

**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);

В.П. Бабак (заст. гол. ред.)

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.Л. Казакевич

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

О.М. Карпаш

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 11.09.2025,

ідентифікатор медіа R30-06489;

реєстрант – ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

**Передплата 2026**

Передплатний індекс 74475. 4 випуски на рік (видається

щоквартально). Друкована версія/електронна версія:

1680 грн. за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів видавець журналу

відповідальності не несе.

**ЗМІСТ**

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ**

*Клейман Я.* Система UltraMARS для неруйнівного вимірювання залишкових напружень: нові розробки.....3

*Учанін В.М.* Методологія використання стандартних зразків з дефектами для вихрострумовеого контролю: класифікація, характерні приклади, дослідження сигналів та статистичний метод оцінювання параметрів ....10

*Недосека С.А., Яременко М.А., Овсієнко М.А., Долиненко В.В., Гур'янов О.М.* Щодо оцінки якості зварних з'єднань із використанням методу АЕ .....25

**ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ**

*Рибіцький І.В., Карпаш О.М., Войтенко С.С., Карпаш М.О., Райтер П.М., Яворський А.В., Ващишак І.Р.* Удосконалення методу контролю якості природного газу .....30

*Казакевич М.Л., Казакевич В.М., Семенець О.І., Денишенко О.В., Слободенюк П.О.* Розробка матеріалів і технології експрес-діагностики пошкоджень конструкцій літальних апаратів внаслідок ударів.....38

*Якотюк В.С., Глабець С.М., Лисенко Ю.Ю., Момот А.С.* Практичний досвід застосування та аналіз ефективності різних магнітних суспензій .....44

**ІНФОРМАЦІЯ**

Міжнародна виставка «НАФТОГАЗЕКСПО 2025» .....49

Науково-технічна конференція «Зварювання та споріднені технології для відновлення України» .....51

Новини Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики .....53

Видання журналу підтримують:

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

**EDITORIAL BOARD**

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv:  
L.M. LOBANOV (Editor-in-Chief),  
V.O. Troitskyi (Deputy Editor-in-Chief),  
Ie.O. Davydov, O.S. Milenin, S.A. Nedoseka, Yu.M. Posypaiko,  
I.Yu. Romanova (execut. secretary);  
V.P. Babak (Deputy Editor-in-Chief)

General Energy Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv  
Krzysztof Dragan,  
Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland;  
Janez Grum,  
University of Ljubljana, Slovenia;  
M.L. Kazakevich,  
L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of the 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 the 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 11.09.2025, carrier identifier R30-06489;  
registrant – E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU.

**Subscription 2026**

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**

- Kleiman J.* UltraMARS system for non-destructive measurement of residual stresses: new developments ..... 3
- Uchanin V.N.* Methodology of using standard specimens with defects for eddy current inspection: classification, typical examples, signals research and statistical method for parameters assessment..... 10
- Nedosieka S.A., Yaremenko M.A., Ovsienko M.A., Dolynenko V.V., Hurianov O.M.* Assessment of the quality of welded joints using the ae method ..... 25

**INDUSTRIAL**

- Rybitsky I.V., Karpash M.O., Voitenko S.S., Karpash O.M., Raiter P.M., Yavorskyi A.V., Vashchysyak I.R.* Improvement of natural gas quality controlling method..... 30
- Kazakevych M.L., Kazakevych V.M., Semenets O.I., Denyshchenko O.V., Slobodenyuk P.O.* Development of materials and technologies for express diagnostics of damage to aircraft structures due to impacts ..... 38

- Yakotyuk V.S., Glabets S.M., Lysenko Yu.Yu., Momot A.S.* Practical experience of application and analysis of the effectiveness of various magnetic suspensions ..... 44

**INFORMATION**

- International exhibition «NAFTOGAZEXPO 2025» ..... 49
- Scientific and technical conference «Welding and related technologies for the reconstruction of Ukraine» ..... 51
- News of the Ukrainian society for non-destructive testing ..... 53

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

# СИСТЕМА UltraMARS ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО ВИМІРЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ: НОВІ РОЗРОБКИ

Я. Клейман

Structural Integrity Technologies, Inc. (Sintec). 80 Есна Парк Драйв, Маркхам, Онтаріо, Канада.  
E-mail: [jkleiman@itlinc.com](mailto:jkleiman@itlinc.com)

Одним із ефективних методів неруйнівного контролю залишкових і експлуатаційних напружень є акустичний метод, який базується на поширенні пружних ультразвукових коливань всередині твердого тіла. Переносний комплекс для вимірювання діючих і залишкових напружень у твердих матеріалах із використанням акустичного неруйнівного методу контролю напружень у твердих матеріалах був розроблений на початку 2000 р. командами науковців Integrity Testing Laboratory, Sintec та Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. На основі раннього прототипу розроблено вдосконалений комплекс UltraMARS, який дозволяє вимірювати величину та знак діючих і залишкових напружень у лабораторних і польових умовах, як усереднених по товщині, так і в поверхневих і приповерхневих шарах, а також контролювати напруження в металевих елементах конструкцій під час їх виготовлення, ремонту та експлуатації. Комплекс ефективний для оцінки якості зварних з'єднань у результаті післязварювальної обробки, проведеної з метою перерозподілу залишкових напружень, та успішно використовується в морській, аерокосмічній, будівельній та інших галузях промисловості. Чотириполюсний перетворювач був розроблений для покращення експлуатаційних характеристик комплексу UltraMARS під час моніторингу напружень на поверхні та в приповерхневих шарах матеріалу. Він відрізняється від використовуваних двополюсних перетворювачів поверхневих хвиль (Surface-Rayleigh Wave – Transducer RF12) і підповерхневих хвиль (Subsurface – Transducer SF12) тим, що має дві пари передавач–приймач, розташованих під кутом 90° одна до одної. Ця зміна дозволила вимірювати швидкість ультразвукових хвиль одночасно в обох ортогональних напрямках без повороту передавача–приймача на 90°. Для використання цих перетворювачів з комплексом UltraMARS було розроблено програму перемикання передавача–приймача. Також розроблено перетворювач зі змінною міжполюсною відстанню для вимірювання залишкових напружень у приповерхневих шарах матеріалів, що дозволяє визначати одновісні наведені напруження на глибину від 0 до 8...10 мм шляхом зміни базової відстані між випромінювачем і приймачем. На даний момент методика контролю напружень знаходиться в стадії розробки. Бібліогр. 22, рис. 10.

*Ключові слова:* залишкові напруження, неруйнівний ультразвуковий контроль залишкових напружень, UltraMARS, перетворювач зі змінною базою, чотириполюсний перетворювач

**Вступ.** Залишкові напруження (ЗН) відіграють дуже важливу роль у цілісності елементів конструкцій, оскільки вони можуть суттєво змінювати механічні властивості матеріалів і, таким чином, впливати на втомну довговічність, деформацію, стабільність розмірів, корозійну стійкість тощо. Вимірювання робочих (діючих) напружень і ЗН стає першочерговим завданням у багатьох галузях промисловості [1–3].

В останні кілька десятиліть все більше досліджень було проведено щодо використання ультразвуку для вимірювання ЗН у матеріалах різноманітних конструкцій та для вимірювання пружно-акустичних констант матеріалів. Численні приклади вимірювань напружень в об'ємних (середніх по товщині) і поверхневих шарах (середніх по товщині) показали, що ультразвукові методи можуть бути використані для неруйнної оцінки напружень у різних матеріалах, будучи особливо придатними для вимірювання профілів напружень та оцінки розподілу напружень в одній і тій же точці після різних умов обробки [4–9].

Я. Клейман – <https://orcid.org/0000-0003-1011-7504>  
© Я. Клейман, 2025

За останні роки ми досягли значного прогресу в модернізації комплексу UltraMARS, що дає можливість вимірювати робочі та залишкові напруження не тільки в об'ємі (середні по товщині), але й в поверхневих і приповерхневих шарах матеріалів. Використовуючи метод визначення напружень, розроблений Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) [5], ми спроектували апаратну частину та розробили програмне забезпечення, що дозволяє вимірювати всі три типи відбитих ультразвукових сигналів в одній точці неруйнівним методом [6, 10].

У загальному випадку зміна швидкості ультразвукової хвилі в матеріалах під дією напружень становить лише десяті частки відсотка. Тому обладнання для практичного застосування ультразвукового методу для вимірювання ЗН повинно мати високу роздільну здатність і бути повністю комп'ютеризованим. Розроблений комплекс UltraMARS (рис. 1) включає в себе: вимірювальний блок; попередній підсилювач для збудження та прийому відбитих ультразвукових сигналів (REW) перед надсиланням їх у вимірювальний блок для

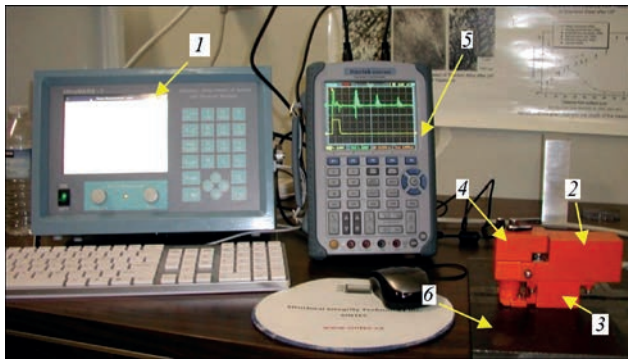


Рис. 1. Ультразвуковий комп'ютеризований комплекс для вимірювання залишкових і прикладених напружень: 1 – вимірювальний блок з програмним забезпеченням; 2 – попередній підсилювач (компонент REW); 3 – магнітний тримач; 4 – перетворювач; 5 – осцилограф (20 МГц); 6 – зразок

подальшої обробки; тримач перетворювача, який може бути як магнітним або електромагнітним, так і механічним; набір змінних ультразвукових перетворювачів, які використовуються для збудження та прийому поздовжніх (XF3) і поперечних (YF12) хвиль, а також для збудження та прийому поверхневих (RF12) і підповерхневих (SF12) хвиль. Осцилограф зазвичай використовується для візуального контролю отриманих відбитих сигналів. Як правило, осцилограф потрібен для вибору та налаштування на відбиту форму сигналу при використанні ручного методу.

Розроблений комплекс UltraMARS дозволяє визначати одно- та двовісні робочі (прикладені) та залишкові напруження в різних матеріалах і конструкціях. У цій статті буде зроблено огляд останніх досягнень у розробці та застосуванні неруйнівного ультразвукового методу вимірювання ЗН у матеріалах і конструкціях, наведено приклади вимірювання напружень у різних матеріалах і конструкціях, а також представлено нові перетворювачі, які знаходяться на різних стадіях розробки, а саме: чотириполюсний перетворювач і перетворювач зі змінною базою для вимірювання напружень на різній глибині в матеріалах.

