамічну картину інтерференційних смуг на моніторі в режимі реального часу. Відносна простота цього методу дозволяє застосувати його для вирішення суттєво складніших задач,

Л.М. Лобанов – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, О.П. Шуткевич – <https://orcid.org/0000-0001-5758-2396>,  
І.В. Киянець – <https://orcid.org/0000-0002-2559-8200>, І.Л. Шкурат – <https://orcid.org/0009-0003-1888-4203>,  
К.В. Шиян – <https://orcid.org/0000-0001-9198-6554>, В.В. Савицький – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>  
© Л.М. Лобанов, О.П. Шуткевич, І.В. Киянець, І.Л. Шкурат, К.В. Шиян, В.В. Савицький, 2024

які пов'язані з аналізом деформацій і контролем якості конструкцій, у лабораторних і промислових умовах.

У [10, 11] наведено дослідження щодо виявлення дрібних дефектів у пластинчастих композитах за допомогою широкографії з термічним навантаженням, представлено як експериментальні, так і чисельні результати щодо виявлення невеликих дефектів. У цих статтях термомеханічна скінченно-елементна модель була створена в Abaqus, щоб оцінити різні схеми теплового навантаження для виявлення дефектів. Визначено раціональний вибір еталонної та сигнальної інтерферограм із послідовності нагріву/охолодження для надійного виявлення дефектів. Експериментальні та чисельні результати свідчать про те, що цей підхід дає можливість виявляти міліметрові та субміліметрові дефекти у пластинчастих композитах, армованих вуглецевим волокном.

У [12] пропонується метод фазової обробки в реальному часі з високочастотною синхронізацією цифрової камери, п'єзокерованого дзеркала та навантаження для покращення якості фазової картини та ефективності захисту від перешкод у процесі фазового зсуву. Метод застосовано до оптичних неруйнівних вимірювальних систем широкографії/ESPI для виявлення незначних дефектів розриву з мінімальним розміром 2 мм і оцінки міжфазної адгезійної міцності шарів зв'язування відповідно. На даний час цифрова широкографія інтенсивно розвивається і має такі переваги, як наочність, безконтактність, висока чутливість, можливість виконання досліджень об'єктів складної форми та значних розмірів у реальному масштабі часу.

**Метою** даної роботи є розробка технології для виявлення внутрішніх дефектів надмалих розмірів (діаметром менше 1 мм) в алюмінієвих зварних з'єднаннях із використанням методу цифрової широкографії у поєднанні з автоматизованим термічним навантаженням.

**Метод широкографії для неруйнівного контролю якості.** Для проведення експериментів з неруйнівного контролю якості застосовувалась широкографічна система, що базується на інтерферометрі Майкельсона і чутлива до деформацій, які ортогональні площині об'єкта (рис. 1). Проведення широкографічних експериментів здійснювалось за допомогою розроблених авторами програм, які містять додаткові опції для керування термічним навантаженням. Вони дозволяють встановлювати час запису початкового стану, вмикання та вимикання температурного навантаження, час запису навантаженого стану, а також час експортування

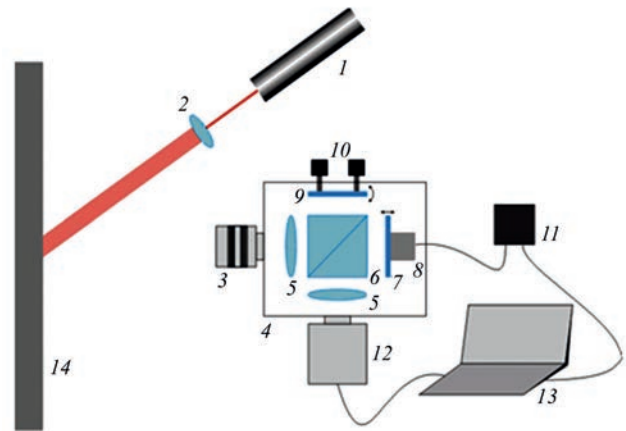


Рис. 1. Блок-схема широкографічної системи: 1 – джерело когерентного випромінювання; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – об'єктив; 4 – широкографічний інтерферометр, який містить лінзи 5, світлоподільний кубик 6, дзеркало 7, закріплене на п'єзоелементі 8, дзеркало 9, яке створює зсув зображення за допомогою гвинтів 10; 11 – контролер для керування п'єзоелементом 8; 12 – цифрова камера; 13 – ноутбук; 14 – досліджуваний об'єкт



Рис. 2. Зовнішній вигляд широкографічного інтерферометра із лазерними модулями та змінним об'єктивом

початкового та навантаженого станів до програми для опрацювання отриманих зображень.

**Неруйнівний контроль якості алюмінієвих зварних з'єднань методом широкографії.** Експерименти з неруйнівного контролю методом широкографії у поєднанні з термічним навантаженням були виконані на зварних зразках із алюмінієвого сплаву. Зразки мали плоску форму і були виготовлені шляхом зварювання тертям з перемішуванням. У процесі проведення експериментів зраз-

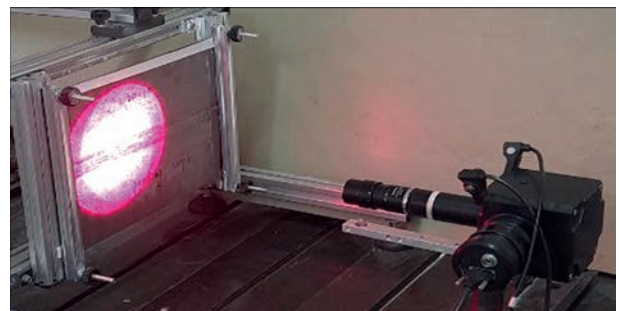


Рис. 3. Зовнішній вигляд широкографічного інтерферометра з 10-кратним оптичним збільшенням і тестового зразка, що закріплений у фіксуючу рамку

ки закріплювались у фіксуєуючу рамку, яка дозволяла прикладати термічне навантаження (рис. 3). При цьому навантаження проводилось в автоматичному режимі за допомогою створеного програмного забезпечення. Запис широграм здійснювався як на стадії нагріву, так і на стадії охолодження з 10-кратним оптичним збільшенням, яке досягалось за рахунок встановлення об'єктива з фокусною відстанню 75 мм і додаткового оптичного кільця. Широзсув обирався вздовж напрямку  $OX$  або  $OY$ , а його величина складала 10 мм.

У процесі контролю алюмінієвих зразків застосовували термічне навантаження гарячим повітрям за допомогою промислового фена. Температура нагріву повітря задавалася 500 °С, відстань від фена до поверхні зразка ~20 мм, нагрів тривав 2...3 с, зміна температури поверхні при цьому складала до 10 °С.

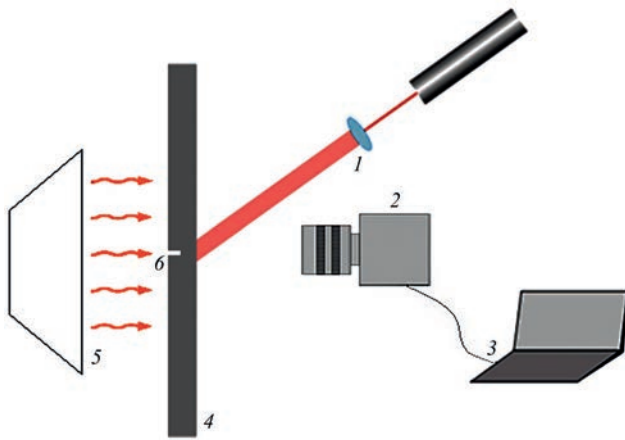


Рис. 4. Схема проведення експерименту: 1 – лазерне випромінювання; 2 – ширографічний інтерферометр; 3 – ноутбук; 4 – досліджуваний зразок; 5 – джерело нагріву; 6 – некрізний отвір

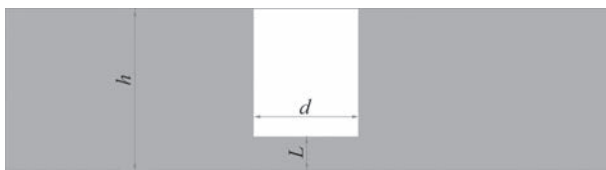


Рис. 5. Схема розташування дефекту в зварному зразку:  $h$  – товщина зразка,  $d$  – діаметр отвору,  $L$  – глибина залягання (товщина стінки, яка залишається після висвердлювання некрізного отвору діаметром  $d$ )

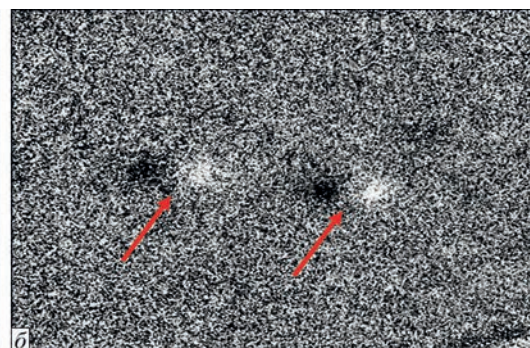


Рис. 8. Ширографічний контроль досліджуваної ділянки зварного шва алюмінієвого зразка: загальний вигляд ділянки з дефектами (а) і типова картина виявлених дефектів діаметром  $d = 0,3$  мм і завглибшки  $L = 0,35$  і  $0,85$  мм (б)

На рис. 5 представлено схему розташування дефекту в зварному зразку. На рис. 6 представлено параметри, які використовувались для проведення автоматичного термічного навантаження. На першому кроці (Step1) записується початковий стан об'єкта. На другому кроці (Step2) вмикається та на третьому (Step3) вимикається температурне навантаження. На четвертому кроці (Step4) записується спекл-картина деформованого стану об'єкта. На п'ятому кроці (Step5) початковий і кінцевий стани об'єкта експортуються в програму для опрацювання.

Для відпрацювання методики виявлення дефектів на основному металі зварного зразка завтовшки  $h = 2,5$  мм було висвердлено некрізні отвори діаметром  $d = 0,5...0,8$  мм і завглибшки

Program settings			
Step1	Record Initial	1000	ms
Step2	Start Loading 1	2000	ms
Step3	Stop Loading 1	4000	ms
Step4	Record Final	4500	ms
Step5	Export I1	5000	ms

Рис. 6. Параметри навантаження досліджуваного зразка у мілісекундах

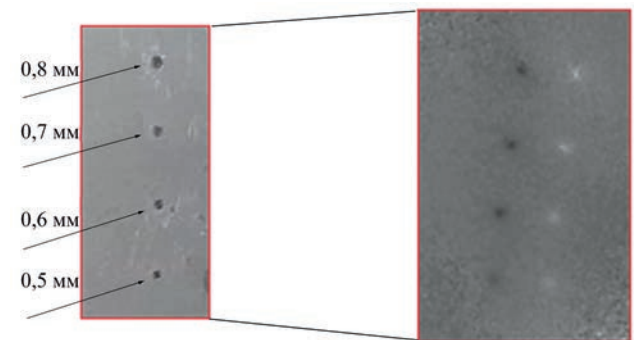


Рис. 7. Ширографічний контроль тестової ділянки алюмінієвого зразка: загальний вигляд ділянки (а) і типова картина виявлених дефектів діаметрами  $d = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$  мм (б)



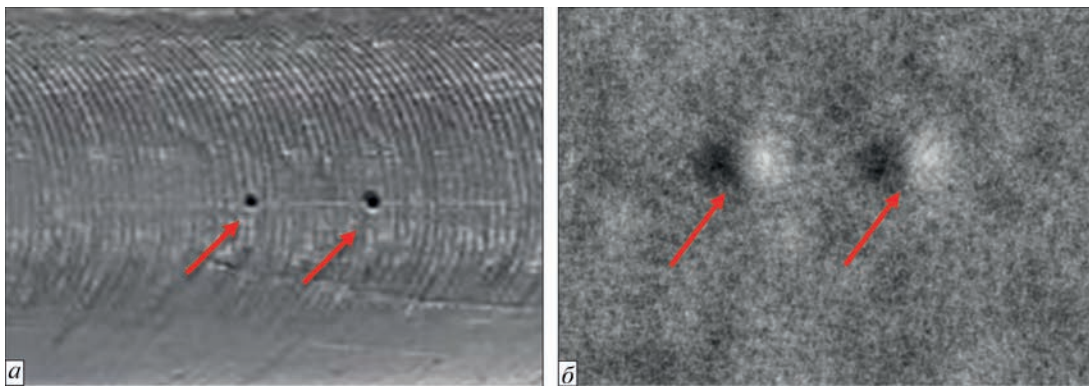


Рис. 9. Ширографічний контроль досліджуваної ділянки зварного шва алюмінієвого зразка: загальний вигляд ділянки з дефектом (а) і типова картина виявлених дефектів діаметром  $d = 0,3$  мм і завглибшки  $L = 1,8$  і  $1,5$  мм (б)

$L = 0,1$  мм (рис. 7, а). Результати, які показують наявність дефектів на досліджуваній ділянці, наведено на рис. 7, б. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектної зони. Оскільки широзсув значно більший за розмір створених некрізних отворів, то такі дефекти проявляються на фоні рівномірного деформування як дві окремі ділянки у напрямку та на відстані широзсуву (темна та світла).