**Вимірювання залишкових напружень ультразвуковим методом.** Вимірювання ЗН за допомогою ультразвуку базуються на ґрунтовній теорії [11–13] та оригінальній методиці із використанням прецизійних приладів [5, 10, 12]. Можна використовувати ультразвук для вимірювання напружень у матеріалах, оскільки, згідно з акустико-пружною теорією взаємодії ультразвуку з матеріалами, зміна швидкості (або частоти) ультразвуку в матеріалі лінійно залежить від напружень в матеріалах у певному діапазоні напружень (рис. 2). Інтенсивність і характер таких змін можуть варіюватися в залежності від фізичних і механічних властивостей матеріалу. При відомих

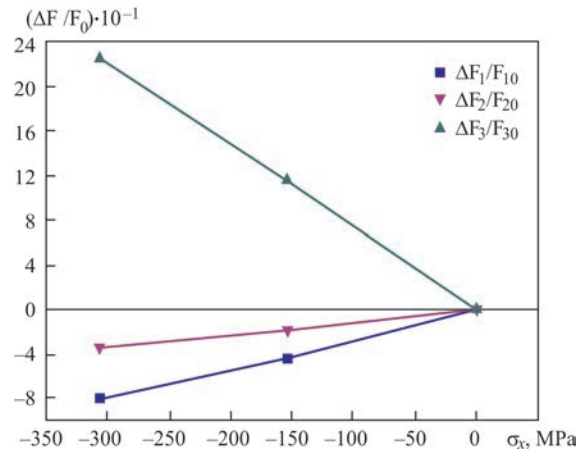


Рис. 2. Зміна швидкостей ультразвукових хвиль у зразку матеріалу під дією прикладених напружень

акустико-пружних властивостях матеріалу визначення напружень зводиться до вимірювання швидкостей (пропорційних частоті) поздовжніх і поперечних хвиль, коли вони поширюються в основних напрямках дії напружень. Акустико-пружні властивості матеріалу входять у рівняння, що пов'язують швидкості поширення ультразвукових хвиль з напруженнями в матеріалі у вигляді коефіцієнтів пропорційності. Вони визначаються константами пружності другого та третього порядків і можуть бути розраховані або виміряні [13, 18, 19].

Для визначення констант пружності використовують контрольні зразки, в яких при одновісному або двовісному навантаженні вимірюється зміна швидкості поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль і проводиться розрахунок акустико-пружних коефіцієнтів на основі цих вимірювань.

Ці вимірювання виконує комплекс UltraMARS, а обчислені значення акустико-пружних коефіцієнтів зберігаються в пам'яті для подальшого розрахунку напружень [3 і посилання на нього]. Похибка вимірювання робочих напружень у пружній області становить ~15 МПа, а для залишкових напружень – ± 0,1σ<sub>r</sub>, де σ<sub>r</sub> – границя міцності матеріалу на розтяг.

Рис. 3–5 наведено як приклади типи інформації про залишкові напруження, які можна отримати за допомогою системи UltraMARS із різними перетворювачами. Зразок, зварений встик (рис. 3), розміром 200×150 мм і завтовшки 12 мм, використовувався для вимірювання ЗН. Розподіл поздовжніх і поперечних ЗН (відповідно паралельних і перпендикулярних до напрямку зварного шва) були виміряні вздовж *Ліній 1* і *2* (рис. 3). Напруження вимірювали починаючи з точки 1 (як позначено на рис. 3) і просуваючись до точки, позначеної як N. Вимірювана точка 1 на *Лінії 1* була розташована на відстані ~ 3 мм від зони сплавлення. Усі вимірювання вздовж *Лінії 2* проводилися на відстані

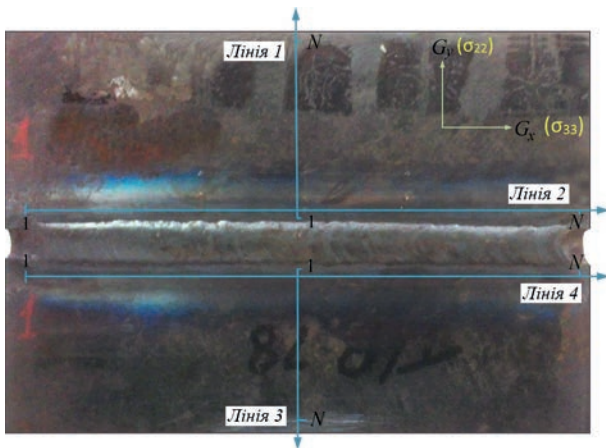


Рис. 3. Зварений зразок (низьковуглецева сталь) з позначеними Лініями 1–4, що вказують на місця проведення вимірювань УЗД

~5 мм від зони сплавлення. Для вимірювання ЗН максимально близько або в самому зварному шві необхідна спеціальна підготовка поверхні зварного шва, яка може передбачати видалення зварного шва або зняття зварювального підсилення.

На рис. 4 представлені результати вимірювання середніх наскрізних ЗН по товщині вздовж Ліній 1 і 2, отримані за допомогою об’ємних перетворювачів. У всіх випадках вимірювалися дві складові ЗН,

$\sigma_{22}$  і  $\sigma_{33}$  (позначені на рисунках як  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  відповідно). У технічній літературі використовуються різні символи для позначення розподілу ЗН і швидкості поширення ультразвукових хвиль [13, 18, 19]. Серед найпоширеніших можна назвати наступні:

- символ  $\sigma_{33}$  (або  $\sigma_x$ ) – позначає головне поздовжнє напруження, яке діє вздовж прикладання зовнішньої сили або вздовж зварного шва (див. рис. 3 і 4);
- символ  $\sigma_{22}$  (або  $\sigma_y$ ) – позначає головне поперечне напруження, яке діє перпендикулярно до прикладеної зовнішньої сили або в напрямку зовнішнього зусилля, або в напрямку, перпендикулярному до зварного шва (див. рис. 3 і 4);
- символ F3 (або F1) – позначає частоту (швидкість поширення  $V_{sx3}$ ) відбитої (знизу) зсувної ультразвукової хвилі, що збуджується та приймається назад Y-подібним п’єзоперетворювачем. Вектор поляризації п’єзоелектричного перетворювача спрямований вздовж дії напруги  $\sigma_{33}$  ( $\sigma_x$ ), а площа, в якій коливаються частинки в елементі, спрямована перпендикулярно до поширення хвилі (вздовж товщини матеріалу);
- символ F2 – позначає частоту (швидкість поширення швидкість поширення  $V_{sx2}$ ) відбитої (донної)

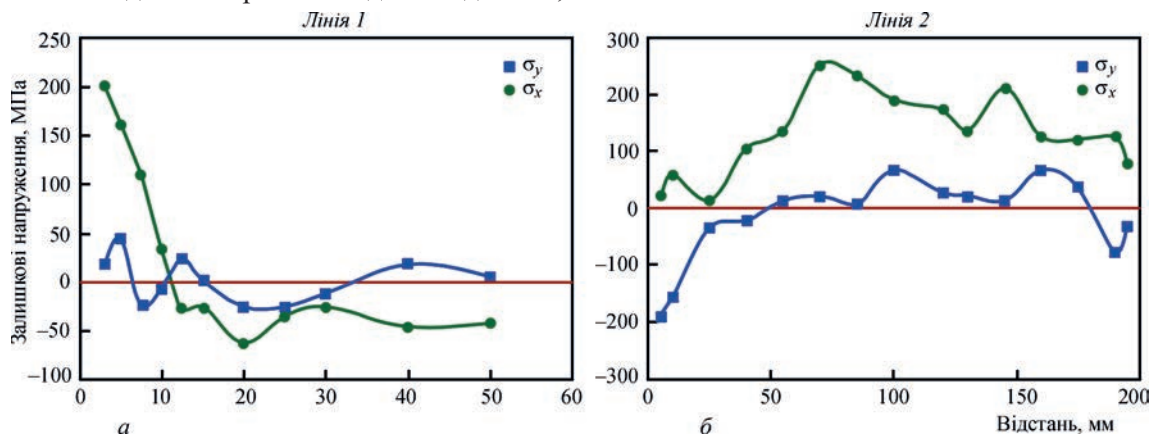


Рис. 4. Розподіл середніх наскрізних по товщині (об’ємні ультразвукові хвилі) залишкових напружень у зразку вздовж Лінії 1 (а) (нормаль до напрямку зварного шва) та вздовж Лінії 2 (б) (вздовж напрямку зварного шва)

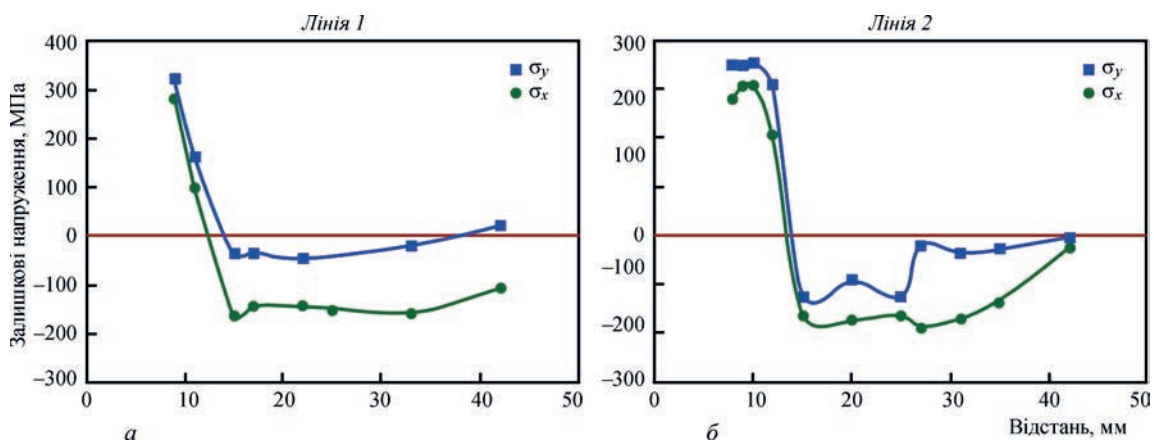


Рис. 5. Розподіл поверхневих залишкових напружень у зразку, виміряних вздовж Лінії 1 за допомогою поверхневого (а) та підповерхневого (б) ультразвукових хвильових перетворювачів (в обох випадках вимірювалися напруження, нормальні до напрямку зварного шва)

зсувної ультразвукової хвилі. Вектор поляризації п'єзоелектричного перетворювача спрямований вздовж дії напруження  $\sigma_{22}$  (або  $\sigma_y$ ) або перпендикулярно до дії напруження  $\sigma_{33}$  (або  $\sigma_x$ ), а площина, в якій коливаються частинки в елементі, спрямована перпендикулярно до поширення хвилі (вздовж товщини матеріалу);

- символ F1 (або F3) – частота (швидкість поширення  $V_{\text{хв}}$ ) відбитої (донної) поздовжньої ультразвукової хвилі, збудженої і прийнятої Х-подібним п'єзоперетворювачем. Вектор поляризації п'єзоперетворювача може бути під будь-яким кутом до напрямку напруження  $\sigma_{33}$  (або  $\sigma_x$ ), а частинки в елементі коливаються у напрямку поширення хвилі (вздовж товщини матеріалу).

На рис. 5 показано розподіл поверхневих (а) і підповерхневих (б) ЗН у зразку, виміряних вздовж Лінії 1 за допомогою поверхневого (RF12) та підповерхневого (SF12) ультразвукових хвильових перетворювачів (в обох випадках вимірювалися напруження, нормальні до напрямку зварного шва). Використання поверхневого ультразвукового перетворювача дозволяє вимірювати ЗН у поверхневих шарах матеріалу, причому глибина проникнення для цього застосування становить  $\sim 0,7$  мм (визначено експериментально). Використовуючи підповерхневі перетворювачі, можна вимірювати напруження до глибини  $\sim 6$  мм. Для цього був обраний стандартний перетворювач  $9 \times 4$  мм.