Після відпрацювання методики ширографічного контролю на тестових отворах проводився контроль дефектів надмалих розмірів. Дефекти являли собою отвори діаметром  $d = 0,3$  мм та різної глибини висвердлення, що розташовані у зварному шві, виконаному зварюванням тертям з перемішуванням. Результати контролю дефектних ділянок представлено на рис. 8, 9.

На приведених широграмах чітко видно локальні особливості, що характеризують наявність закладених дефектів.

## Висновки

Розроблено методику визначення дефектів надмалих розмірів ( $<1,0$  мм), що знаходяться як на ділянках основного металу алюмінієвих зварних з'єднань, так і в зоні зварного шва. Це було досягнуто за рахунок використання ширографічного інтерферометра з 10-кратним оптичним збільшенням, вибором широзсуву, який більший за розміри дефектів, а також автоматизованого дозованого термічного навантаження. Експериментально підтверджено, що запропонований підхід дає можливість виявляти дефекти з мінімальним розміром  $0,3$  мм у діаметрі, які знаходяться під поверхнею на глибині  $0,35 \dots 1,8$  мм.

## Список літератури/References

- (2001) *Неруйнівний контроль і технічна діагностика*. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, Фіз.-мех. ін-т. (2001) Non-destructive testing and technical diagnostics. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, PMI [in Ukrainian].
- Rastorgi, P.K., Inaudi, D. (2000) *Trends in optical non-destructive testing and inspection*. Oxford, Elsevier Science B.V.
- Nazarchuk, Z.T., Muravsky, L.I., Kuts, O.G. (2022) Nondestructive testing of thin composite structures for subsurface defects detection using dynamic laser speckles. *Research in Nondestructive Evaluation*, 33(2), 59–77. DOI: <https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2049407>
- Lai, W.L., Kou, S.C., Poon, C.S. et al. (2009) Characterization of flaws embedded in externally bonded CFRP on concrete beams by infrared thermography and shearography. *J. Nondestruct. Eval.*, 28(1), 27–35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-009-0044-x>
- Vandenrijt, J.F., Xiong, H., Lequesne, C. et al. (2019) Shearography inspection of monolithic CFRP composites: finite element modeling approach for assessing an adequate strategy of artificial defects representing delamination. *In: Conf. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*, Vol. 11056, pp. 107–113. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2527445>
- Menner, P., Gerhard, H., Busse, G. (2011) Lockin-interferometry: Principle and applications in NDE. *Strojnicki vestnik – J. of Mechanical Engineering*, 57(3), 183–191. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.169>
- Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V. et al. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 8, 35–40
- Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: an optical measurement technique and applications. *Materials Sci. and Eng.:R:Reports*, 49(3), 61–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.001>
- Лобанов Л.М., Савицький В.В., Киянець І.В. та ін. (2021) Неруйнівний контроль якості елементів титанових стільникових панелей методом ширографії з використанням вакуумного навантаження. *Техн. діагност. та неруйнів. контроль*, 4, 19–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.02>
- Lobanov, L.M., Savytskyi, V.V., Kyianets, I.V., Shutkevich, O.P., Shyian, K.V. (2021) Non-destructive testing of elements of titanium honeycomb panels by shearography method using vacuum load. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 4, 19–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.02> [in Ukrainian].
- Tao, N., Anisimov, A.G., Groves, R.M. (2024) Shearography with thermal loading for defect detection of small defects in CFRP composites. *In: Proceedings of the 21st European Conference on Composite Materials (ECCM21)*, 02-05 July 2024, Nantes, France, Vol. 4 – Experimental techniques, pp. 85–90.
- Tao, N., Anisimov, A.G., Groves, R.M. (2022) Shearography non-destructive testing of thick GFRP laminates: Numerical and experimental study on defect detection with thermal loading. *Compos. Struct.*, 282, 115008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115008>
- Bin Liu, Shuo Wang, Mingming Zhan et al. (2022) Optical nondestructive evaluation for minor debonding defects and interfacial adhesive strength of solid propellant. *Measurement*, Vol. 194, 111066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111066>

## DETECTION OF INTERNAL MICRODEFECTS IN ALUMINUM WELDED JOINTS BY THE SHEAROGRAPHY METHOD

L.M. Lobanov, O.P. Shutkevych, I.V. Kyyanets, I.L. Shkurat, K.V. Shyyan, V.V. Savitsky

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: viktor.savitsky@nas.gov.ua

In modern industry, ensuring the quality of welded joints, particularly those made from aluminum alloys, is a crucial task for enhancing the reliability of structures. Special attention is paid to detecting internal defects that may lead to premature failure. The aim of this work is to develop and apply a shearography non-destructive testing in conjunction with thermal loading to detect micro-sized defects in welded joints of aluminum alloys. Loading was provided by an automated system that allowed the surface of the tested samples to be heated by 3-7°C for 2-4 seconds. The studies showed that the advanced shearographic equipment can detect defects as small as 0.3 mm in diameter, with a depth of up to 1.8 mm, both in the weld zone and in the base metal. The proposed parameters of thermal loading and the settings of the interferometer optical scheme allowed achieving a high sensitivity to micro-defects. The shearography method with automated thermal loading is effective for detecting internal defects in welded joints of aluminum alloys and can be used for non-destructive testing in production conditions. 12 Ref., 9 Fig.

*Keywords: non-destructive testing, shearography, aluminum alloys, microdefects*

Отримано 14.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 15.11.2024

Прийнято 20.12.2024



[www.ndt.com.ua](http://www.ndt.com.ua)

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО 2D СКАНУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МІНІСЕНСОРА

В.О. Троїцький, М.М. Карманов, С.Р. Михайлов, В.О. Шалаєв

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

Для неруйнівного контролю об'єктів в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України створено недорогий рентгенівський 2D сканер на основі цифрового мінісенсора. Сканер дозволяє багаторазово збільшити робочу зону контролю. Отримані при скануванні фрагменти рентгенівських зображень програмно зшиваються в повноформатне цифрове зображення. Досліджуються алгоритми зшивання зображень, що дозволяють підвищити точність сканування до 20 мкм. Це набагато вище, ніж точність сканера з електромеханічним приводом. Бібліогр. 6, рис. 7.

*Ключові слова:* неруйнівний контроль, зшивання зображень, цифрова рентгенівська візуалізація, 2D рентгенівський сканер

**Вступ.** Рентгенівські плоскопанельні детектори, що широко використовуються в неруйнівному контролі для заміни плівкової радіографії, дозволяють отримувати цифрові зображення безпосередньо при просвічуванні контрольованого виробу. Їх розміри можна порівняти з розмірами рентгенівської плівки. Основний недолік таких панелей – висока вартість і відносно низька роздільна здатність (близько 80...120 мкм), що стримує їх застосування в Україні.

Одним із нових напрямків цифрової радіографії, пропонує Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, є створення детекторів на основі недорогих високочутливих рентгенівських мінісенсорів [1–3]. Роздільну здатність сенсора можна порівняти з роздільною здатністю рентгенівської плівки (в межах 20 мкм). Проте такі сенсори мають невелике робоче поле (в межах 24×34 мм) [2], що у багатьох випадках значно менше від розмірів досліджуваного виробу. Для збільшення контрольованої зони пропонується виконувати електромеханічне сканування виробів мінісенсором.

**Конструкторські особливості електромеханічного сканування.** Цей метод широко використовується в комп'ютерних сканерах, які дозволяють переводити в цифровий формат будь-які тексти та зображення, які згодом можуть корегуватися, пересилатися поштою або зберігатися в архівах. У таких пристроях точність електромеханічного сканування узгоджена з роздільною здатністю цифрових фотолінійок, що використовуються для зчитування зображень. У цьому випадку жодних проблем із точністю сканування зображень не виникає. Однак створення прецизійних електромеханічних сканерів (точність ~20 мкм) без висококваліфікованих конструкторів, за відсутності експериментального виробництва, в умовах обмеженого фінансування є досить про-

блематичним. Нами раніше було запропоновано програмні методи підвищення точності сканування рентгенівських зображень [4–5]. Було розроблено недорогий прецизійний рентгенівський однопрохідний (вздовж осі  $X$ ) сканер для контролю протяжних об'єктів на основі мінісенсора S10811-11 (Hamamatsu Photonics). Фрагменти рентгенівських зображень (рис. 1, *a*), які зчитуються з перекриттям в межах точності електромеханічного сканування, аналізуються на точну відповідність (збіг) їх меж кореляційним методом, який широко використовується при побудові панорамних фотознімків з окремих його фрагментів. Результат зшивання 10-ти зображень наведено на рис. 1, *б*. Максимальна ширина рентгенівського знімка – 34 мм, довжина – до 500 мм.

Для збільшення ширини зони контролю пропонується виконувати сканування за двома координатами  $X$  і  $Y$ , тобто 2D сканування (рис. 2). За цією тематикою отримано патент [6].

**Об'єкт дослідження** – технічні та програмні засоби отримання повноформатних зображень при рентгенотелевізійному неруйнівному контролі з використанням мінісенсорів.

**Предмет дослідження** – детерміновані та кореляційні методи підвищення точності рентгенівського 2D сканування з використанням мінісенсорів.

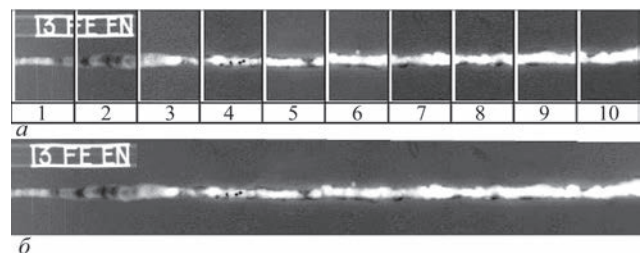


Рис. 1. Цифрові рентгенівські знімки зварного з'єднання: *a* – вихідні фрагменти рентгенівських знімків; *б* – результат зшивання 10-ти зображень

**Мета дослідження** – розробка алгоритмів прецизійного програмного зшивання цифрових зображень і вибір відповідних електронних та електромеханічних елементів технічної реалізації 2D сканування, що забезпечує високу чутливість і роздільну здатність контролю.

**Методи дослідження та апаратура.** Дослідження проводилися з використанням мікроконтролерів ARDUINO та відповідних програмних засобів. В якості електропривода сканера використовується кроковий двигун з ремінним приводом (трансмісією), яким рухається мінісенсор.

**Конструкція 2D сканера.** Для стандартних конструкторських наборів 2D сканерів вартістю до 200 доларів США зазвичай використовуються гвинтові або ремінні приводи. Точність гвинтового сканера – в межах 0,1 мм (залежить від класу точ-

ності гвинта), розмір області сканування – 180×300 мм, вага – до 10 кг; для ремінної передачі: точність – у межах 0,2 мм, область сканування – 300×400 мм, вага – до 5 кг. В обох випадках точність сканування нижча від точності мінісенсора (0,02 мм). Точність гвинтового сканера та його область сканування можна підвищити, але при цьому різко підвищується ціна та вага сканера. З точки зору ергономіки (вага, область сканування) сканер з ремінною передачею кращий. Дослідження впливу похибки механіки такого сканера на точність зшивання цифрових зображень є актуальним (рис. 2).

**Приклади застосування рентгенівського скануючого детектора.** Дослідження проводили на рентгенівському апараті безперервної дії РАП-150/300 (рис. 3, а). Було використано зразок точкового зварного з'єднання трьох сталевих ли-

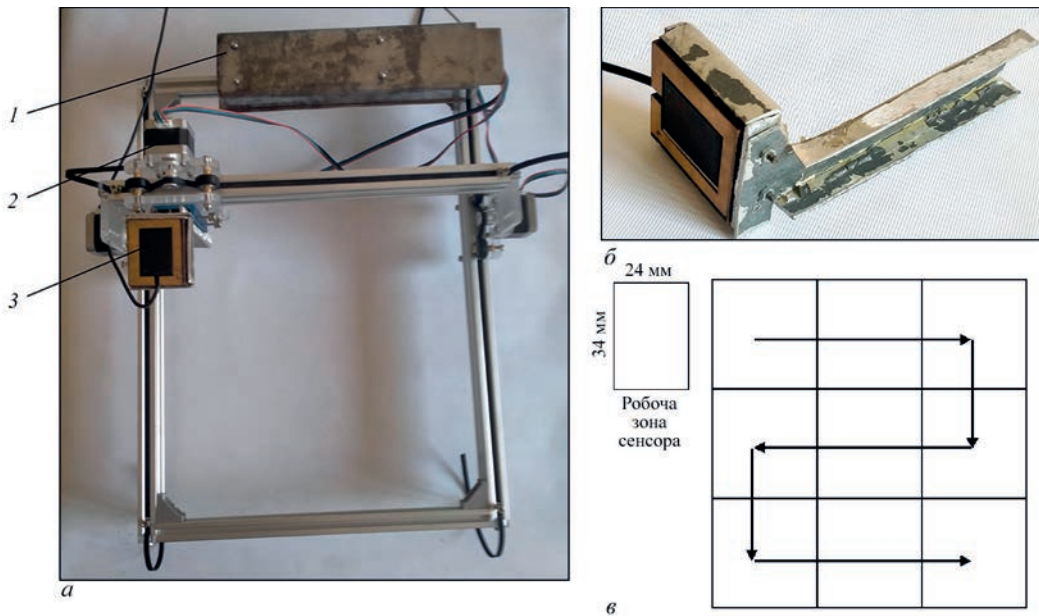


Рис. 2. 2D сканування: конструкція сканера (а): 1 – контролер, 2 – кроковий двигун, 3 – мінісенсор; кріплення сенсора (б); схема сканування 4×3 кадри (в)

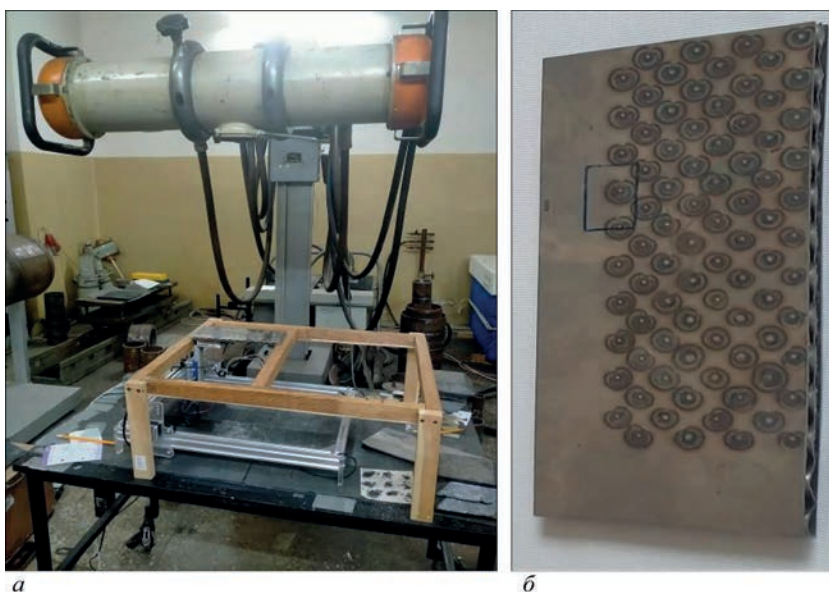


Рис. 3. Процес 2D сканування зразка (а), зразок точкового зварного з'єднання трьох сталевих листів (б)

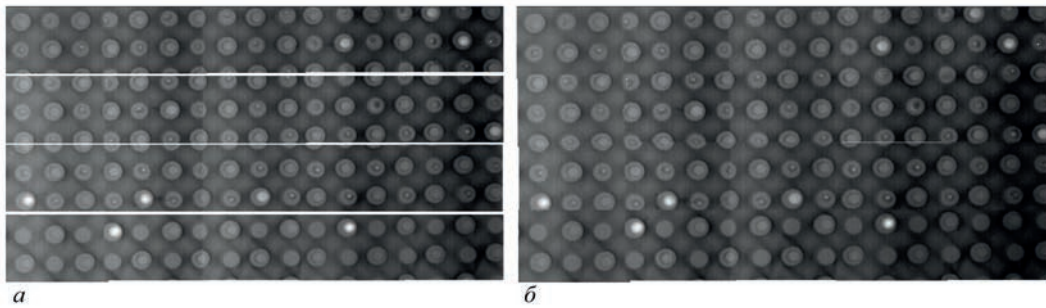


Рис. 4. Суміжні смуги зображень як результат зшивання 5-ти зображень вздовж кожної смуги (а), результат зшивання 4-х зображень смуг (б)

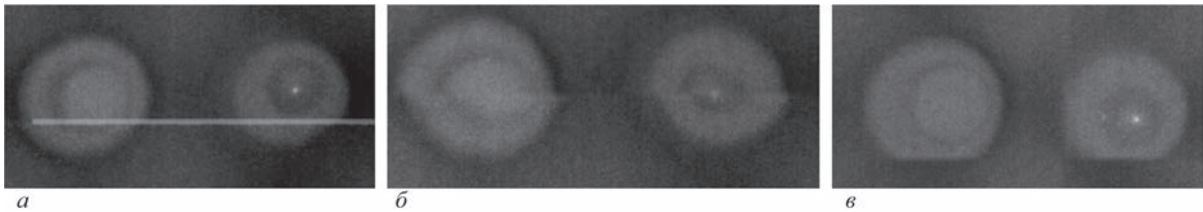


Рис. 5. Неточності зшивання фрагментів зображень за вертикаллю: а – розбіжність елементів зображень; б – смуга; в – обрізаний нижній край зображення

стів 110×240 мм завтовшки 0,5 мм кожен (стілн-никова конструкція, рис. 3, б). Напруга на трубці:  $U = 50$  кВ, анодний струм:  $I = 9$  мА, час формування (накопичення) зображення:  $t = 10$  с, фокусна відстань – 700 мм, схема сканування – 5×4 кадри.

Керування 2D сканером виконувалося за допомогою комп'ютера. Спочатку зшивалися цифрові фрагменти зображень кожного окремого ряду (рис. 4, а). Суміжні фрагменти зображення перекриваються в межах точності сканера (0,2 мм). Навколо цієї зони межі зшивання цифрових зображень уточнюються із застосуванням кореляційного аналізу з точністю до 0,02 мм. Потім аналогічним чином зшиваються чотири смуги (рис. 4, б). І тут виникають проблеми (рис. 5).

Виявлені недоліки зшивання за вертикаллю (рис. 5) пов'язані з неточністю позиціонування міні-сенсора та його перекосом. Це викликає зсув кожного наступного фрагмента зображення (рис. 6).

У цьому випадку кореляційні методи не забезпечують наступного точного вертикального зшивання «ступінчастих» смуг зображень. Зсув фрагментів зображень можна усунути за рахунок підвищення точності електромеханічного привода сканера з 100 до 20 мкм. Проте вартість такого сканера різко зростає. Було запропоновано програмну корекцію зміщення фрагментів зображень. Для цього виконується попереднє калібрування сканера. Обчислюються зсуви зображення (систематична похибка), викликані похибкою електромеханіки сканера (до 200 мкм) і можливим перекосом сенсора. Отримані величини зсувів визначають мінімальну зону перекриття суміжних фрагментів зображень. У межах цієї зони виконується кореляційний аналіз, після чого фрагменти зображень зшиваються. Попередні дослідження

показують, що в цьому випадку точність зшивання зображень може бути підвищена до 20 мкм, що на порядок вище, ніж точність привода електро-

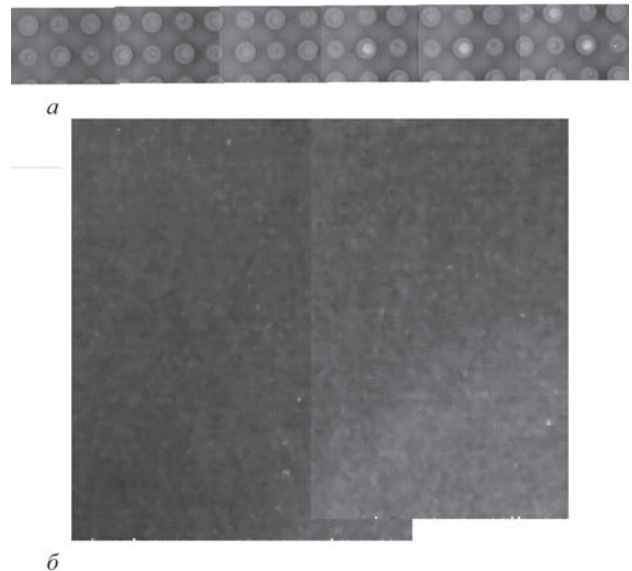


Рис. 6. Зміщення фрагментів зображень при горизонтальному зшиванні (а), збільшений фрагмент зображення зони зшивання (б)

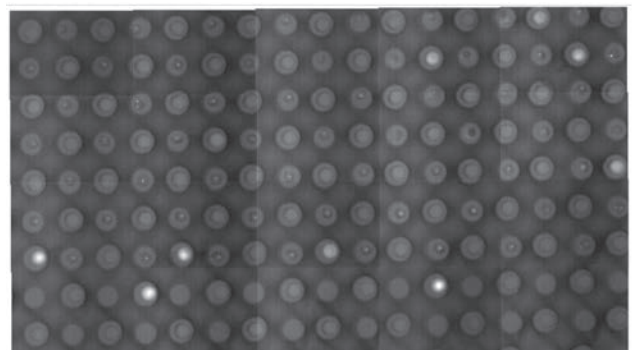


Рис. 7. Зшивання фрагментів зображення кореляційно-детермінованим методом

механічного сканування (200 мкм) (рис. 7). Зміщення зображень, що зшиваються, відсутні.

### Висновки

1. Висвітлено проблему прецизійного рентгівського 2D сканування, коли точність мінісенсора на порядок вища, ніж точність електромеханічного привода сканера.

2. Для компенсації помилок привода електромеханічного сканування цифрового зшивання запропоновано алгоритм обчислення систематичної похибки електромеханічного привода на етапі попереднього калібрування сканера.

3. Експериментальні дослідження підтвердили, що запропонований алгоритм попереднього калібрування сканера забезпечує точність цифрового зшивання зображень 0,02 мм при точності електромеханічного сканування 0,2 мм.

4. Запропонований алгоритм попереднього калібрування сканера дозволяє використовувати для сканування сканери з низькою точністю електромеханічного привода сканування.

### Список літератури

1. Ковецкая Е.Е. (2007) Возможности использования современных дигитальных технологий рентгенодиагностики в стоматологии. *Современная стоматология*, **1**, 39–42.
2. *CCD area image sensor S10811-11* – Hamamatsu Photonics. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com).