Аналіз отриманих ЗН профілів показав, що результати ультразвукових ЗН у зразку відповідають існуючим уявленням про розподіл УЗК у зварних елементах і конструкціях [14, 15]. При дослідженні ЗН у великомасштабній зварній панелі, призначеній для моделювання конструктивних елементів судна, виявлено гарний збіг між виміряними напруженнями та розрахунками з використанням методом FEA [16, 17].

Нещодавно комплекс UltraMARS був модифікований і доопрацьований, у тому числі впроваджено низку нових технічних рішень, що робить роботу комплексу стабільнішою та зручнішою для користувача. Символи, що позначають основні напруження та частоти, були замінені. Таким чином,  $\sigma_1$  визначає вектор головного напруження, що діє вздовж прикладеної сили до конструкції або зварного шва;  $\sigma_2$  визначає вектор головного напруження, що діє перпендикулярно до сили, прикладеної до конструкції або зварного шва. Символи позначення частот також були також змінено, прив'язавши їх до нових символів напружень. Використання нових електронних елементів дозволило покращити налаштування на хвилю в автоматичному режи-

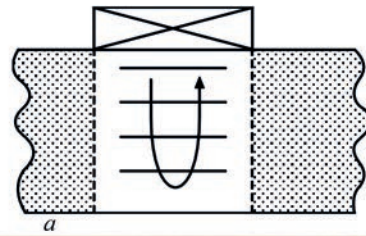


Рис. 6. Принцип вимірювання середніх наскрізних по товщині (об'ємних) напружень (ехо-імпульсних) і перетворювачі для вимірювання поздовжньої та поперечної складових середніх наскрізних товщинних (об'ємних) напружень мі та підвищити точність ідентифікації прийнятих відбитих сигналів. Також були внесені зміни в розрахунки напружень при використанні поверхневих і підповерхневих хвильових перетворювачів.

**Ультразвукові перетворювачі.** У даний час вимірювання середніх наскрізних по товщині поздовжніх і поперечних ЗН у зразку виконуються (паралельно та перпендикулярно до напрямку зварювання відповідно) у кожній точці двома типами ультразвукових перетворювачів (рис. 6). Щоб збуджувати об'ємні ультразвукові хвилі, використовувалися кварцові п'єзоелектричні пластини з поляризацією векторного Y-розрізу (розрізані вздовж оптичної осі Y) і X-розрізу (вирізані вздовж оптичної осі X) з резонансною частотою 5 МГц. Це оптимальна частота коливань кварцу, на якій механічні ультразвукові коливання реагують на зміни в кристалах матеріалу від напружень і не затухають при відбитті від нижньої поверхні зразка. П'єзоелектричні пластини PZT з резонансною частотою 4 МГц використовуються для збудження та прийому релеївської поверхневої ультразвукової хвилі (рис. 7, а-д). Пластини приклеєні до демпфера, виготовленого з твердого поліамідного матеріалу з хорошою зносостійкістю [20, 21]. Кути розвалу випромінювача та приймача для поверхневої хвилі становлять  $70^\circ$  [20–22]. Демпфер з наклеєними п'єзокерамічними пластинами захищений металевим ковпаком.

Для збудження та прийому в приповерхневих шарах матеріалу використовуються п'єзоелектричні пластини PZT з резонансною частотою 4 МГц. Пластини наклеєні на демпфер з випромінювачем і приймачем кутами клину  $29^\circ$  (рис. 7, в-е) [20–22], що дозволяє отримати максимальну амплі-

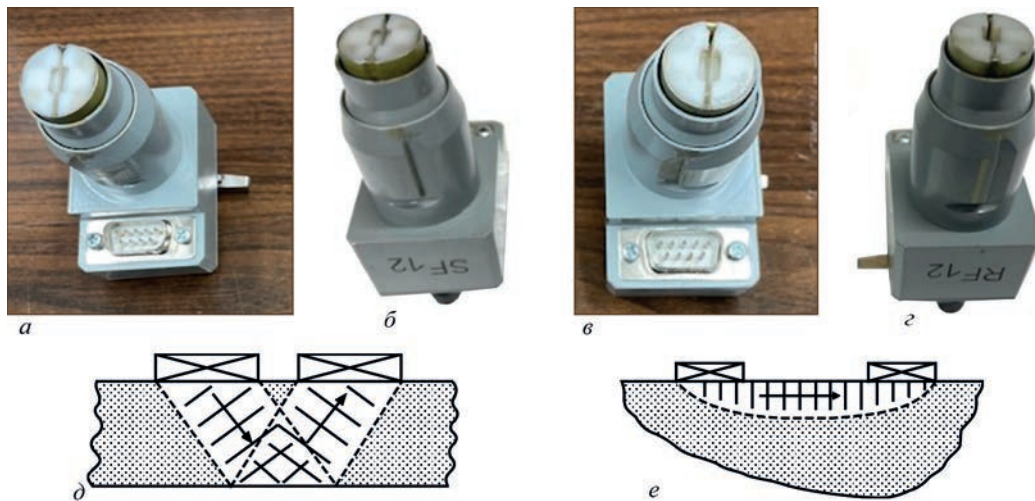


Рис. 7. Принцип вимірювання підповерхневих (а–д) і поверхневих (е–е) напружень (pitch-catch) та перетворювачі для вимірювання двох поперечних компонент напружень

літуду прийнятих ультразвукових хвиль для різних металів. Демпфер з наклеєними п'єзокерамічними пластинами захищений металевим ковпачком.

Для спрощення вимірювань поверхневих і підповерхневих напружень були розроблені чотириполюсні перетворювачі, які, на відміну від двополюсних, дозволяють вимірювання в двох напрямках без повороту головки перетворювача на 90°. Демпфери перетворювача виготовлені шляхом фрезерування із твердого поліамідного блоку, який має хорошу стійкість до стирання. Пластини PZT з резонансною частотою 4 МГц були прикріплені до передавачів і приймачів. Призми передавача та приймача для поверхневої хвилі мають кут 70°, а для підповерхневої – 29°, що дозволяє отримати максимальну амплітуду прийнятих хвиль для різних металів. Передавач і приймач розміщуються один навпроти одного на постійній базовій відстані. Другий комплект передавача–приймача розміщується під кутом 90° до першого. Для зменшення перешкод між передавачем і приймачем у корпусі демпфера зроблено квадратне заглиблення, яке не допускає впливу передавача на приймач. Корпус клапана з п'єзокерамічними пластинами захище-

ний металевим ковпачком. Весь демпфер у зборі вставляється в корпус перетворювача (рис. 8). Для проведення вимірювання чотириполюсний перетворювач вставляється в REW (поз. 3 на рис. 1) приладу UltraMARS-8.

Для перевірки глибини проникнення ультразвукових хвиль для двополюсного та чотириполюсного перетворювачів були виготовлені пластини із різних металів з вирізаними в них канавками. Глибину канавки робили зі зростаючим нахилом у кілька градусів, а до пластини була прикріплена лінійка, яка показувала зміну глибини канавки з відстанню, починаючи з 0 мм і далі, до досягнення товщини металу (рис. 9).

Наразі проводиться дослідження з метою оцінки глибини проникнення поверхневих (RW) і підповерхневих (SW) хвиль у двополюсних і чотириполюсних перетворювачах у сталевих і алюмінієвих пластинах, підготовлених, як описано вище, зі збільшенням нахилу щілин.

Нещодавно було розроблено перетворювач зі змінною базою між випромінювачем і приймачем. На рис. 10 показано розроблений перетворювач зі



Рис. 8. Чотириполюсні перетворювачі для вимірювання поверхневих і підповерхневих напружень

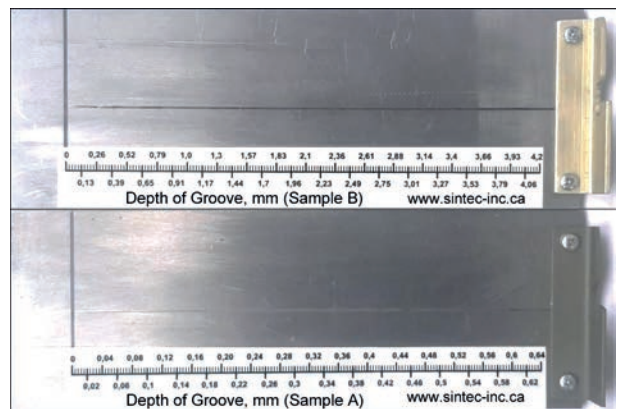


Рис. 9. Пластини із вирізаною щілиною для оцінки глибини поширення ультразвукової хвилі в матеріалах. До пластин прикріплені лінійки з позначеною глибиною щілини



Рис. 10. LCR-перетворювачі зі змінною базою за ручної (а) та механізованої (б) зміни відстані між випромінювачем і приймачем (вид зверху)

змінною базою, який випромінює та приймає поздовжні критично заломлені (LCR) хвилі. У цьому перетворювачі приймач і передавач можуть переміщатися один відносно одного. Відстань між ними (базу) можна змінювати або вручну, повертаючи ручку на бічній стороні перетворювача (рис. 10, а), або за командою з системи UltraMARS (рис. 10, б). Наразі ведеться робота з розробки програм для збору та обробки даних напружень і керування рухом випромінювача та приймача в перетворювачі. Перетворювач кріпиться до зразка за допомогою постійних магнітів, що забезпечує хороший контакт між перетворювачем і зразком. Мастило для з'єднання використовується для забезпечення ефективної передачі сигналу від кристалів PZT до зразка. У цій конструкції базова відстань між передавачем і приймачем варіюється від 10 до 50 мм.

Змінюючи базову відстань, можна змінювати глибину поширення хвилі LCR, що дозволяє досліджувати різні шари зразка. Кут між передавачем і приймачем було обрано на рівні  $29^\circ$  [20–22], виходячи з максимальної амплітуди прийнятого сигналу для різних металів. Розроблені прототипи наразі проходять різноманітні випробування, результати яких будуть опубліковані пізніше.

## Висновки

На вибраних прикладах було показано, що акустичний метод, який базується на поширенні пружних ультразвукових коливань всередині твердого тіла, може бути ефективно використаний для неруйнівного контролю залишкових напружень у матеріалах. Комплекс UltraMARS був

розроблений і нещодавно модернізований для вимірювання величини та знаку робочих і залишкових напружень, як усереднених по товщині, так і в поверхневих або підповерхневих шарах матеріалів, у лабораторних і польових умовах. Розроблена технологія дозволяє контролювати напруження в металевих елементах конструкцій під час їх виготовлення, ремонту та експлуатації. Вона є також ефективною для оцінки якості зварних з'єднань, після післязварювальних обробок, проведених з метою перерозподілу залишкових напружень.

Чотириполюсний перетворювач був розроблений з метою покращення експлуатаційних характеристик комплексу UltraMARS при контролі напружень на поверхні та в приповерхневих шарах матеріалу, що дозволяє вимірювати швидкість ультразвукових хвиль одночасно в обох ортогональних напрямках без обертання передавача–приймача в перетворювачі на  $90^\circ$ .

Розроблено та виготовлено перетворювач зі змінною базою, який дозволяє вимірювати одновісні наведені залишкові напруження в приповерхневих шарах матеріалів на глибину до  $\sim 10$  мм шляхом зміни базової відстані між випромінювачем і приймачем.

Наразі триває робота із всебічної оцінки нових перетворювачів і розробки методики контролю напружень для перетворювача зі змінною базою.

## Список літератури/References

1. Kleiman, J., Kudryavtsev, Y. (2012) Residual stress management in welding: residual stress measurement and improvement treatments. In: *Proc. of ASME 2012 31<sup>st</sup> Inter. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 6: *Materials Technology; Polar and Arctic Sciences and Technology; Petroleum Technology Symp.*, Rio de Janeiro, Brazil, July 1–6, 2012, 73–79. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAIE2012-83177>
2. O'Brien, E. (2002) Crack tip residual stress and structural health monitoring. *Materials Sci. Forum*, **404–407**, 779–784. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.404-407.779>
3. Kleiman, J., Kudryavtsev, Y., Sugihara, H. (2018) Structural health monitoring (SHM) of residual and applied stresses using a non-destructive ultrasonic technique. In: *Proc. of the Twenty-eighth Inter. Ocean and Polar Engineering Conf.*, Sapporo, Japan, June 10–15, 2018, 1372–1376. ISBN: 978-1-880653-87-6
4. Bray, D.E. (2002) Ultrasonic stress measurement in pressure vessels, piping and welds. *J. of Pressure Vessel Technology*, **124(3)**, August, 326–335. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1480825>
5. Гуща О.Й., Кот В.Г., Сміленко В.М., Бродовий В.О. (2011) Акустичний спосіб контролю підповерхневих напружень в твердих середовищах. Патент на винахід UA93297 Україна, МПК G01N 29/04 (2006.01). № а200907056; заявл. 06.07.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. Huscha, O.Y., Kot, V.H., Smilenko, V.M., Brodovyi, V.O. (2011) Acoustic method for control of sub-surface stresses in solid media. Patent 93297 UA, Int. Cl. G01N 29/04, fill.06.07.2009; publ. 10.01.2011 [in Ukrainian].

6. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. (2000) Residual stress measurement in welded elements by ultrasonic method. In: *Proc. of IX Inter. Cong. on Experimental Mechanics, Orlando, Florida, USA, June 5–8, 2000*, 954–957.
7. Rollins, F.R.Jr., Kobett, D.R., Jons, CMJ J.L. (1963) *Study of ultrasonic methods for nondestructive measurement of residual stress*: Technical Documentary Report, WA DD-TR-61-42, Pt II, January, 1–38.
8. Schneider, E. (2009) Evaluation of stress states of components using ultrasonic and micro magnetic techniques. In: *Proc. of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conf., PVP2009, July 26–30, 2009, Prague, Czech Republic*, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2009-77219>
9. Uzun, F., Bilge, A.N., (2011) Investigation of total welding residual stress by using ultrasonic wave velocity variations. *GU J. Sci.*, 24(1), 135–141.
10. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. et al. (2004) Ultrasonic technique and device for residual stress measurement. In: *Proc. of X Inter. Cong. and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Costa Mesa, California USA, June 7–10, 2004*, 1–7.
11. Hughes, D.S., Kelly, J.L. (1953) Second-order elastic deformation of solids. *Phys. Rev.*, 92(5), 1145–1149. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145>
12. Murnaghan, T.D. (1951) *Finite deformation of an elastic solid*. John Wiley, New York.
13. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гушча О.И. (1977) Введение в акустопругость. Киев, Наукова думка.  
Guz, A.N., Makhort, F.G., Gushcha, O.I. (1977) *Introduction to acoustoelasticity*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
14. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. (2000) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded railway bridge. In: *Proc. of NDT Conf. on Structural Materials Technology, Atlantic City, NJ., February 28–March 3, 2000*, 213–218.
15. Bate, S.K., Green, D., Buttle, D. (1997) *A review of residual stress distributions in welded joints for the defect assessment of offshore structures*: HSE Books, OTH 482.
16. Polezhayeva, H., Kang, J.-K., Lee, J.-H. et al. (2010) A study on residual stress distribution and relaxation in welded components. In: *Proc. of the Twentieth Inter. Offshore and Polar Eng. Conf., Beijing, China, June 20–25, 2010*, 282–289.
17. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Polezhayeva, H. (2011) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded elements of ship structure. In: *Proc. of Integrating Simulation and Experimentation for Validation (ISEV) on Inter. Conf. on Advances in Experimental Mechanics, Edinburgh, Scotland, September 7–9, 2011*. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.70.273>
18. Гушча О.И. (1994) Анализ неоднородных полей остаточных напряжений в сварных соединениях. Автоматич. сварка, 7–8, 3–5.  
Gushcha, O.I. (1994) Non-destructive analysis of inhomogeneous fields of residual stresses in welded joints. *Автоматич. Сварка*, 7–8, 3–5 [in Russian].
19. Гушча О. Й., Махорт Ф. Г. (1995) Применение акустического метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 8–15.  
Gushcha, O.I., Makhort, F.G. (1995) Application of the acoustic method for determining residual stresses in welded structures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 8–15 [in Russian].
20. Ермолов, И.Н., Разыграев, Н.П., Щербинский, В.Г. (1978) Использование акустических волн головного типа для ультразвукового контроля. *Дефектоскопия*, 1, 33–40.  
Ermolov, I.N., Razygraev, N.P., Shcherbinsky, V.G. (1978) The use of head-type acoustic waves for ultrasonic testing. *Defectoscopy*, 1, 33–40 [in Russian].
21. Razygraev, N.P. (2003) Head waves in non-destructive testing of metal structures. *World of Non-Destructive Testing*, 22(4), December.
22. Viktorov, I.A. (1966) *Physical foundations for the use of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves in technology*, Science. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5681-1>

## UltraMARS SYSTEM FOR NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES: NEW DEVELOPMENTS

J. Kleiman

Structural Integrity Technologies, Inc. (Sintec) Markham, Ontario, Canada. E-mail: [jkleiman@itlinc.com](mailto:jkleiman@itlinc.com)

One of the effective methods for non-destructive testing of residual and operating stresses is the acoustic method that is based on the propagation of elastic ultrasonic vibrations inside a solid body. A portable complex for measurement of applied and residual stresses in solid materials using an acoustic non-destructive stress control method was developed in the early 2000 by a team of scientists from Integrity Testing Laboratory, Sintec and E.O. Paton Electric Welding Institute (PWI). An advanced complex UltraMARS was developed based on the early prototype that allows measuring the magnitude and the sign of operating and residual stresses in laboratory and field conditions, either averaged through thickness, or in surface and subsurface layers, as well as monitoring stresses in metal structural elements during their manufacture, repair and operation. It is effective in assessing the quality of welded joints, after post-weld treatments carried out in order to redistribute residual stresses. It has been successfully used in various applications in marine, aerospace, construction and other industries. A four-pole transducer has been developed to improve the operational characteristics of the UltraMARS complex in monitoring stresses on the surface and in the near-surface layers of the material. It differs from the used two-pole transducers of the surface wave (Surface-Rayleigh Wave – Transducer RF12) and subsurface wave (Subsurface – Transducer SF12) in having two transmitter-receiver pairs located at 90° to each other. This change allowed measuring the velocity of ultrasonic waves simultaneously in both orthogonal directions without rotating the transmitter-receiver by 90°. To use these transducers with the UltraMARS complex, a transmitter-receiver switching program has been developed. A transducer with a variable pole distance was also developed for measurement of residual stresses in the near-surface layers of materials, making it possible to determine the uniaxial induced stresses to a depth from 0 to 8...10 mm by changing the base distance between the emitter and receiver. At the moment, a stress control technique is being developed. 22 Ref., 10 Fig.

*Keywords: residual stresses, non-destructive ultrasonic measurement of residual stresses, UltraMARS, variable base transducer, 4-pole transducer*

Отримано 28.04.25

Отримано у переглянутому вигляді 16.07.25

Прийнято 27.11.25

# МЕТОДОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТНИХ ЗРАЗКІВ З ДЕФЕКТАМИ ДЛЯ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ: КЛАСИФІКАЦІЯ, ХАРАКТЕРНІ ПРИКЛАДИ, ДОСЛІДЖЕННЯ СИГНАЛІВ ТА СТАТИСТИЧНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ

В.М. Учанін

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

У роботі розвинуто методологію використання стандартних зразків з дефектами для забезпечення досягнення високої достовірності та повторюваності результатів вихрострумової дефектоскопії. Запропоновано класифікацію стандартних зразків з дефектами та наведено відповідні приклади, що підтверджують правомірність запропонованої класифікації. В якості прикладу представлено конструкції складених багатозначних стандартних зразків для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів у циліндричних і плоских об'єктах контролю. Показано нові конструкції складених стандартних зразків, які імітують дефекти з різною глибиною залягання. Наведено відповідний комплект стандартних зразків, які імітують підповерхневу тріщину однакового розміру з чотирма значеннями глибини її залягання та експериментально досліджено відповідні сигнали вихрострумового перетворювача подвійного диференціювання. Запропоновано спосіб виготовлення стандартних зразків для імітації нахилених тріщин. Проаналізовано низку робіт, які розглядають можливі причини відмінності сигналів вихрострумового перетворювача від природної тріщини та штучних дефектів. Шляхом розрахунків методом об'ємних інтегральних рівнянь показано, що основною причиною відмінності сигналів вихрострумового перетворювача від природних втомних і штучних дефектів є їхня ширина (розкриття). Розглянуто вплив довжини тріщини на особливості сигналу вихрострумового перетворювача параметричного типу, які необхідно враховувати під час вибору довжини тріщин стандартних зразків для забезпечення порогу чутливості та відтворюваності результатів контролю. Наведено статистично обґрунтований спосіб достовірного оцінювання параметрів стандартних зразків з природними дефектами, який успішно використано для оцінювання зразків з втомними тріщинами у трубчастих зразках. Бібліогр. 45, рис. 10.

*Ключові слова:* стандартний зразок, класифікація, вихрострумовий метод, неруйнівний контроль, вихрострумовий перетворювач, штучний дефект, параметри дефекту

**Вступ і стан проблеми.** Для досягнення високої достовірності та повторюваності результатів вихрострумової дефектоскопії важливу роль відіграють методи та засоби метрологічного забезпечення [1–3]. Існує два підходи. Найчастіше для імітації дефектів використовують стандартні зразки (СЗ) зі штучними дефектами (ШД) із заданими геометричними параметрами, серед яких зазвичай нормують поріг чутливості, тобто мінімальну глибину ШД, який повинен виявляти вихрострумовий дефектоскоп (ВД). Параметри ШД у СЗ повинні відповідати вимогам технічної документації щодо порогу чутливості ВД та умов її визначення (відстань вихрострумового перетворювача (ВСП) від поверхні об'єкта контролю (ОК), електрофізичні характеристики (питома електропровідність і магнітна проникність) матеріалу ОК, товщина ОК тощо). Скануючи поверхню СЗ за допомогою ВСП, метролог або оператор-дефектоскопіст можуть оцінювати відповідність ВД нормованим характеристикам щодо чутливості до дефектів. Інший рідкісний підхід базується на використанні

електронних імітаторів дефектів, імітаційні обмотки яких створюють електромагнітне поле або сигнал, ідентичний до тих, що створюють вихрові струми в ОК з дефектом.