3. *DR 7 NDT Installation and Operating Instruction*. DÜRR NDT. [www.duerr-ndt.de](http://www.duerr-ndt.de).
4. Троїцький В.О., Карманов М.М., Михайлов С.Р. та ін. (2020) Скануючі рентгенівські системи на основі мініатюрних твердотільних перетворювачів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **3**, 43–47. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.03.06>
5. Troitskiy, V.A., Karmanov, M.N., Mikhailov, S.R. et al. (2023) Scanning X-ray detector for non-destructive testing. *Materials Evaluation*, **81(5)**, 22–29. DOI: <https://doi.org/10.32548/2023.me-04290>
6. Троїцький В., Шалаєв В., Карманов М., Пастовенський Р. (2024). *Портативна система рентгентелевізійного контролю небезпечних об'єктів та зварних з'єднань*. Патент України № 154276. Опубл. 12.10.2023.

### References

1. Kovetskaya, E.E. (2007) Possibilities of using modern digital technologies of X-ray diagnostics in dentistry., *Sovrem. Stomatologiya*, **1**, 39–42 [in Russian].
2. *CCD area image sensor S10811-11*, Hamamatsu Photonics. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com).
3. *DR 7 NDT Installation and Operating Instruction*. DÜRR NDT. [www.duerr-ndt.de](http://www.duerr-ndt.de).
4. Troitskiy, V.O., Karmanov, M.M., Mikhailov, S.R., Shalaev, V.O., Pastovenskiy, R.O. (2020) Scanning X-ray system based on miniature solid-state transducers. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 43–47 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.03.06>
5. Troitskiy, V.A., Karmanov, M.N., Mikhailov, S.R., Pastovenskiy, R.O., Shalaev, V.A. (2023) Scanning X-ray detector for non-destructive testing. *Materials Evaluation*, **81(5)**, 22–29. DOI: <https://doi.org/10.32548/2023.me-04290>
6. Troitskiy, V.A., Karmanov, M.N., Pastovenskiy, R.O., Shalaev, V.A. (2024) *The portable X-ray TV system for non-destructive testing of hazardous objects and welded joints*. Patent 154276 UA, Publ. 12.10.2023 [in Ukrainian].

## INCREASING THE ACCURACY OF 2D X-RAY SCANNING USING A MINI SENSOR

V.A. Troitskiy, M.N. Karmanov, S.R. Mikhailov, V.A. Shalaev

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: [krm.paton@ukr.net](mailto:krm.paton@ukr.net)

For non-destructive testing of objects, an inexpensive 2D X-ray scanner has been created at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, which is based on a digital mini sensor. Scanning with such a sensor allows multiplying the working testing area. The fragments of digital X-ray images obtained during scanning are stitched into a full-format digital image by software. Image stitching algorithms are being studied, which allow increasing the scanning accuracy to 20 microns. This scanning accuracy is much higher than that of a scanner with an electromechanical drive. 6 Ref., 7 Fig.

Keywords: non-destructive testing, stitching images, X-ray digital imaging, portable 2D X-ray scanner

Отримано 08.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 27.11.2024

Прийнято 09.12.2024

## НОВА СЕРІЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІНВЕРТОРІВ



PATON.UA



## РОЗРОБКИ АСОЦІАЦІЇ «ОКО» НА РИНКУ ЗАСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЙОК

Асоціація «ОКО», до якої входять «Ультракон-Сервіс», «Промприлад» та УкрНДІНК – багаторічний лідер в Україні серед виробників засобів неруйнівного контролю металопродукції та постійний учасник міжнародних виставок.

Науково-виробничі підприємства, які займаються неруйнівним контролем рейок при їх експлуатації, постійно покращують як методи контролю, так і технологію аналізу результатів контролю для забезпечення своєчасного виявлення не тільки критичних дефектів, а й дефектів, що почали свій розвиток. Саме з цією метою НВФ «Ультракон-Сервіс» розробила серію приладів для ультразвукового та вихрострумowego контролю:

- двонитковий рейковий ультразвуковий дефектоскоп УДС2-73;
- одноститковий рейковий ультразвуковий дефектоскоп УДС2-77;

- ручний портативний ультразвуковий дефектоскоп Sonoson В;

- одноститковий рейковий вихрострумовой дефектоскоп ВТС2-77.

Залізничні рейки контролюються за допомогою ультразвукових хвиль високої частоти, зазвичай від 2 до 5 МГц. Оскільки дефекти в рейках мають різний характер, використовують різні кути введення ультразвуку в рейку та різні схеми введення звукових хвиль, наприклад: луна-метод, дзеркально-тіньовий метод, тандем-методи. Також для ефективного та оперативного виявлення дефектів реалізують різні види виведення даних на екран, наприклад: А-скан, Б-скан та їх комбінації. Така різноманітність методів контролю та схем введення звукових хвиль, а також різні види візуалізації даних дозволяють ефективно та з великою ймовірністю виявляти дефекти на різних стадіях розвитку.





Вихрострумний контроль дозволяє виявляти експлуатаційні тріщини поверхні катання рейки.

При ручному контролі рейок використовуються ультразвуковий або вихрострумний дефектоскопи, набір перетворювачів і спеціальний скануючий пристрій.

При механізованому контролі рейок використовуються знімні візки, які приводяться в рух операторами. НВФ «Ультракон-Сервіс» пропонує три типи таких пристроїв: ультразвуковий однопітковий візок, ультразвуковий двопітковий візок та вихрострумний однопітковий візок. На таких візках розміщується електронне обладнання, блоки перетворювачів та блоки живлення.

Механізовані ультразвукові дефектоскопи дозволяють проводити суцільний контроль рейок зі швидкістю до 4 км/год на наявність дефектів в

обох нитках залізничної колії по всій довжині та перерізу рейки, за винятком підшви.

Механізовані вихрострумні дефектоскопи дозволяють проводити контроль рейок зі швидкістю до 2,5 м/с на наявність дефектів однієї нитки залізничної колії, як у головці так і у поверхні катання рейки.

Швидкісний безперервний контроль рейок за допомогою мобільних засобів полягає в тому, що контроль рейок проводиться за допомогою високошвидкісних транспортних систем (автомобіль, вагон або мототриса) без зупинки за призначеним маршрутом. Це дозволяє контролювати ділянки, що перевищують 100 км за зміну. Дані контролю аналізуються, виділяються потенційно небезпечні ділянки рейок, які перевіряються операторами за допомогою ручних або механізованих дефектоскопів.

За матеріалами сайту [www.ndt.com.ua](http://www.ndt.com.ua)



## ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ СЕРТИФІКАЦІЇ СПЕЦІАЛІСТІВ І АТЕСТАЦІЇ ЛАБОРАТОРІЙ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ В АТОМНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

З усіх видів енергетики атомна є найперспективнішою. Незважаючи на воєнний час, в Україні продовжується будівництво блоків АЕС. Треба очікувати, що МАГАТЕ та інші органи найближчими роками посилять вимоги до технологій неруйнівного контролю, до спеціалістів і випробувальних лабораторій у цій галузі енергетики. Оскільки у воюючій Україні продовжуються роботи з технічного обслуговування діючих і будівництва нових блоків АЕС, МАГАТЕ змушений підвищувати вимоги до організацій, що займаються наглядом за безпекою на АЕС. У кожній країні слід мати задовільну організацію у чотирьох сферах акредитації та атестації на АЕС: 1) випробувальні лабораторії; 2) навчання спеціалістів; 3) обладнання, що постачається та експлуатується; 4) калібрування засобів, приладів та еталонних зразків.

У цьому відношенні для нас важливий досвід США та інших країн, де є багато атомних реакторів. Нещодавно представники УТ НКТД вели перемовини з Американським товариством неруйнівного контролю (ASNT) про створення в ІЕЗ ім. Є.О. Патона регіонального відділення. Цю процедуру можна відновити, маючи на увазі сучасний рівень співробітництва України та США. Сумісними зусиллями зацікавлених сторін можна створити в м. Київ відділення ASNT, що займається всіма методами НК. Особливо важливо освоїти міжнародний досвід у відповідності до перерахованих сфер нагляду АЕС. ІЕЗ ім. Є.О. Патона та УТ НКТД мають досвід у двох із вказаних вище чотирьох сфер нагляду за якістю на АЕС. Це – атестація лабораторій і фахівців з НК.

Спеціалістів, що проходять атестацію з НК, приблизно у 3 рази більше у порівнянні з кількістю спеціалістів, що атестуються з руйнівних методів контролю. Найбільш затребуваною є первинна атестація. З введенням ISO 9712 зросла щорічна оцінка практичних навичок. Така перевірка зросла у 4 рази. З методів НК найбільш затребуваними є візуальний (33 %), ультразвуковий (19 %), радіографічний (13 %) і капілярний (13 %). Особливо важливим є освоєння спеціалізованих методик з різних методів НК.

Атомна енергетика – це одна з галузей промисловості, що найбільш динамічно розвивається і вимагає створення відповідних Учбових центрів, тренажерів і т.ін., як це було свого часу зроблено на ЗАЕС, де

було створено Учбово-тренажерний центр з усього комплексу питань НК. Гадаю, що зараз такий Центр потрібно робити у м. Київ на основі інститутів Академії наук України, де зберігся науковий і практичний потенціал для подібного учбово-тренажерного центру. У ЦС при УТ НКТД є багаторічний досвід з атестації персоналу, багато різного обладнання, у тому числі й для руйнівних випробувань.

У галузі атомної енергетики завжди були свої нормативні документи та вимоги до лабораторій НК. Американське товариство з НК здійснює сертифікацію персоналу НК згідно з SNT-TC-1A та ANSI/ASNT CP-189 за допомогою «Програми сертифікації на основі письмової практики роботодавця».

Процес акредитації лабораторії складається з наступних процедур: подача заявки з повним набором документів та оплатою; ASNT обирає власного аудитора для акредитації компанії, яка подала заявку; аудитор виконує перевірку документів на відповідність вимогам SNT-TC-1A та/або CP-189; персонал ASNT працює із заявником для усунення невідповідностей; дистанційний або явочний (за містом розташування компанії) аудит для підтвердження, що персонал НК навчений і сертифікований; персонал ASNT із заявником, щоб закрити невирішені питання; експертна комісія підтверджує, що пакет заповнений у відповідності до SNT-TC-1A та/або CP-189; публікація на сайті про внесення компанії у перелік акредитованих за EBC компаній на <https://asnt.org>.

Такий спрощений підхід розроблений і підтриманий у США як представниками промисловості, що використовують методи НК, так і виробниками обладнання.

Співробітництво двох науково-технічних товариств: ASNT та УТ НКТД слід було б розширити на сферу безпеки АЕС: сертифікацію спеціалістів і атестацію лабораторій.

Паралельно можна розробити пропозиції для: створення Учбово-тренувального центру для персоналу НК на АЕС; створення філіалу ASNT в Україні на базі ІЕЗ, КПІ, ПІМ; підготовки урядами США та України проекту «Розвиток моніторингу конструкцій у атомній енергетиці та створення Учбово-тренувального центру для АЕС».

Закликаю спеціалістів із сертифікації у галузі НК висловитися з вищенаведених питань.

Голова УТ НКТД, проф. В.О. Троїцький

*Від редакції. У 2023 р. НАЕК «Енергоатом» створив та акредитував в НАН України Орган сертифікації персоналу при ВП «Атомремонтсервіс», головним завданням якого є атестація персоналу з неруйнівного контролю, що працює в лабораторіях контролю металу АЕС.*

## ПАМ'ЯТІ А.Я. НЕДОСЕКИ



2 жовтня 2024 р. після тяжкої тривалої хвороби пішов з життя відомий український вчений, видатний діяч науки й техніки, лауреат Державної премії України, завідувач відділу, доктор технічних наук, професор Анатолій Якович Недосека, який 20 вересня 2024 р. відзначив дев'яносторічний ювілей.

Все своє наукове життя Анатолій Якович присвятив рідному Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Починаючи з 1958 р., з роботи у конструкторському бюро, він зацікавився науковими проблемами, пов'язаними з зварювальними деформаціями, надалі працював у відділі зварювальних деформацій, який очолював О.А. Казиміров. Ці роботи Анатолія Яковича стали основою для захисту ним кандидатської, а потім докторської дисертацій.

У 1963 р. за ініціативи Б.Є. Патона він очолив лабораторію технічної діагностики зварних конструкцій, а у 1983 р. – відділ того ж найменування і напрямку, якому Анатолій Якович присвятив все своє життя.

Результати досліджень показали, що саме метод акустичної емісії (АЕ) задовольняє таким вимогам, як контроль одночасно великих поверхонь, виробів складної геометрії, комплексної оцінки стану діючих конструкцій і визначення їх руйнівного навантаження та залишкового ресурсу. Для його ефективного застосування були виконані численні аналітичні та експериментальні дослідження щодо виникнення та розповсюдження хвиль АЕ у різних умовах, включаючи низькі та високі температури та вплив агресивного середовища. Результатом стала розробка теорії, методів і а засобів забезпечення безпеки експлуатації конструкцій.

Спільно з АТ «Відеотон» і підприємством «Gereb As Tarsa» (Угорщина) розроблено мобіль-

ні та стаціонарні системи технічної діагностики «ЕМА» 2, 3 і 4 поколінь.

А.Я. Недосекою був введений у практику новий термін – вектор стану матеріалів (ВСМ), що дозволяє статистичним шляхом аналізувати етапи руйнування матеріалів при їх деформуванні та передбачати хід процесу руйнування, визначати руйнівне навантаження та залишковий ресурс матеріалу з імовірністю 0,95 і похибкою  $\pm 15\%$ . Запропоновано та реалізовано у вигляді діючих програм та алгоритмів поняття «Нормована інтелектуальна порада» (НІП). Її використання дозволяє автоматизувати прийняття рішення про заходи, які необхідно вжити при виникненні небезпечних ситуацій різних типів при експлуатації конструкцій.

Діагностичні моніторингові та експертні системи та прилади, а також методи їх застосування впроваджені на: Одеському припортовому заводі, Київських ТЕЦ-5 і ТЕЦ-6 (2 системи, що працюють при температурі 450 і 560 °С), на конструкціях підприємства Укрхімтрансаміак – мостовому кілометровому переході через р. Дніпро, через дорогу та водоканал у районі м. Кривий Ріг. Тепер, вперше у світовій практиці, дослідження розвитку руйнування матеріалів експлуатованих конструкцій проводяться на базі практичних оцінок їх працездатності в реальних умовах.

У 1993 р. з ініціативи А.Я. Недосеки організовано технічний комітет ТК 78 з технічної діагностики та неруйнівного контролю, який він очолював. За його участю створений та виходить чотири рази на рік журнал «Технічна діагностика і неруйнівний контроль», заступником головного редактора якого був А.Я. Недосека.

Розроблено близько 40 нормативних матеріалів і методик діагностування (зокрема ДСТУ) з акустико-емісійної діагностики працездатності трубопроводних систем і судин нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв.

При ТК 78 створено атестаційний центр з підготовки та перепідготовки фахівців першого, другого та третього рівнів у галузі АЕ діагностики, навчання у якому пройшли понад 2000 фахівців з різних промислових підприємств.

Анатолій Якович до останніх днів свого життя продовжував плідну наукову діяльність, мав велику кількість творчих планів, ідей та задумів.

Тож найкращою пам'яттю про нього стане продовження розпочатих і запланованих ним робіт, розвиток напрямку технічної діагностики зварних конструкцій, втілення мрії про охоплення широкого кола підприємств України системами постійного АЕ моніторингу, які б забезпечили безаварійну експлуатацію небезпечних виробництв.

Дирекція ІЕЗ, редакція журналу



## НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

член Європейської федерації з неруйнівного контролю  
член Міжнародного комітету з неруйнівного контролю



### Вітаємо нових індивідуальних членів Українського товариства НКТД

- **Баб'яка Миколу Олександровича**  
к.т.н., доцента кафедри «Залізничний транспорт» НУ «Львівська політехніка»
- **Зайцеву Лілію Василівну**  
к.т.н., доцентку кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Ковбасюка Тараса Михайловича**  
к.т.н., доцента кафедри «Матеріалознавство та інженерія матеріалів» НУ «Львівська політехніка»
- **Кондрашова Сергія Івановича**  
д.т.н., професора кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Терещака Юрія Володимировича**  
к.т.н., доцента кафедри «Залізничний транспорт» НУ «Львівська політехніка»
- **Тростянчина Андрія Миколайовича**  
д.т.н., професора кафедри «Матеріалознавство та інженерія матеріалів» НУ «Львівська політехніка»

### Підтвердили членство в УТ НКТД на новий термін

- **Артеменко Тетяна Миколаївна**  
керівниця лабораторії НК ТОВ «Кременчуцька ТЕЦ»
- **Балєв Володимир Миколайович**  
к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Горкунов Борис Митрофанович**  
д.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Григоренко Ігор Володимирович**  
к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Григоренко Світлана Миколаївна**  
к.т.н., доцентка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Дроздова Тетяна Василівна**  
к.т.н., доцентка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

- **Львов Сергій Геннадійович**  
к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Плеснецов Сергій Юрійович**  
д.т.н., доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Плеснецов Юрій Олександрович**  
к.т.н., професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Познякова Маргарита Євгенівна**  
к.т.н., доцентка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Пуларія Андрій Луарсабович**  
к.т.н., доцент кафедри «Вагони та вагонне господарство» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро
- **Сіренко Микола Миколайович**  
к.т.н., професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Смолін Юрій Олександрович**  
к.т.н., професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Сучков Григорій Михайлович**  
д.т.н., професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Тополов Ігор Іванович**  
доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Трохін Михайло Вікторович**  
к.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Хомяк Юрій Валентинович**  
к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Чуніхіна Тетяна Віталіївна**  
к.т.н., доцентка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Юданова Ніна Миколаївна**  
ст. викладачка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»

## БОРИС ЄВГЕНОВИЧ ПАТОН – ФУНДАТОР НАУКИ З ДЕФЕКТОСКОПІЇ ЗВАРНИХ З’ЄДНАНЬ І МОНІТОРИНГУ КОНСТРУКЦІЙ

**В.О. Троїцький**

д.т.н., проф., зав. відділу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

27 листопада – день пам’яті Бориса Євгеновича Патона – всесвітньо відомого українського вченого, академіка, президента Національної академії наук України, директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України до 2020 р.

Б.Є. Патону, його внеску в розвиток сучасних технологій зварювання та споріднених технологій присвячено багато публікацій. Я ж хочу поділитися своїми спогадами про довгі роки тісного спілкування з Борисом Євгеновичем, що доповнюють портрет цього великого вченого, який відіграв важливу роль у розвитку науки в колишньому СРСР і в Україні, який був і залишиться назавжди «головним дефектоскопістом» країни, непересічною особистістю, який у 90-х роках минулого століття став фундатором нового на той час наукового напрямку науки – технічної діагностики та неруйнівного контролю.

Борис Євгенович Патон залучав до своєї орбіти велику кількість першокласних фахів-

ців та оточував себе справжніми професіоналами. До складу Вченої ради Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона входили знані в усьому світі фахівці в галузі зварювання та споріднених технологій.

Борис Євгенович був другом, цікавим співрозмовником і, в той же час, жорстким прагматиком, нетерплячим до невігластва. Саме завдяки його правильній оцінці проблем регулювання в силовій електротехніці я переїхав до Києва на його запрошення та під його керівництвом більше десяти років займався зварювальною електродинамікою, поки він не доручив мені зайнятися дефектоскопією.

Репортеру газети КМ України «Урядовий кур’єр» за 14.07.2020 р. Борис Євгенович сказав: «...в нашій родині з діда-прадіда панував культ праці. А коли втягуєшся, то не відразу помічаєш, що професія поглинає весь твій час... Академія була моєю єдиною родиною. Від цього, звичайно, страждало приватне життя...



Члени Вченої ради ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ, які багато зробили для вивчення виникнення та усунення причин утворення дефектів у зварних з’єднаннях. У першому ряду: Рабкін Д.М., Касаткін Б.А., Труфяков В.І., Походня І.К., Лебедев В.К., Патон Б.Є., Севбо П.І., Дудко Д.А., Медовар Б.І. (фото з книги «Мониторинг состояния конструкций», Київ, Інтерсервіс, 2022)

Я поставив за мету зробити зв'язки між наукою та виробництвом максимально тісними. Це й був головний імператив... за схемою «науковий інститут–КБ–дослідне виробництво». Цей принцип був фундаментом всієї його діяльності. Ось ще декілька тез із інтерв'ю газеті «Урядовий кур'єр» від 14.07.2020 р.:

«Я прожив довге, насичене і цікаве життя, мав змогу працювати з різними людьми, спостерігати за тим, як їхні характери проявляються в різних ситуаціях. Досвід підказує, що на булаву найбільше заслуговує той, хто спроможний по-волячому тягти майже непідйомну ношу, ні на що не скаржачись і не хизуючись. Тобто це має бути людина працююча та порядна».

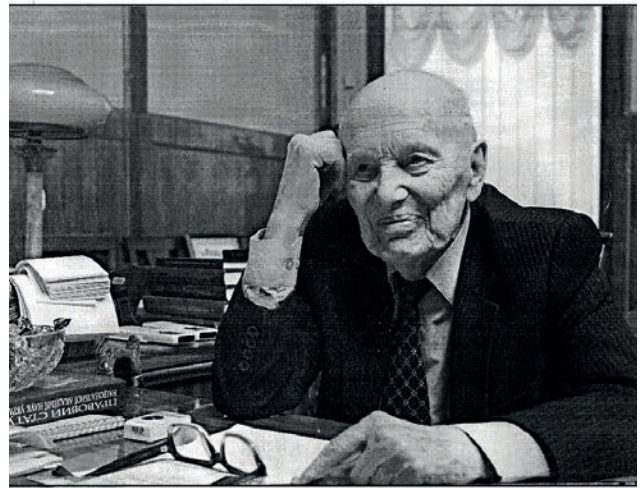
«А загалом ці 58 років (президентства), як і вся історія академії, були часом і великих досягнень, і великих випробувань. Різнилися тільки виклики, які поставали перед державою!!!»

«Наприклад, наші науковці прогнозували негативні наслідки масштабної осушувальної і зрошувальної меліорації, інтенсивної хімізації сільського господарства й будівництва ЧАЕС. Тільки хто ж нас послухав? ...Аварія на ЧАЕС була комплексним викликом і академія активно долучилася до ліквідації її наслідків, яка триває й досі».

За підтримки Б.Є. Патона було розвинено безліч нових електротехнічних ідей, котрі мають не тільки зварювально-металургійне значення (магнітна комутація, модуляція зварювального струму, резонансні джерела струму, плавне регулювання струму та напруги без силових н/п в основних електричних ланцюгах і т.п.).

Чимало сил витрачено Борисом Євгеновичем у періоди організації та становлення в країні нового наукового напрямку, який отримав назву «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» (ТДНК), при підготовці постанов з цього питання Державним комітетом з науки і техніки, Кабінету Міністрів, Президії НАНУ, відомчих документів. Борис Євгенович був ініціатором запуску на різних заводах ділянок з НК, що складаються з ділянок магнітного, рентгенотелевізійного, ультразвукового, електромагнітно-акустичного, вихрострумовевого та інших методів.