Проблемі метрологічного забезпечення ВД із використанням СЗ не приділяють належної уваги. У літературі та стандартах з неруйнівного контролю (НК) довгий час можна було зустріти велике розмаїття термінів: «випробувальний зразок», «контрольний зразок», «еталонний зразок», «еталон», «калібрувальний еталон», «стандартний калібрувальний зразок», «імітатор» тощо, що підтверджує відсутність єдиних підходів. В англійській літературі також використовують різні терміни, зокрема «reference standard» [4] або «reference block» [5]. І тільки останніми десятиріччями термін «стандартний зразок» став найуживанішим для СЗ дефектоскопії. Згідно з загальноприйнятою метрологічною термінологією [6] «стандартний зразок складу або властивостей речовини (матеріалу) – це засіб вимірювань у вигляді визначеної кількості речовини або матеріалу, призначений для відтворення і зберігання розмірів величин, що характеризують склад або властивості цієї речовини (матеріалу), значення яких встановлені в

результати метрологічної атестації, яку використовують для передачі розміру одиниці при повірці, калібруванні, градуванні засобів вимірювання, атестації методик виконання вимірювань, і затверджений в якості СЗ в установленому порядку». Очевидно, що зазначений термін не враховує специфіку дефектоскопії засобами НК. Але існує також метрологічний термін «міра, як вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) збереження фізичної величини заданого значення» [6]. Цей термін більше підходить для засобів відтворення фізичної величини, на вимірюванні якої побудовано метод НК, ніж для зразків з ШД. Важливими прикладами можуть бути зразки для приладів магнітного структурного аналізу на основі визначення параметрів петлі магнітного гістерезису [7] або зразки питомої електропровідності (ПЕП) для вихрострумівих структуроскопів [8]. На жаль, використання терміну «міра» в метрології НК поки не є усталеною практикою. Підтвердженням цього є дискусія між авторами винаходу «Міра коерцитивної сили для метрологічного забезпечення коерцитиметрів з приставними давачами» (автори В.М. Учанин, В.Г. Рибачук, С.М. Мінаков, Р.М. Соломаха) та експертами Державної патентної експертизи, які спочатку відмовились видати патент з такою назвою. Але авторам вдалося відстояти свою позицію і патент на сьогодні знаходиться на стадії видачі.

Зазначене вище формулювання терміну «стандартний зразок» є дуже загальним і не враховує особливості дефектоскопічного НК, що є важливими для забезпечення високої достовірності та повторюваності отриманих результатів. Тому для СЗ дефектоскопії, що використовуються в НК, сформульовано наступне визначення: «Стандартний зразок дефектоскопії – виріб з нормованими метрологічними характеристиками для відтворення властивості порушень суцільності ОК створювати сигнал первинного перетворювача визначеного методу НК». Таке визначення підкреслює головну вимогу до СЗ дефектоскопії – адекватно відтворювати особливості імітованих дефектів і конструктивних особливостей ОК. З іншого боку, СЗ для дефектоскопії – це фізична модель порушення суцільності матеріалу, яка має правильну геометричну форму й адекватно замінює несущість матеріалу під час настроювання або калібрування засобів НК. У цьому означенні закладено певне протиріччя, оскільки СЗ, як будь-яка модель, не може повністю відображати всі властивості реального ОК. Питання адекватності слід вирішувати, враховуючи особливості поставленої задачі й методу НК. Зокрема СЗ для НК повинні враховувати фізичні явища, на основі яких побудовано конкрет-

ний метод НК. Як приклад можна навести СЗ для ультразвукового контролю, які виготовляють із матеріалів з відповідними акустичними характеристиками (наприклад, органічного скла), нехтуючи електрофізичними характеристиками ОК, зокрема їхньою питомою електропровідністю та магнітною проникністю (МП). Відповідно для вихрострумівого контролю можна знехтувати відмінністю акустичних характеристик матеріалу СЗ і ОК. Для цього методу важливо забезпечити електрофізичні характеристики СЗ, зокрема їхні ПЕП і МП, які мають відповідати характеристикам матеріалу ОК. Найпростіший шлях забезпечити адекватність електрофізичних характеристик – виготовити СЗ із того ж матеріалу, що й ОК. При цьому технологія виготовлення СЗ (зокрема поверхнева та термічна обробка) повинна забезпечувати відповідну структуру матеріалу та часову стабільність електрофізичних характеристик матеріалу, яка пов'язана з фізичним старінням матеріалу й зношуванням поверхневого шару. Іншою вимогою до СЗ є можливість виконання ШД визначених параметрів із заданою точністю, що необхідно для їх відтворення під час виготовлення партії СЗ. Не менш важливою є можливість вимірювання нормованих параметрів ШД для їх метрологічної оцінки.

Згадаємо, що з 2016 р. вступив у дію новий закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [9], який змінив поняття багатьох метрологічних термінів з метою гармонізації їх з міжнародною метрологічною практикою [10]. Новий закон ввів поняття «законодавчо регульованої метрології», до сфери якої відносяться види діяльності, щодо яких здійснюється державне регулювання стосовно вимірювань, одиниць вимірювання та засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Метрологічні роботи на підприємствах стосуються метрологічного підтвердження ЗВТ, під яким розуміють сукупність операцій, необхідних для гарантування того, що ЗВТ відповідає метрологічним вимогам щодо його використання за призначенням. На національному та міжнародному рівнях метрологічне підтвердження ЗВТ передбачає проведення метрологічних робіт, а саме їх повірку та калібрування. Термін «повірка» відповідає терміну «верифікація», під якою розуміється отримання об'єктивних свідчень, що даний ЗВТ відповідає встановленим вимогам. З 1993 по 2015 рр. термін «повірка» стосувався ЗВТ, які підлягають державному метрологічному нагляду. Крім того, з 2016 р. існують окремо ЗВТ у сфері законодавчо регульованої метрології та інші ЗВТ, які не підлягають законодавчо регульованій метрології. Тут

існує аналогія з державною та відомчою повіркою ЗВТ, які існували до 1993 р. У той же час є сподівання, що сформульовані нижче основи методології використання СЗ у вихрострумовій дефектоскопії будуть актуальними незалежно від змін законодавства України.

У цій статті здійснено спробу започаткувати створення методології використання СЗ у вихрострумовій дефектоскопії. Зокрема запропоновано класифікацію СЗ з відповідними прикладами, наведено низку технічних рішень щодо СЗ для імітації підповерхневих і нахилених дефектів, досліджено вплив ширини та довжини дефекту СЗ на сигнал ВСП і наведено статистично обґрунтований спосіб визначення параметрів СЗ з природними дефектами.

**1. Класифікація стандартних зразків дефектоскопії.** Для створення методології використання СЗ для метрологічного забезпечення ВД розглянемо можливі варіанти СЗ на основі їх класифікації, де в якості класифікаційних ознак використано наступні особливості: тип і походження дефекту; технологія виготовлення ШД; основні нормовані параметри та кількість нормованих значень; конструктивне виконання, а також етап, на якому їх використовують (рис. 1).

Стандартні зразки дефектоскопії можна створювати, використовуючи природні або штучні дефекти (рис. 1). Очевидно, що реальні умови виявлення дефектів найкраще відтворюють СЗ з природними дефектами, що виникають під час виробничих циклів (плавлення, литво, штампування деформації, термічна та хіміко-термічна обробка; механічна обробка, зварювання) або експлуатації (втомні тріщини, корозійні пошкодження різного типу тощо). Недоліками СЗ з втомними тріщинами, зокрема, є проблема зі створенням тріщин із заданими геометричними параметрами з гарантованою точністю. Можливість визначення параметрів втомної тріщини під час метрологічної оцінки також обмежена через мале розкриття (ширину). Точні характеристики СЗ з природними дефектами можна встановити тільки після їх руйнування. Тому на практиці для перевірки та настроювання засобів НК традиційно використовують СЗ із ШД простої форми [11–13]. Перевагою таких СЗ є нескладність їх виготовлення та метрологічної оцінки, яку виконують вимірюванням нормованих параметрів ШД методами вимірювання лінійних розмірів.

Незалежно від походження дефекти прийнято поділяти на видовжені (лінійні) і локальні (об'ємні). Тріщиною називають дефект, для якого спра-

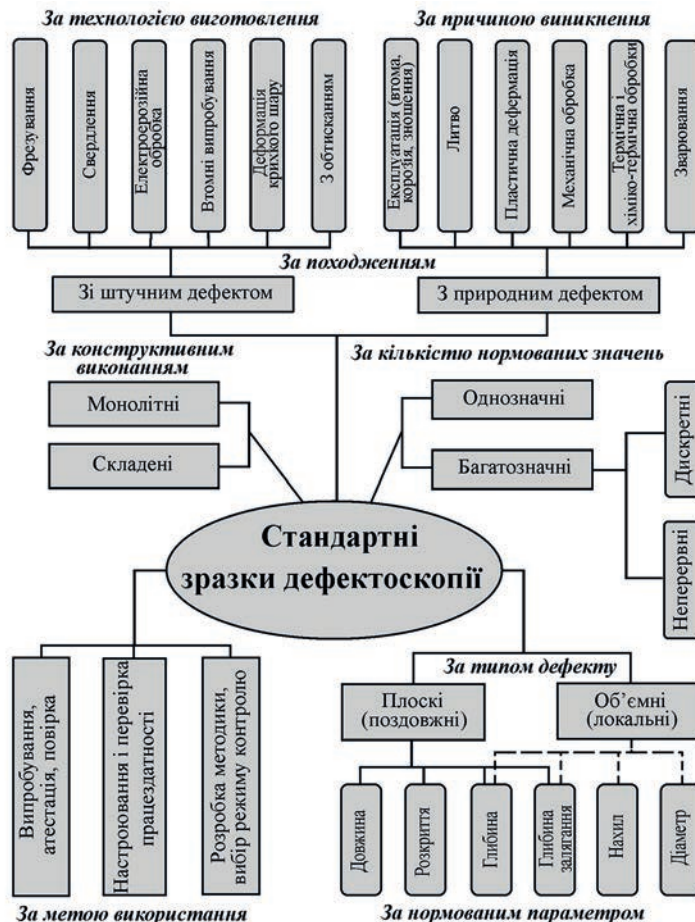


Рис. 1. Класифікація стандартних зразків дефектоскопії

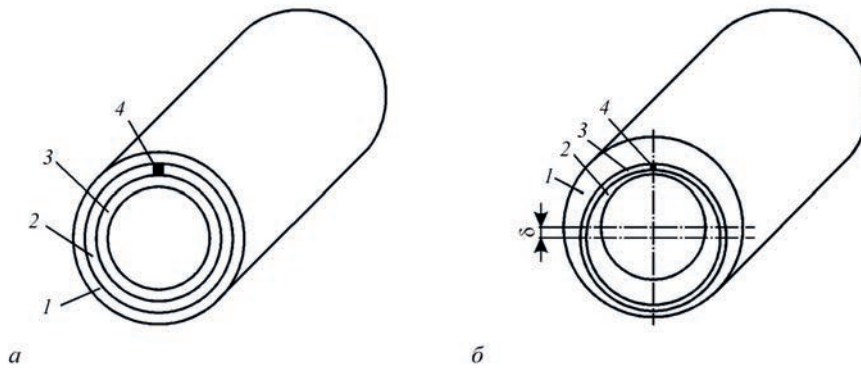


Рис. 2. Однозначний дискретний (а) і багатозначний (б) СЗ складеного типу для імітації дефектів циліндричних ОК: 1–3 – шари циліндричного СЗ; 4 – ШД;  $\delta$  – ексцентриситет

ведливе співвідношення  $l_{\text{тр}} \gg a \gg c$ , де  $l_{\text{тр}}$  – довжина тріщини,  $a$  – її глибина та  $c$  – ширина. Для локальних дефектів (наприклад пор), ці параметри близькі. Видовжені ШД типу тріщини переважно імітують пазами (прорізами), які виконують електроерозійним методом або тонкою фрезою. Найтонкіші пази, що краще відтворюють природну тріщину, виконують електроерозійним методом, який створює дефекти шириною (розкриттям) до 0,1 мм. Виконання ШД фрезуванням простіше, але не дає можливості виконати ШД завширшки менше 0,2 мм. Розкриття таких ШД зменшують обтисканням, для чого нагрівом збільшують пластичні властивості матеріалу [11]. Локальні об'ємні дефекти типу пори або корозійної виразки імітують зазвичай свердленням з плоским дном [14, 15].

Недоліком СЗ із ШД є те, що за своїми властивостями і, що особливо важливо, за здатністю формувати відповідний сигнал ВСП вони відрізняються від СЗ з природними дефектами (зокрема втомними й корозійними). В окремих випадках для відтворення властивостей втомних тріщин їх створюють шляхом циклічних навантажень на машинах для механічних випробувань. Для поздовжніх дефектів типу тріщини основними параметрами, які нормують під час атестації СЗ, може бути їхня глибина, глибина залягання для підповерхневих дефектів або нахил площини дефекту відносно поверхні ОК. Для локальних дефектів нормованими параметрами є: глибина, діаметр, глибина залягання для підповерхневих дефектів або нахил відносно контрольованої поверхні.

За кількістю значень відтворюваного нормованого параметра дефекту СЗ можуть бути однозначними або багатозначними (рис. 1). Тобто СЗ може імітувати один або декілька дефектів з різними значеннями нормованого розміру. Багатозначні СЗ можуть відтворювати дискретні або неперервні значення нормованого параметра дефекту в діапазоні його зміни. Конструктивно СЗ можна викона-

ти у вигляді монолітного зразка або скласти з двох або більше частин. Складені СЗ використовують найчастіше для імітації підповерхневих дефектів [16–18].

На рис. 2 наведено складений СЗ для імітації підповерхневих дефектів у циліндричних ОК. СЗ на рис. 2, а виконано у вигляді шаруватого циліндра з ШД у вигляді прорізу вздовж твірної циліндра в одному з шарів [16]. Вибором товщини циліндричного шару з наскрізним ШД задають його глибину, а вибором товщини зовнішнього шару – глибину його залягання. Такий СЗ відтворює тільки одне значення глибини ШД і одне значення його глибини залягання, тобто дискретні значення параметрів ШД. Він не може імітувати ШД, різні за глибиною та з різною глибиною залягання. Для цього необхідно створювати окремі СЗ, які імітуватимуть дискретні значення відповідних параметрів.

Універсальнішим є складений СЗ на рис. 2, б у вигляді ексцентричних втулок 1, 2, між якими розташовано циліндричну втулку 3 з ШД 4 [17]. Поворотом втулки такого СЗ можна змінювати глибину залягання ШД у певному діапазоні за сталих розміру ШД і товщини циліндричного ОК, тобто цей СЗ є багатозначною мірою глибини залягання дефекту. Недоліком є складність виготовлення цього СЗ, оскільки для щільного з'єднання втулок необхідно забезпечити їх точні розміри по всій довжині зразка. В іншому випадку будуть існувати зазори між шарами, що впливатимуть на сигнал ВСП.

СЗ дефектоскопії можуть класифікуватися відповідно до мети їхні використання, оскільки вони призначені для забезпечення достовірності контролю шляхом: 1) випробувань, атестації та перевірки (калібрування) ВД; 2) налаштування та періодичної перевірки працездатності ВД для виконання конкретної методики контролю; 3) вибору режимів контролю під час розробки методики з урахуванням особливостей ОК і чинників, що створюють завади (рис. 1). Процедури

випробування, атестації і первинної повірки (калібрування) ВД – важливий етап їх створення, під час якого нормують метрологічні характеристики (переважно поріг чутливості й роздільну здатність). Цей етап підлягає метрологічному контролю акредитованими установами за допомогою СЗ, які пройшли відповідну метрологічну оцінку. Такі СЗ пропонує розробник ВД або акредитована установа, тому їх часто називають первинними. Перевірку настроювання ВД і його спроможності виконувати методику контролю конкретного виробу здійснюють безпосередньо на робочому місці. Тут використовують СЗ, які максимально відтворюють особливості ОК. Параметри ШД таких дефектів обирають залежно від вибраного бракувального критерію, який може відрізнятися від порога чутливості ВД. Ці СЗ повинні імітувати особливості всієї номенклатури ОК підприємства та їх на практиці найчастіше виготовляють підприємства, що експлуатують засоби НК. Такі СЗ часто визначають як вторинні СЗ. Вони не завжди підлягають метрологічній оцінці та, у кращому випадку, проходять технічний контроль на відповідність кресленням. На дослідницькому етапі визначають принципову можливість розв’язати нову задачу НК, вибирають режими контролю (наприклад, тип ВСП, робочу частоту тощо) та оптимізують методику контролю з урахуванням конструкційних особливостей ОК. Тут необхідні СЗ, що повністю відтворюють умови контролю конкретного виробу (ПЕП, МП, наявність покриття, кривизна поверхні, конструктивні особливості тощо). Ці СЗ не потребують метрологічної оцінки, оскільки після закінчення досліджень їх не використовують.

Для реалізації технологій кількісної дефектоскопії з визначенням параметрів виявлених дефектів метрологічне забезпечення (у тому числі підходи до вибору СЗ) має суттєво змінюватись. Сьогодні практика атестує ВД тільки за допомогою СЗ з ШД, що характеризує поріг чутливості. Для кількісної дефектоскопії необхідно створити СЗ, які відтворюють параметри ШД у діапазоні їх зміни та оцінити похибку їх визначення.

У реальних умовах контролюють умови впливу низки параметрів, що змінюють граничну чутливість ВД. Строго кажучи, поріг чутливості ВД є функцією багатьох параметрів (наприклад, зазору між ВСП і поверхнею ОК, відстанню до краю ОК, ПЕП і товщини ОК). Методологічно вірний підхід передбачав би нормування цих впливів для оцінювання можливості дефектоскопії у реальних умовах. Але на практиці такий підхід не застосовують, оскільки для цього необхідний великий набір СЗ.

На практиці використовують найпростіші плоскі СЗ, на всю ширину яких нанесено паз, глибина якого відповідає порогу чутливості ВД. Такий СЗ оцінює поріг чутливості тільки за глибиною. Суттєвим недоліком є неможливість встановити поріг чутливості ВД за довжиною дефектів. Крім того, не оцінюється вплив кривизни поверхні й краю. Кращі можливості забезпечують СЗ з поверхневими дефектами, виконані із алюмінієвого сплаву Д16 (СОП 5-1), титанового сплаву ВТ3 (СОП 5-2) і феромагнітної сталі Ст45 (СОП 5-3), якими раніше комплектували ВД типу ПРОБА-5 (рис. 3) [12]. Пази завдовжки 2 мм розкриттям до 0,1 мм виконані електроерозійним способом латунним електродом завтовшки 0,05 мм. На поверхні СЗ із алюмінієвого сплаву нанесені пази завглибшки 0,2 і 0,5 мм, а у СЗ із титанового сплаву та сталі – завглибшки 0,5 і 1,5 мм. Крім пазів, на плоску частину СЗ (рис. 3, дефекти 1, 2) нанесено пази на циліндричній випуклій (дефекти 3, 4) та увігнутій (дефекти 5, 6) ділянках радіусом 6 мм. Крім того, на край СЗ нанесено два дефекти завдовжки 0,5 і 1,0 мм (дефекти 7, 8). Таким чином, такі СЗ дають можливість оцінювати чутливість ВД за глибиною та довжиною поверхневого ШД на плоскій і криволінійній поверхнях у феромагнітних сталях і неферомагнітних матеріалах з різною ПЕП. Недоліком цього СЗ є складність виготовлення та висока ціна, що унеможливило комплектування ними кожного ВД. Тим не менше, ці СЗ успішно використовувались нами під час державних випробувань вихрострумівих автогенераторних дефектоскопів типу ЛЕОТЕСТ ВД, які проведено на базі ДП «Дніпростандартметрологія» (м. Дніпро) [13].

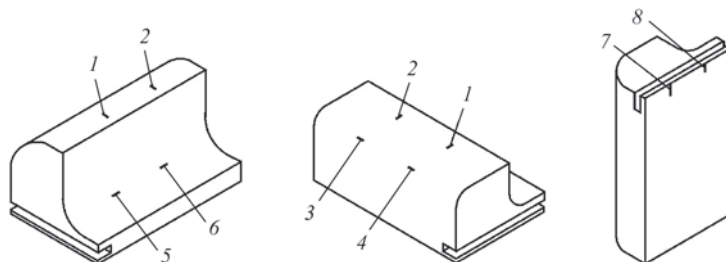


Рис. 3. СЗ типу СОП з поверхневими дефектами на плоскій (1, 2), випуклій (3, 4), увігнутій (5, 6) і крайовій (7, 8) ділянках

Європейський стандарт з перевірки характеристик ВСП пропонує загальні вимоги до СЗ, комплект яких для перевірки накладних ВСП наведено на рис. 4 [5]. Кожний із СЗ повинен мати довжину й ширину, як мінімум, у 10 разів більшу від довжини зони чутливості ВСП. Коли ця характеристика невідома, її треба замінити максимальним (активним) розміром ВСП у площині сканування. Відстань від паза до краю СЗ повинна у 2,5 рази перевищувати протяжність зони впливу краю. Товщина СЗ має бути, як мінімум, удвічі більша за стандартну глибину проникання вихрових струмів на найнижчій робочій частоті ВСП. Детальніші вимоги до кожного конкретного СЗ, зокрема кількість пазів, ширину та глибину пазів, діаметр отвору, слід навести в методиці контролю або експлуатаційній документації. Для дослідження сигналів ВСП від видовжених дефектів запропоновано СЗ типу А1 (рис. 4) з пазом у центральній зоні, який має бути довшим від мінімальної довжини паза, що викликає максимальний сигнал ВСП, і глибшим від мінімальної глибини поверхневого паза, що викликає максимальний сигнал ВСП. Для дослідження сигналів ВСП від локальних дефектів запропоновано СЗ типу А2 з отвором у центральній зоні. Рекомендовано, щоб глибина отвору дорівнювала глибині паза в блоці А1. Для оцінки впливу товщини, зокрема ефективної глибини проникання вихрових струмів, запропоновано набір СЗ типу А3, які подібні до зразка А1 без паза з різною товщиною, що збільшується до трьох значень стандартної глибини проникання або до двох активних розмірів ВСП. Цей СЗ разом з таким типу А1 використовують також для визначення ефективної глибини виявлення підповерхневих дефектів. Згідно з запропонованою класифікацією тут застосовано складений СЗ, в якому вибором товщини пластин імітують різну товщину ОК. Для