Для майбутніх електротехніків залишилося багато його нереалізованих ідей. Важливо зга-



Президент НАН України академік Борис Євгенович Патон розповів «Урядовому кур'єру» про своє бачення процесів, які нині відбуваються (фото від 14.07.2020 р.), <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/prezident-nanukrayini-akademik-boris-paton-rozpozvip/>

дати про такі науково-фантастичні ідеї Б.Є. Патона, як: електростанції прибою (сила прибою, припливу та відпливу), створення механічних акумуляторів для рухомого складу, в яких накопичується енергія під час гальмування та її наступна рекуперация. Тоді ще не було Ілона Маска з його електромобілями, а ми вже обговорювали проблеми накопичення та рекуперации енергії. Індивідуальний електротранспорт з рекуперациєю досі намагаються стримувати нафтові магнати! Але час вносить свої корективи. Зелена енергетика розвивається. Тепер накопичення та рекуперация енергії присутні в реальному житті. Тобто ідеї електронакопичення та рекуперации розвиваються. Щодо накопичення та рекуперации в механічних акумуляторах у нас є наукові статті в авторитетному журналі «Електричество». Не менш цікаві були ідеї для залізниці, трубна електропошта, плоскі електричні машини (тобто не циліндр в циліндрі, як зараз, а диск відносно диску) та інші. Магнітна комунікація, плоскі електродвигуни, багато наших ідей, у тому числі, джерела зварювального струму, що регулюються зварним кабелем та ін., знайшли широке практичне застосування.

Однак згодом нову електродинаміку він приніс у жертву прагматичній дефектоскопії. Дуже важливим завданням був пуск трубокатного цеху на Харцизькому трубному заводі (ХТЗ). Затримка його пуску негативно впливала на авторитет України. Це мала бути відпо-

відь канцлеру Конраду Аденауеру. Так в Уряді назвали запуск ХТЗ, який мав бути здатним виробляти труби для магістральних газопроводів високого тиску. Запуск затримувався через дефектоскопію, необхідно було вжити радикальних заходів. Німеччина припинила постачати газові труби. Електродинаміку, близьку по духу Борису Євгеновичу, довелося призупинити та почати роботи з дефектоскопії. Проте, наскільки це важливе та непросте завдання, йдеться в книзі «Сварочная электротехника и дефектоскопия. Воспоминания», Київ, 2020. Понад п'ять років найкращі спеціалісти Інституту електрозварювання на чолі з Б.Є. Патоном займалися пуском другого цеху ХТЗ. У жертву цій справі було принесено наш електротехнічний напрямок із всесвітньо визнаними досягненнями (розроблені нами зварювальні джерела живлення досі успішно експлуатуються). Борис Євгенович домігся запуску другого цеху газогонних труб на ХТЗ і підвищення ціни на 15 % для труб з дефектоскопічною, тобто газовою сертифікацією з повним циклом фізичних досліджень. Кількість вироблених труб дещо зменшилася, але істотно покращилася їх якість, культура виробництва. Тому завод матеріально не постраждав. Незабаром ХТЗ став флагманом виробництва труб для газових магістралей високого тиску. Україна припинила закупати газові труби в Німеччині.

Одним з епохальних, але нереалізованих рішень Бориса Євгеновича була спроба введення в цикл виготовлення та ремонту труб для магістральних газопроводів методу акустичної емісії (АЕ). Методом АЕ в ІЕЗ довгий час займався академік НАНУ Б.А. Касаткін. Були часи, коли методу АЕ в Японії, США, Німеччині надавали великого значення. Матеріали з АЕ надходили до нас із грифом секретності. Проводились закриті конференції з АЕ. Велика робота з акустичної емісії була організована по лінії РЕВ. Борис Євгенович намагався розвивати цей напрямок. За створення в ІЕЗ та впровадження технологій з АЕ співробітники відділу № 4 мають п'ять медалей ВДНГ УРСР. Ми виготовляли АЕ дефектоскопи з кардіографів.

Після того, як на складах готової продукції ХТЗ десятки труб, які були готові до відправ-

ки замовнику, стали порушувати тишу донецького степу пронизливими звуками холодних тріщин, що розривають метал, коли він остигає, Борис Євгенович почав стимулювати розвиток методу АЕ. Після відповідних змін у технології зварювання труб ці «симфонії» припинилися, але від появи холодних тріщин, як і від помилок у технології виготовлення труб ніхто не застрахований. Під керівництвом Бориса Євгеновича були проведені великі науково-дослідні роботи, в результаті яких було встановлено, що з впровадженням АЕ на остигаючих трубах можна підняти якість труб, зменшити обсяг УЗК і РТК, традиційних засобів діагностики.

Разом з Борисом Євгеновичем ми отримали відповідні патенти. З'явилася можливість істотно підняти якість, спростити виробництво труб, докорінно змінити технологію контролю труб магістральних газопроводів у процесі їх виготовлення та ремонту. Однак цього не сталося. Проте цей резерв якості газогонів зберігається.

Не менш драматичні історії нам з Борисом Євгеновичем довелося пережити під час організації технології виробництва неруйнівного контролю багатошарових труб. Довгі роки ці роботи велися в ІЕЗ, потім на заводах ХТЗ і ВМЗ. Повний цикл виробництва таких труб був організований на Вискунському металургійному заводі. Було вирішено багато науково-технічних проблем з НК багатошарового металу, котрий міцніший, ніж монолітний, не дає уламків, закільцьовує тріщини. Але для газогонів він не застосовується.

Наші успіхи з неруйнівного контролю якості зварних з'єднань при виробництві труб високого тиску для магістральних газопроводів надихнули Бориса Євгеновича виправити стан справ з дефектоскопією не тільки в м. Харцизьк, а і в усьому СРСР. На жаль, велика кількість заводів Міністерства приладобудування України були орієнтовані на інші замовлення («Квант», «Арсенал», «Радіозавод» та ін.), а не на виробництво дефектоскопічних приладів.

Мало кому відомо, що до 70-го року минулого століття поняття «дефектоскопія» в Академії наук СРСР, у Міністерстві освіти та інших установах СРСР відносилось до астро-

номії, а основний фахівець з цієї професії – проф. М.М. Міхєєв – був чл.-кор. відділення астрономії в АН СРСР. Наукова логіка полягала в тому, що основні фізичні методи та прилади дефектоскопії були подібні до астрономічних. Ми тоді були астрономами! Наші дефектоскопісти відправлялися в закордонні відрядження (Німеччину, США, Великобританію, Югославію та ін.) саме від відділення астрономії АН СРСР і звітували ми перед астрономами. Разом з тим, дефектоскопія вже тоді сформувалася як серйозний промислово важливий науковий напрям, що, як і астрономія, вивчає та використовує різні фізичні явища (світлові, магнітні, радіаційні тощо), але тільки в промислових умовах зі своєю особливою специфікою, яка ближче до медицини, ніж до астрономії. Прилади НК були невід’ємною частиною практично всіх відповідальних технічних процесів. Дефектоскопічних приладів не вистачало. Борис Євгенович виправив цей недолік, на що пішло багато років.

Всі авіаційні, трубні та інші заводи не могли працювати без дефектоскопічних приладів. У Мінприладі колишнього СРСР дефектоскопія була третьорядною справою. Обладнання для дефектоскопії відносилось до категорії товарів широко вжитку, на його виготовлення використовувалися елементи, відсортовані при виробництві військової техніки. Тому вітчизняне дефектоскопічне обладнання було нижчої якості, ніж закордонне, де при виготовленні дефектоскопічних приладів використовувалися найкращі комплектуючі. В СРСР практично не було ринкової конкуренції. Більш того, впровадження дефектоскопії зменшувало об’єми продукції, яка випускалася, що було не вигідно користувачам. І це треба було подолати. Ці та інші проблеми дефектоскопічного напрямку взявся виправляти Борис Євгенович. Для цього необхідно було підготувати відповідні Постанови Кабінету Міністрів, ДКНТ СРСР і України, а також провести колосальну роботу задля реалізації цих Постанов (№№ 142 і 457), створити Программу з розвитку дефектоскопічного напрямку. Тому наприкінці минулого століття Б.Є. Патон приділяв багато особистого часу вирішенню проблем дефектоско-

пії доти, поки цей науковий напрям не отримав гідного розвитку. Дефектоскопія стала серйозною наукою, від якої у значній мірі залежить надійність аерокосмічної, атомної та іншої техніки. Свідченням тому є отримані численні патенти та статті з дефектоскопії. Саме Б.Є. Патон придумав назву цієї дисципліни «ТДНК», котра поширилася не тільки в Україні, а й у Болгарії, Молдові та країнах колишнього СРСР.

Паралельно з впровадженням системи дефектоскопії на Харцизькому трубному заводі ми виконували організаційні роботи з розвитку, підняття рівня дефектоскопії всієї промисловості України. Треба було вирішувати глобальні організаційні питання цього важливого наукового напрямку через відповідні директиви, постанови Кабміну УРСР. Загальна чисельність дефектоскопістів в ІЕЗ (один науковий і два конструкторські відділи) сягнула 120 співробітників. Майже кожний день у кабінеті Бориса Євгеновича проходили наради з дефектоскопії.

Міністерство приладобудування СРСР, яке відповідало за виробництво приладів з дефектоскопії, повинно було розуміти важливість об’єктивної оцінки якості у численних галузях промисловості. Усі галузі повинні бути добре оснащені, мати достатньо виробничих площ, якісну наукову базу з НК. Мало хто розумів важливість дефектоскопічної науки. Тому Б.Є. Патону доводилося особисто займатися розвитком заводів, які виробляють дефектоскопічне обладнання, вирішувати питання створення в республіках колишнього СРСР дефектоскопічних підрозділів і нових виробничих площ, які стосуються НК.

Необхідно було припинити практику використання для дефектоскопічних приладів другосортної елементної бази, розширити їх виробництво. Задачу вирішення всіх цих проблем у Державному комітеті СРСР з науки і техніки (ДКНТ) Борис Євгенович поставив перед нашим, на той час вже сформованим науковим відділом дефектоскопії. Тому нашому колективу (відділу №4 ІЕЗ), разом із відповідними НДІ різних відомств країни, довелося готувати спочатку постанови ДКНТ і КМ СРСР, а потім домагатися їх виконання. Усі ці документи читав, виправляв і контролював виконання

Борис Євгенович. Ця робота велася не один рік, вона супроводжувалася численними нарадами, узгодженнями в Москві, Києві, Кишиневі, Ленінграді, Свердловську, Томську та інших містах, найчастіше за участі Бориса Євгеновича. Завдяки цій діяльності багато кафедр технічних вузів України, Болгарії, а також інших країн (на той час республік колишнього СРСР) готують спеціалістів з методів НК.

Небезпека появи зварних з'єднань низької якості, додаткова навантаженість металу, наявність специфічних зон термічного впливу, деградація структури металу диктували розвиток науки і техніки дефектоскопії. Дотепер найвідповідальніші конструкції виготовляють без зварювання. Тому не випадково, розуміючи важливість стеження за властивостями металу після зварювання, ІЕЗ під керівництвом Б.Є. Патона став провідною організацією з розвитку дефектоскопії – важливого наукомісткого напрямку для всіх галузей промисловості, розвинув дефектоскопію як науку. У 1984 р. була створена Наукова рада з назвою «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» при Президії НАНУ. Ця Наукова рада, ядром якої був відділ № 4 ІЕЗ ім. Є.О. Патона, підготувала Програму, що дала поштовх на консолідацію та розвиток дефектоскопії в УРСР. З'явилася спеціальна звітність, почали готувати збірники праць з НК, які стали провісниками журналів з НК в Україні. Б.Є. Патон розумів, що сама дефектоскопія – далеко не все, що необхідно для металоконструкцій. У назві професії має бути щось, заради чого виконується дефектоскопія, наприклад «моніторинг» або «діагностика». Він віддав перевагу другому слову.

Протягом 1992-1993 рр. була сформована нова Програма, яка вже мала назву «Технічна діагностика та неруйнівний контроль». Ця Програма включала вже 263 проекти і 160 організацій-виконавців. Програма була затверджена ДКНТ і НАН України. Вона дала можливість активізувати діяльність з проблеми дефектоскопії в Україні. Так, у переліку головних напрямків розвитку науки і техніки України з'явилася тема «Діагностичне забезпечення надійної і ефективної експлуатації енерго- і ресурсоемних машин», і, починаю-

чи з 1995 р., вже з'явилася тема «Неруйнівний контроль і технічна діагностика», що відповідала назві товариства УТ НКТД.