оцінки впливу глибини паза, зокрема визначення мінімальної глибини, яка викликає максимальний сигнал ВСП, запропоновано СЗ типу А4 (рис. 4). Він подібний до зразка А1, але має набір паралельних пазів, розташованих по центру СЗ. При цьому всі пази мають однакову довжину і ширину (як у СЗ А1), а глибина поступово збільшується з постійним кроком. Відстань між двома послідовними пазами має бути щонайменше у 5 разів більше, ніж розмір зони чутливості ВСП. Для оцінки впливу довжини дефекту на сигнал ВСП, зокрема визначення мінімальної довжини, що забезпечує постійний сигнал ВСП, запропоновано СЗ типу А5 (4). Він подібний до зразка А1, але з низкою паралельних пазів, які мають таку саму глибину та ширину, як пази у зразку А1, але їхня довжина поступово збільшується з постійним кроком. Відстань між двома послідовними пазами має бути щонайменше у 5 разів більша від розмірів зони чутливості ВСП.

Нагадаємо, що згідно з Європейським стандартом ці СЗ призначені для характеризування ВСП, що необхідно для вибору відповідного ВСП для вирішення поставленої задачі на етапі розробки методики контролю, а не для метрологічної оцінки ВД. Вони дають можливість визначити мінімальні глибину та довжину тріщини, які викликають максимальний сигнал ВСП. За їх допомогою можна встановити локальність контролю (за розмірами зони чутливості), дослідити вплив орієнтації ВСП відносно тріщини, вплив товщини ОК тощо. Проте вони не забезпечують оцінку роздільної здатності, для якої необхідні СЗ з дефектами, розташованими на різній відстані. Роздільну здатність у цьому випадку можна оцінити тільки опосередковано за розмірами зони чутливості. Європейський стандарт передбачає також використання складеного СЗ, в якому дефект імітовано

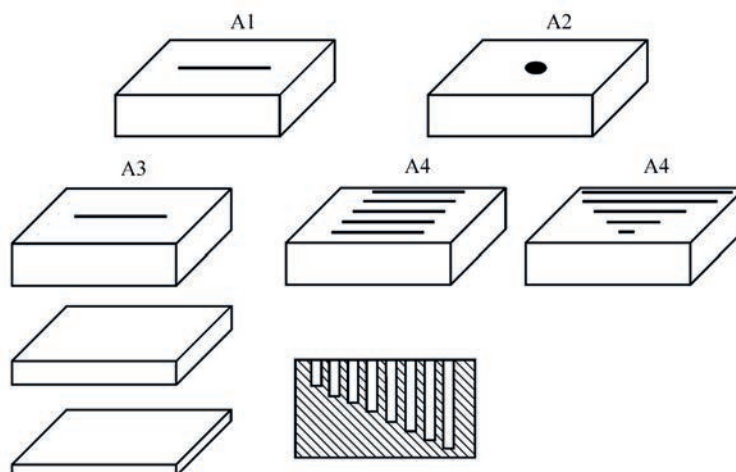


Рис. 4. СЗ для перевірки характеристик накладних ВСП згідно з Європейським стандартом [5]

стиком двох шліфованих пластин. Цей варіант СЗ традиційно використовують для дослідження сигналів ВСП з різною глибиною залягання, а також для відпрацювання методик контролю багатощарових авіаційних вузлів.

**2. Багатозначні складені СЗ для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів у циліндричних плоских ОК.** Більшість відомих СЗ можна використовувати тільки для імітації поверхневих дефектів. Для реалізації технологій виявлення та оцінки прихованих підповерхневих дефектів на низьких робочих частотах необхідні СЗ з ШД, які додатково пронормовано за глибиною їх залягання. Нами запропоновано багатозначний складений СЗ (рис. 5) для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів для обертового контролю циліндричних ОК (В.М. Учанин, В.Л. Найда, І.І. Кириченко, О.М. Гоголя Стандартний зразок для настроювання, калібрування та атестації вихрострумових дефектоскопів. Пат. України № 39172. Опубл. 10.02.2009; Бюл. № 3). СЗ для імітації поверхневих дефектів складається з двох циліндричних трубчастих частин 1 і 2 з зовнішнім діаметром  $D$ , внутрішнім  $d$  і товщиною стінки  $T$ . Для імітації (рис. 5, а) один кінець циліндричної трубчастій частини 1 оброблено на кінцевій ділянці 3 з довжиною  $l$  по конусній поверхні так, що зовнішній діаметр кінцевої ділянки 3 збільшується від кінця трубки по довжині ділянки  $l$  під заданим кутом  $\alpha^\circ$  відносно поверхні циліндра. Частину 2 зразка оброблено на кінцевій ділянці 4 з довжиною  $l$  по конусній поверхні так, що внутрішній діаметр кінцевої ділянки 4 зменшується від кінця трубки по довжині ділянки  $l$  під тим самим кутом  $\alpha^\circ$ . Обидві частини СЗ з'єднані по конусних поверхнях кінцевих ділянок 3 і 4 так, що утворюють єдиний циліндр. Для імітації поверхневого дефекту типу тріщина на кінцеву конусну ділянку 4 другої частини СЗ нанесено тонкий наскрізний проріз з довжиною  $l$  і шириною  $c$ . У результаті СЗ імітує поверхневий дефект, глибина  $a$  якого змінюється

від 0 до  $T$  залежно від положення обертового ВСП уздовж СЗ (рис. 5, а).

Для імітації підповерхневої тріщини (рис. 5, б) тонкий наскрізний проріз з довжиною  $l$  і шириною  $c$  нанесено на кінцеву конусну ділянку 3 першої частини 1. Після з'єднання частин СЗ по конусних поверхнях 3 і 4 імітується підповерхневий дефект з довжиною  $l$ , шириною  $c$  зі змінною глибиною залягання  $h_3$  від 0 до  $T$ . Для імітації об'ємного локального дефекту типу пори на кінцеві ділянки СЗ можна нанести свердлення різного діаметра.

СЗ на рис. 5 є простими у виготовленні та імітують дефекти різного типу й розміру, які залягають на різній відстані від поверхні ОК. Глибину дефекту або його глибину залягання в зоні контролю визначає положення обертового ВСП  $b$  вздовж дефектної ділянки СЗ, тому цей СЗ згідно з класифікацією (рис. 1) є складеним багатозначним.

Для імітації підповерхневих дефектів різної глибини і глибини залягання в плоских ОК запропоновано складений багатозначний СЗ (рис. 6), який містить дві клиновидні частини 1 і 2, що мають однаковий кут нахилу  $\alpha$  (В.М. Учанин, В.Г. Рибачук Стандартний зразок для настроювання та атестації вихрострумових дефектоскопів. Патент України № 39189. Опубл. 10.02.2009; Бюл. № 3). Частини СЗ стикуються по площині 4 так, що утворюється пластина з плоскопаралельними поверхнями. Для імітації тріщин в одній з клиновидних частин виконують тонкий розріз 5. Площина розрізу є перпендикулярною до площини стику 4 клиновидних частин. Під час встановлення ВСП на поверхню СЗ, яка належить до клиновидної частини 1 без розрізу (рис. 6), імітується підповерхнева тріщина зі змінною глибиною залягання  $h_3$  та змінною глибиною  $a$ , які залежать від відстані  $l$  між ВСП та краєм СЗ з довжиною  $L$ . Під час встановлення ВСП  $b$  на поверхню СЗ, яка належить до клиновидної частини 2 з розрізом, ШД імітує поверхневу тріщину. При цьому глибина ШД  $a$  змінюється залежно від відстані  $l$  між ВСП та краєм СЗ. Із рис. 6 видно, що

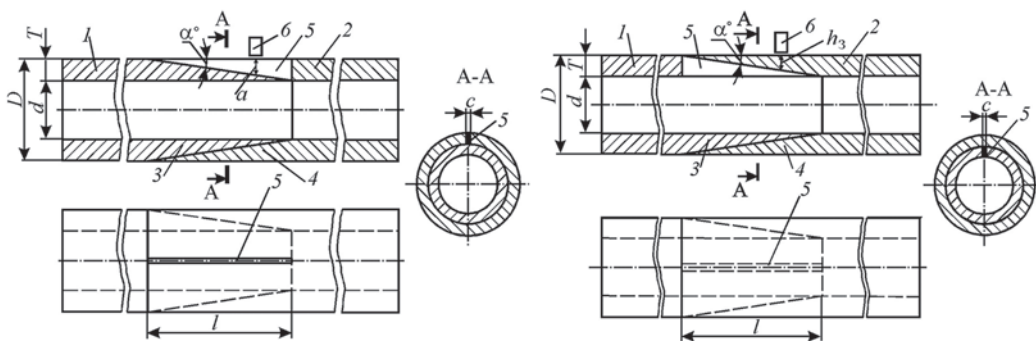


Рис. 5. Складений СЗ для імітації поверхневих (а) і підповерхневих (б) дефектів типу тріщини в циліндричних ОК: 1, 2 – частини СЗ; 3, 4 – конусні кінцеві ділянки частин СЗ; 5 – дефект на зовнішній (а) і внутрішній (б) конусних ділянках; 6 – ВСП

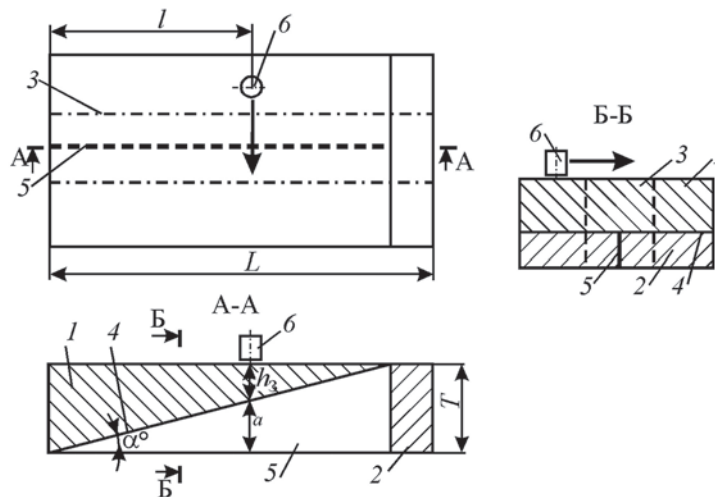


Рис. 6. Складений багатозначний СЗ для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів у плоских ОК зі зварним швом: 1, 2 – клиновидні частини; 3 – область зварного шва; 4 – стик; 5 – ШД дефект; 6 – ВСП

глибина залягання  $h_3$  тріщини та її глибина  $a$  залежать від відстані  $l$  між ВСП та краєм СЗ відповідно до співвідношень  $a = l \cdot \operatorname{tg} \alpha$  і  $h_3 = T - a = T - l \cdot \operatorname{tg} \alpha$ . Змінюючи відстань  $l$  ВСП від краю СЗ, можна імітувати поверхневу та підповерхневу тріщини різної глибини та глибини залягання у деякому неперервному діапазоні значень цих параметрів. За необхідності на поверхню СЗ можна нанести лінійну шкалу імітованого параметра.