Особливо важливе значення для України має організація системи сертифікації персоналу, зайнятого в неруйнівному контролі, за процедурами, гармонізованими з європейськими та міжнародними стандартами. За ініціативи Бориса Євгеновича у 1994 р. спільним наказом № 172/64/106/221 від 07.07.1994 р. Міністерства освіти України, Національної академії наук України, Комітету України з нагляду за охороною праці та Державного комітету України з нагляду в атомній промисловості в структурі УТ НКТД був створений Національний атестаційний комітет (НАК) України з неруйнівного контролю. Головним завданням НАК була організація системи сертифікації персоналу, яка відповідала б міжнародним стандартам (тоді ще не було Національного агентства з акредитації (НААУ)).

Також завдяки підтримці Бориса Євгеновича в були створені Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (1990 р.), Технічний комітет із стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», Міжнародна академія неруйнівного контролю (ANDTI) та ін.





## Сторінки історії УТ НКТД

В рубриці «Новини УТ НКТД» запроваджується розділ «Сторінки історії УТ НКТД», в якому будемо згадувати найвагоміші події минулих років, до яких мало пряме або опосередковане відношення Українське товариство НКТД.

У цьому випуску журналу пропонуємо повернутися на 20 років назад в 2004 рік і згадати про найбільш значні події того року, в яких брали участь українські спеціалісти в сфері неруйнівного контролю.

### Рік 2004

#### А наступний «ЛЕОТЕСТ» ювілейний!

Де і коли наші провідні фахівці можуть поєднати серйозний інтерес до проблем неруйнівного контролю та прихильність до чистого повітря, краси зимової гірської природи та активного відпочинку на гірських лижах? Де і коли їм дадуть достатньо часу для доповіді, в якій зосереджена напружена праця всього життя? А де ще їм поставлять стільки запитань, відповіді на які стануть темою майбутніх досліджень? Де ще професор і студент на рівних обговорюють результати та перспективи своїх робіт? Де ще? Звісно лише у бла-

гословенному гірському Славську на черговому «ЛЕОТЕСТІ» у другій половині лютого. Тому що у позитивних відповідях на ці запитання й криються основні засади «ЛЕОТЕСТА». Програму сплановано таким чином, щоб учасники мали достатньо часу на активний відпочинок. Але після обіду на учасників чекає напружена робота, іноді до пізнього вечора. У перший день всіх знайомлять на неформальній вечері (поєднаній з відкриттям виставки приладів НК), після чого обстановка на семінарі стає більш розкутою



та робота поживається. Доповідачів не обмежують у часі, але просять стежити за увагою зали. Запитань на «ЛЕОТЕСТІ» завжди ставлять багато. А тут ще ведучий намагається зав'язати дискусію, яка триває у неформальній обстановці за філіжанкою кави або чаю. А найкращі доповіді публікуються у збірнику наукових праць, що входить до переліку ВАК України. І майже завжди – усі, хто зустрівся та познайомився на «ЛЕОТЕСТІ», залишаються друзями на все життя. Всі вони є членами професійного неформального клубу, ім'я якому «ЛЕОТЕСТ».

Ось і черговий «ЛЕОТЕСТ» відбувся у Славську Львівської області з 16 по 21 лютого 2004 р. Цього разу семінар був присвячений проблемам електромагнітних та акустичних методів контролю. Організаторами семінару виступили Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Івано-Франківський національний університет нафти та газу, НВФ «Ультракон-Сервіс», НВФ «ЗОНД» та Центр «ЛЕОТЕСТ-МЕДІУМ» (організаційне бюро семінару).

В.М. Учанін, член правління УТ НКТД,  
голова Західного відділення УТ НКТД

### Українські дефектоскопісти провели конференцію в Туреччині

З 1 по 8 травня 2004 р. у м. Сіде (Туреччина) відбулася конференція «Сучасні аспекти організації неруйнівного контролю якості продукції на промисловому підприємстві». Організаторами конференції виступили Українське товариство НКТД, НВФ «Діагностичні прилади», НВФ «Ультракон», Український інформаційний центр «Наука. Техніка. Технологія».

Метою конференції було визначення найбільш ефективних шляхів розвитку послуг з неруйнівного контролю якості на промисловому підприємстві в сучасних умовах. Розроблено підходи до побудови служб неруйнівного контролю якості, по-новому розглянуто проблеми системи якості, ефективну стратегію її розвитку та оптимізації витрат на функціону-

вання та технічне переоснащення установок неруйнівного контролю.

У конференції взяли участь понад 60 фахівців. У науковій програмі конференції було представлено понад 20 доповідей. Найбільший інтерес викликали доповіді, присвячені проблемам інтегрованого акустичного контролю великогабаритних композитних виробів, особливостям НКТД в авіації і машинобудуванні, моніторингу напружено-деформованого стану нафтових резервуарів, неруйнівного контролю труб у процесі виробництва, підвищення інформативності неруйнівного контролю якості матеріалів і комплектуючих авіаційного обладнання. Цікава та плідна дискусія виникла з питань оснащення лабораторій, служб та секцій неруйнівного



контролю ультразвуковими дефектоскопами для ручного та автоматизованого контролю. Велика увага була приділена результатам досліджень і розробок зо вихрострумової і ультразвукової дефектоскопії, рентгеноскопії, вимірюванню твердості, які показали перспективність цих методів.

Звіти про діяльність компаній представили: ТОВ «Ультрасонік» (Київ), «Діагностичні прилади» (Київ), «Інтрон-Сет» (Донецьк), «Ультракон» (Київ).

За великий внесок в організацію конференції її учасники висловили особливу подяку Олександрові Миколайовичу Козіну.

### 7-а конференція та виставка «Неруйнівний контроль-2004»

З 18 по 21 травня 2004 р. у Києві в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України проходила 7-а науково-технічна конференція-виставка «Неруйнівний контроль-2004». Організаторами конференції виступили Асоціація «ОКО» спільно з Українським товариством неруйнівного контролю та технічної діагностики, Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Департаментом залізничного транспорту, Національною енергетичною компанією «Енергоатом» та низкою інших організацій.

У роботі конференції взяли участь відомі вчені та фахівці в галузі неруйнівного контр-

олю з понад 200 організацій та підприємств. На пленарному засіданні керівники та провідні фахівці низки організацій та підприємств представили свої розробки на виставкових стендах, а також керівники секцій конференції розповіли про програму майбутньої роботи. Основна робота конференції була продовжена в наступних секціях: НК на залізниці, НК в атомній енергетиці, НК в авіації, НК в нафтогазовій промисловості, НК в теплоенергетиці, метрологічне забезпечення засобів неруйнівного контролю. Одночасно з конференцією проходила виставка приладів, засобів і матеріалів для неруйнівного контролю виробів і конструкцій, в якій взяли участь близько 25 експонентів.



Організатор конференції-виставки – Асоціація «ОКО» – традиційно проводить цей захід у травні в період цвітіння каштанів, коли місто наповнюється неповторним весняним шармом. Також традиційно на те-

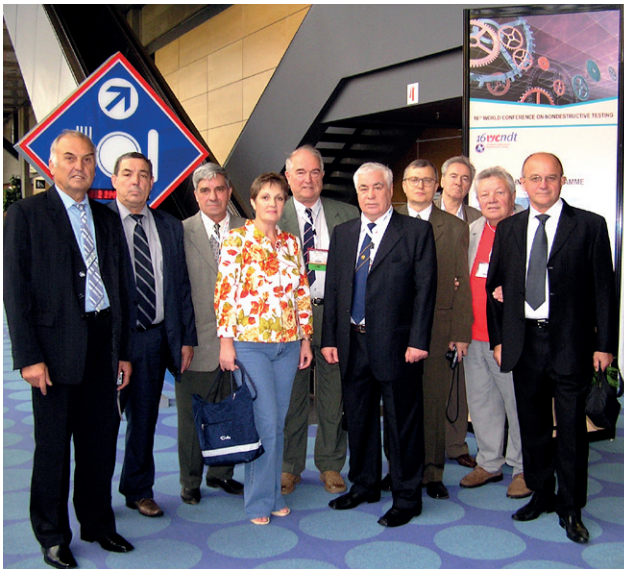
плоході «А. Довженко» був влаштований дружній прийом для учасників конференції-виставки «Неруйнівний контроль-2004», де фахівці з різних країн змогли відчути себе в спільній «країні неруйнівного контролю».

### Участь делегації УТ НКТД у 16-й Всесвітній конференції з НК в Монреалі

У період з 29 серпня по 5 вересня 2004 р. в Монреалі (Канада) відбулася Всесвітня конференція з неруйнівного контролю та технічної діагностики, організована Канадським товариством неруйнівного контролю та Міжнародним комітетом з неруйнівного контролю (ICNDT). ICNDT об'єднує 84 товариства НК з країн Європи, Азії та Америки. Як дійсному члену ICNDT, організатори надали Українському товариству НКТД інформаційний стенд, який викликав великий інте-

рес серед учасників конференції. Наш стенд відвідали представники багатьох країн. Тут були гості з Індії, Хорватії, США, Великобританії, Німеччини, Данії, Польщі, Канади та інших країн.

На конференції було зроблено близько 155 презентацій, а у виставці та зустрічах взяли участь приблизно 800 компаній. Наша делегація, яка перебувала в Монреалі протягом трьох днів, взяла участь у двох зустрічах і побувала на стендах основних фірм. Серед



зустрічей, на яких ми були присутні, варто відзначити роботу НКТД у робочій групі з питань застосування засобів НК для виявлення протипіхотних мін.

### Традиційна зустріч фахівців з НК на конференції в Ялті

З 20 по 24 вересня 2004 р. в Ялті проходила 12-а Міжнародна конференція та виставка «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики». Організаторами конференції були: Науково-освітній центр «Наука. Техніка. Технологія» (Київ) та НВП «Машинобудування» (Дніпропетровськ) за підтримки УТ НКТД та Дніпропетровського національного університету. Генеральний спонсор – НВФ «Діагностичні прилади» (Київ).

У роботі конференції взяли участь 204 фахівці, які представляли 47 промислових підприємств, 11 університетів, науково-дослідних інститутів і конструкторських бюро, 42 науково-виробничі фірми, 16 експертно-діагностичних центрів, а також громадські організації. На конференції було представлено 13 пленарних, 40 секційних і 43 постерні доповіді, авто-

Після конференції наша делегація вирушила до Торонто, де взяла участь у культурній програмі, яка включала відвідування Ніагарського водоспаду.

ри яких представили результати своїх досліджень і розробок з широкого спектру методів НК, діагностики та прогнозування залишкового ресурсу конструкцій; з оцінки фізико-механічних характеристик матеріалів і деяких інших напрямків, пов'язаних з НК і ТД.

Паралельно з конференцією було проведено виставку приладів і обладнання для НКТД, в якій взяли участь: НВП «Машинобудування», компанія «ІКС» (Київ), НТЦ «Діагностика та контроль» (Миколаїв), НВФ «Ультракон» (Київ), НВФ «Ультракон-Сервіс», компанія «Сперанца» (Жовті Води), НВФ «Діагностичні прилади» (Київ), ПП «ДП-Тест» (Київ), ПП «Арматор» (Дніпропетровськ), НВФ «Інтрон-Сет» (Донецьк), МЧТПП «ОНІКО» (Київ), ТОВ «Глобал Україна» (Київ) та інші.



## КНИГИ ТА УЧБОВІ ПОСІБНИКИ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ, ВИДАНІ В ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАНУ



### Короткий посібник з контролю якості зварних з'єднань

У посібнику описано методи неруйнівного контролю (НК) та їх класифікацію, викладено основні поняття та фізичні основи методів НК, наведено технічні характеристики основних видів обладнання для візуальної, ультразвукової, радіаційної, магнітної, капілярної дефектоскопії і контролю герметичності. Класифіковано основні типи дефектів зварних з'єднань, виконаних дуговими, контактними та іншими видами зварювання. Викладено питання статистичної обробки результатів контролю, управління якістю зварювання, стандарти на дефектність зварних з'єднань, 2006 р.



### Магнітопорошковий контроль зварних з'єднань та деталей машин

Розглянуто елементи теорії і практики магнітопорошкового контролю, походження різноманітних дефектів. Висвітлено питання технології контролю, вибору еталонів, підбору режимів намагнічування, організації робіт. Наведено приклади контролю різних металоконструкцій, трубопроводів і резервуарів, теплообмінних установок і деталей машин. Теоретичний розділ книги стосується всіх магнітних методів. Тут показані шляхи зменшення впливу фактора розмагнічування, ефективного намагнічування деталей складної геометрії. Розглянуто процеси перемагнічування деталей, 2002 р.



### Візуальний і вимірювальний контроль деталей машин, металоконструкцій, зварних з'єднань

Представлено основні вимоги та правила виконання візуально-вимірювального контролю зварних з'єднань і металоконструкцій. Описано основні технічні засоби, що застосовуються для цих цілей. Цей посібник є корисним для дефектоскопістів, які виконують візуально-вимірювальний контроль, а також абітурієнтів, які готуються отримати право на ведення цього виду неруйнівного контролю. ВВК є найпоширенішим методом НК. З нього починаються та закінчуються іспити з неруйнівного контролю та моніторингу всіх об'єктів, 2009 р.



### Вихрострумовий контроль

Розглянуто теоретичні та практичні питання вихрострумового контролю якості матеріалів і виробів. Для завдань діагностики елементів енергетичного, аерокосмічного та інших комплексів розглянуто методики виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів. Використано матеріали для підготовки дефектоскопістів відповідно до вимог українського (УТ НКТД) та американського (ASNT) товариств неруйнівного контролю за трьома рівнями кваліфікації згідно зі стандартами ISO 9712, SNT-TC-1A. Посібник може бути використаний навчальними та екзаменаційними центрами з НК, 2011 р.



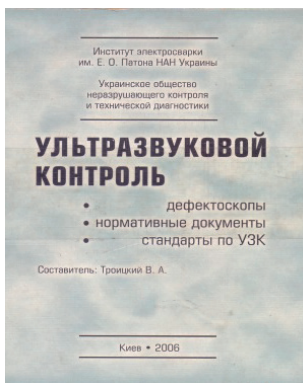
### Ультразвуковий контроль зварних з'єднань

Наведено елементарні уявлення про теорію та практику ультразвуково-го контролю зварних з'єднань для фахівців першого та другого рівнів кваліфікації відповідно до стандартів ISO 9712, SNT-TC-1A. Описано фізичні основи, прилади, еталони, технологічні прийоми, які використовуються у практиці УЗК. Наведено питання для підготовки до атестації фахівців. Книга може бути корисною інженерно-технічним працівникам, розробникам проєктної документації для відповідальних металоконструкцій, а також використана як навчальний посібник для дефектоскопістів-початківців, 2010 р.



### Посібник з радіографії зварних з'єднань

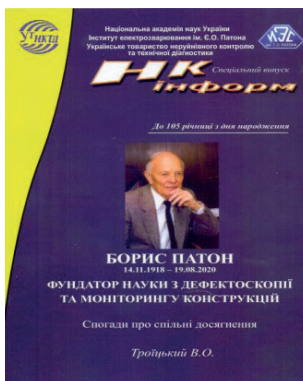
Представлено елементи теорії і практичні питання радіографічного контролю, походження різноманітних нерізкостей зображень. Висвітлено питання радіаційної техніки безпеки та технології радіаційної техніки безпеки, технології радіаційного контролю, вибору плівок, еталонів, підбору режимів просвічування, організації радіографічної лабораторії. Описано методи вимірювання координат дефектів, розшифрування радіограм, цифрової радіографії, класності зварних з'єднань і критерії їх бальної оцінки. Наведено приклади характерних радіограм, результати їх розшифрування, а також питання для самопідготовки, 2008 р.



### Ультразвуковий контроль: дефектоскопи, нормативні документи, стандарти з УЗК

Довідковий посібник, що містить порівняльний аналіз сучасних ультразвукових дефектоскопів, нормативні документи та стандарти з цього виду неруйнівного контролю якості. Призначений для інженерів, які займаються контролем якості, діагностикою енергетичного та іншого відповідального обладнання. Доповнює навчально-методичний матеріал, викладений у книзі В.О. Троїцького «Короткий посібник з контролю якості зварних з'єднань», третє видання, 2006 р.

### Борис Патон – фундатор науки з дефектоскопії і моніторингу конструкцій



27 листопада – день пам'яті Бориса Євгеновича Патона. Нещодавно вийшло друге видання Спогадів, присвячених цьому всесвітньо відомому українському вченому, академіку, президенту Національної академії наук України, директору Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Борис Євгенович став фундатором нового наукового напрямку науки – технічна діагностика та неруйнівний контроль. Він організував науковий відділ, який проводить роботи з усіх методів НК, автоматизації, розробки обладнання та стандартизації, 2023 р.

### Моніторинг стану конструкцій. Введення в професію.



120 навчально-методичних плакатів та методик з неруйнівного контролю. Видання присвячене основним роботам і діяльності відділу неруйнівного контролю Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона в галузі неруйнівного контролю. Описано елементарні основи неруйнівного контролю якості, а також 120 промислових технологій НК зварних з'єднань металоконструкцій, що є основою моніторингу стану газо- та нафтопроводів, посудин під тиском, виробів залізничного транспорту, продукції машинобудування та ін. Книга буде корисною як дефектоскопістам-початківцям, так і досвідченим спеціалістам, а також учбовим центрам з НК, 2022 р.

### Неруйнівний контроль в Україні



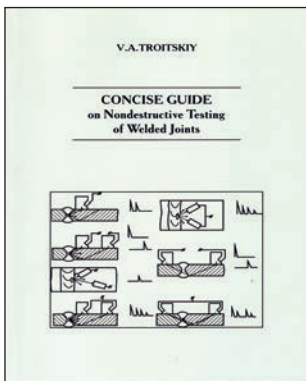
У довіднику наведено відомості про організації України, які пов'язані з використанням фізичних методів НК (акустичних, радіаційних, електромагнітних, проникаючих речовин та ін.) для оцінки якості матеріалів і відповідальних споруд, про підприємства, що виготовляють і постачають прилади, матеріали та обладнання для дефектоскопії і технічної діагностики, а також здійснюють підготовку до сертифікації спеціалістів з НК, стандартизацію та метрологію у сфері НК. У довіднику викладено інформацію про Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики, підсумки професійних конкурсів, наукових конференцій, практичних семінарів та інших заходів з НК в Україні, 2012 р.

### Технологія та обладнання неруйнівного контролю якості



Усі сучасні досягнення в сфері матеріалознавства, напівпровідникової техніки, в оптиці, комп'ютерних технологіях та інших галузях науки надають нових можливостей для здійснення НК. Поняття «неруйнівний контроль» містить в собі всі види механічних, хімічних, електромагнітних, оптичних, акустичних, радіаційних, та ін. видів випробувань без руйнувань об'єкту. Існують найбільш поширені види контролю: візуально-вимірювальний, магнітний, ультразвуковий, радіаційний, капілярний, вихрострумний, тепловий, вібраційний, методи контролю герметичності, напруженого стану, твердості, спектрального аналізу, металографія та ін. Кожен з видів НК має варіанти, які вирізняються за характером прийому інформації, типами датчиків та іншим ознаками, 2021 р.

### Concise Guide on Nondestructive Testing of Welded Joints



У посібнику з неруйнівного контролю зварних з'єднань (англійською мовою) описано основні методи НК та їх класифікацію, викладено основні поняття та фізичні основи, наведено технічні характеристики основних видів обладнання та допоміжних засобів для візуальної, ультразвукової, радіаційної, магнітної, капілярної дефектоскопії і контролю герметичності. Класифіковано основні типи дефектів зварних з'єднань, виконаних дуговими, контактними та іншими видами зварювання. Викладено питання статистичної обробки результатів контролю, управління якістю зварювання, приклади відомчих норм на дефектність зварних з'єднань, 2012 р.





### Дефектоскопія XXI століття

Це незвичайне видання містить збірку статей щодо основних напрямів робіт відділу неруйнівного контролю якості ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ з розвитку технологій неруйнівного контролю зварних з'єднань. Автори видання впевнені, що нові цифрові методи обробки інформації візуального, радіаційного, ультразвукового, магнітного та інших методів НК знайдуть своє застосування в промисловості за участі наших читачів. Ера цифрових технологій крокує по планеті. Цифрова обробка інформації розширює можливості дефектоскопії, 2018 р.



### Епізоди життя та творчості, перспективи розвитку зварювальної техніки та дефектоскопії

Мемуари, присвячені становленню та розвитку в Україні дефектоскопії, регульованих джерел живлення для різних технологічних процесів. Описано креативні електротехнічні та дефектоскопічні ідеї, розробка та реалізація яких підвищать якість зварних з'єднань. Освітлено діяльність УТ НКТД і створення Міжнародної Академії ANDTI, діяльність Європейської Федерації EFNDT і Всесвітніх комітетів ICNDT та ISO TC-135. Книга цікава дефектоскопістам, електротехнікам, аспірантам і викладачам, спеціалістам з історіографії зварювальної та дефектоскопічної техніки, 2020 р.



### Моніторинг труб магістральних та промислових трубопроводів

В Європі протяжність газопроводів складає більш ніж 200 тис. км, є близько 400 компресорних і 500 газорозподільних станцій. Протяжність інших трубопроводів на декілька порядків більша. Тому важливо знати специфічні методи та технології моніторингу трубопроводів. Це видання є збіркою методів моніторингу трубопроводів, що важливо як для мирного, так і для воєнного часу, 2024 р.

## КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ ТА ВИСТАВОК З НКТД

04–07 лютого 2025	Бельгія, Антверпен	14 <sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2025 (14-а Конференція з промислової комп'ютерної томографії)	University of Antwerpen
27–28 лютого 2025	Сінгапур	5 <sup>th</sup> Singapore International NDT Conference & Exhibition (5-а Сінгапурська міжнародна конференція та виставка)	NDT Society of Singapore
03–06 березня 2025	Індія, Бангалор	3 <sup>rd</sup> International Conference on NDE 4.0 (3-я Міжнародна конференція з NDE 4.0)	Indian Society for NDT
11–12 березня 2025	Австрія, Лінц	EFNDT Seminar NDT in Railway 2025 (Семінар EFNDT «НК для залізниці»)	German Society for NDT
09–12 червня 2025	Канада, Онтаріо	Pan-American Conference for Nondestructive Testing (VIII PANNDT) (Панамериканська конференція з неруйнівного контролю)	Canadian Institute for NDE
09–12 червня 2025	Болгарія, Созополь	International Conference NDT Days 2025 (Міжнародна конференція з НК «NDT Days 2025»)	Bulgarian Society for NDT
01–03 липня 2025	Франція, Париж	10 <sup>th</sup> International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography	France Society of NDT
26–28 серпня 2025	Єгипет, Каїр	NDT Corner Expo (Виставка і конференція з НК)	NDT Corner Online Platfom
24–26 вересня 2025	Туреччина, Ізмір	The International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering NDT-CE 2025 (Міжнародний симпозиум з НК в цивільному будівництві)	EGE University
06–09 жовтня 2025	США, Орlando	ASNT 2025 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
11–14 травня 2026	США, Гаваї	17 <sup>th</sup> Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (17-а Азійсько-Тихоокеанська конференція з неруйнівного контролю)	American Society for NDT
15–19 червня 2026	Італія, Верона	The 14 <sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing (14 <sup>th</sup> ECNDT) (14-а Європейська конференція з НК)	Italian Society for NDT



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

## ЗАПРОШУЮТЬ СПЕЦІАЛІСТІВ

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

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

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

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

### в 12 виробничих секторах:

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

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

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

### Три кроки до сертифікату:

1. На сайті [www.usndt.com.ua](http://www.usndt.com.ua) в розділі «Сертифікація→Форми» знайдіть, заповніть і надішліть на e-mail: [usndt@ukr.net](mailto:usndt@ukr.net) і [acnk@ukr.net](mailto: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](mailto:usndt@ukr.net), [acnk@ukr.net](mailto:acnk@ukr.net)