Для імітації дефектів типу непровар у зварних швах клиновидні частини СЗ виготовляли з пластин із попередньо нанесеним зварним швом (штрихова лінія на рис. 6). При цьому напрямок нахилу клиновидних частин СЗ збігається з напрямком зварного шва. ШД у вигляді розрізу наносили на клиновидну частину 2 в області зварного шва.

Існують ситуації, коли достатньо імітувати дискретні значення параметра дефекту. Зокрема для дослідження впливу глибини залягання де-

фекту незалежно від його розміру можна застосовувати СЗ, який імітує дефект однакової глибини для двох дискретних значень глибини залягання (рис. 7) [19]. Дві частини СЗ складають так, що після їх суміщення утворюється прямокутна пластинка з товщиною  $T$  з підповерхневим дефектом з глибиною  $a$ . Дефект – перпендикулярний до поверхні зразка стик двох частин. З різної поверхні згідно зі співвідношенням  $h_{31} + h_{32} + a = T$ . Виготовлено два СЗ із алюмінієвого сплаву Д16Т завтовшки 7 мм: один імітує тріщину завглибшки 2 мм, що залягає на глибинах 2 і 3 мм; а інший – тріщину завглибшки 2 мм, що залягає на глибинах 1 і 4 мм.

Такий комплект СЗ дозволяє імітувати чотири значення глибини залягання однакового за розмірами дефекту та дослідити вплив глибини його залягання на сигнал ВСП незалежно від розмірів і товщини пластини. Сигнали ВСП для цих СЗ досліджували за допомогою вихрострумової плати EDDYMAX. На рис. 8 наведено сигнали ВСП типу МДФ 0801 у комплексній площині на робочій частоті 1 кГц. Коефіцієнт підсилення для ШД з глибиною залягання  $h_3 = 1$  і 2 мм дорівнював 44 дБ. Для дефектів з  $h_3 = 3$  і 4 мм (рис. 8, в, г) підсилення збільшили на 12 дБ, зважаючи на велику різницю амплітуди сигналу для ШД з різною глибиною залягання.

Наведені результати ілюструють принцип застосування СЗ (рис. 7) для визначення можливості

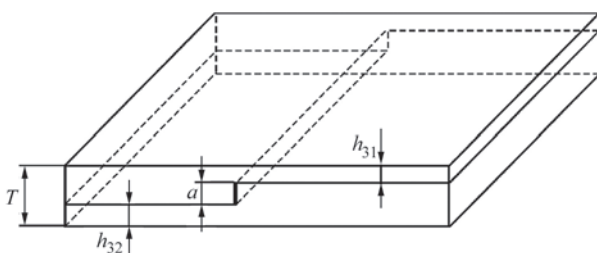


Рис. 7. Складений СЗ для імітації двох дискретних значень глибини залягання дефекту

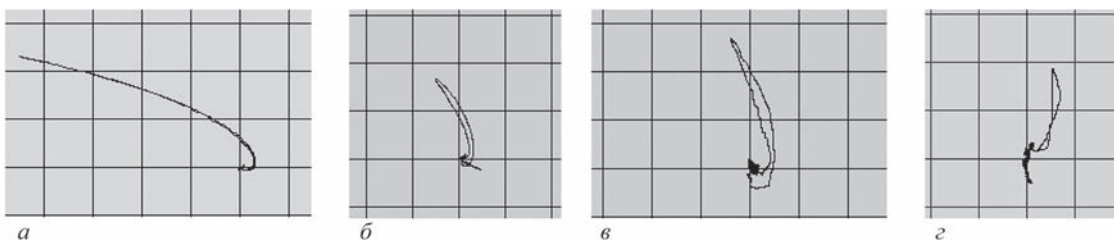


Рис. 8. Сигнали ВСП від протяжного дефекту типу тріщини з глибиною залягання  $h_3$  (мм): 1 (а); 2 (б); 3 (в), 4 (г)

вихрострумове методу, зокрема для виявлення дефектів типу тріщини завглибшки  $a = 2$  мм, що залягають у виробі із алюмінієвих сплавів на глибині до 4 мм. Видно, що вибраний ВСП на робочій частоті 1 кГц забезпечує надійне виявлення усіх дефектів СЗ з розміром у глибину 2 мм, що залягають в алюмінієвих сплавах на глибині до 4 мм. Зі збільшенням глибини залягання ШД амплітуда сигналу ВСП суттєво зменшується. При цьому годограф сигналу ВСП зі збільшенням глибини залягання розгортається за годинниковою стрілкою, тобто змінюється фаза сигналу ВСП, що необхідно врахувати під час розробки методики контролю. Описаний комплект складених СЗ використали для дослідження та розробки методики виявлення внутрішніх дефектів у багатошарових авіаційних конструкціях і зварних з'єднаннях із алюмінієвих сплавів.

**3. Виготовлення СЗ для імітації нахилених дефектів.** Більшість відомих СЗ можна використовувати тільки для імітації поверхневих дефектів, орієнтованих перпендикулярно до поверхні ОК. Це можна пояснити тим, що такі дефекти є характерними для більшості конструкцій, хоча відомі випадки утворення нахилених тріщин, зокрема за контактної взаємодії поверхонь під час кочення [20]. У нечисленних випадках для виявлення та оцінки дефектів різної орієнтації необхідні СЗ з дефектами, що орієнтовані відносно поверхні ОК під заданим кутом. Відомі способи виготовлення СЗ не дозволяють створити нахилені ШД із заданим кутом нахилу, оскільки під час спроб їх нанести тонкі фрези деформуються й процес різання стає нестабільним, особливо за малих (менше  $60^\circ$ ) кутів нахилу фрези відносно поверхні. Для створення СЗ з нахиленими дефектами запропоновано спосіб їх виготовлення (В.М. Учанін Спосіб виготовлення контрольних зразків для настроювання, калібрування та атестації приладів неруйнівного контролю. Пат. України № 29293. Опубл. 10.01.2008; Бюл. № 1). Для його реалізації спочатку вибирають матеріал, електрофізичні характеристики (ПЕП і МП) якого відповідають ОК, з якого виготовляють заготовку 1 (рис. 9.). На поверхні за-

готовки виконують клиноподібний виріз 2, бокова поверхня якого нахилена під кутом  $\varphi$  відносно до поверхні заготовки. Після цього на бокову поверхню вирізу наносять електроерозійним методом або тонкою фрезою ШД у вигляді тонкого паза 3 (рис. 9, а). Далі частину заготовки разом з вирізом видаляють по лінії 4 (рис. 9, а), формуючи поверхню СЗ. Отриманий СЗ імітує нахилений під кутом  $\varphi$  дефект типу тріщини (рис. 9, б). Вибором кута  $\varphi$ , глибини прорізу, нанесеного на бокову поверхню вирізу, і товщини видаленого шару заготовки можна імітувати дефекти різної глибини з різним нахилом відносно поверхні. Використання СЗ з нахиленими дефектами важливо для дослідження та відпрацювання вихрострумів методик кількісної оцінки параметрів нахилених тріщин [21].

**4. Аналіз можливих причин відмінності сигналів ВСП штучних і природних тріщин та дослідження впливу ширини тріщини на сигнал ВСП.** Автори [22] вважають, що природні тріщини та ШД у вигляді тонких пазів створюють близькі за характеристиками сигнали ВСП. Водночас велика кількість робіт щодо цього питання показують суттєву відмінність сигналів ВСП від природних і ШД [23–27]. Серед причин, якими пояснюють можливість розходження, називають: 1) наявність зони пластичної деформації в зоні природної тріщини [23]; 2) більшу величину розкриття ШД порівняно з природною тріщиною [24, 27]; 3) можливість електричного контакту стінок природної тріщини, на відміну від ШД, в якому можливість такого контакту відсутня [26]; 4) більшу шорсткість поверхні зламу природної тріщини на відміну від ШД, який має гладкі стінки [28]. Розглянемо ці відмінності сигналів ВСП від природних і ШД детальніше.

Традиційні моделі формування сигналу ВСП не враховують змін електрофізичних параметрів матеріалу в зоні пластичних деформацій, створених втомною тріщиною. У [23] вважають, що ширина цієї зони є достатньо великою та може значно перевищувати об'єм самої тріщини. Це призводить до значних змін ПЕП і МП у зоні дефекту, що може впливати на сигнал ВСП. Проте експерименталь-

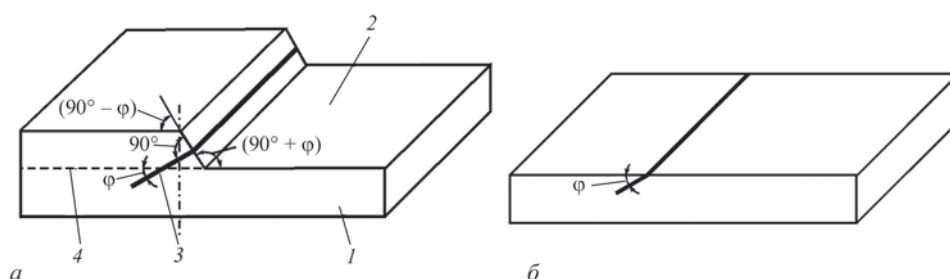


Рис. 9. Схема реалізації способу виготовлення (а) СЗ для імітації нахилених тріщин (б): 1 – заготовка; 2 – клиноподібний виріз; 3 – дефект; 4 – лінія видалення вирізу

них доказів щодо такого впливу не наведено.

Більша шорсткість поверхні зламу втомної тріщини, на відміну від ШД з гладкими стінками, характерними для електроерозійних ШД, також може бути однією з причин відмінності сигналів. Відомо, що шорстка поверхня втомної тріщини має фрактальний характер [29–31]. У [28] розглянуто вплив фрактального характеру зламу природної тріщини на сигнал ВСП. В якості простої моделі зламу тріщини використано один із варіантів поверхні Коха [32]. Показано, що збільшення фрактальної розмірності  $D$  поверхні зламу природної тріщини ( $D > 2$ ) порівняно з розмірністю гладкої поверхні ( $D = 2$ ) ШД призводить до збільшення електричного опору вихровим струмам у зоні тріщини. Проте експериментальних доказів щодо суттєвості такого впливу також не наведено.

У більшості робіт [24–27] на основі експериментальних досліджень показано, що сигнали від ШД суттєво перевищують сигнали від природних тріщин. У [24], зокрема, зазначено, що сигнал від ШД може перевищувати сигнал від природної тріщини відповідної глибини у 2–5 разів. Показано, що сигнали від природної тріщини мають більшу варіабельність порівняно з сигналами від ШД, а також існує залежність розходження параметрів сигналу від ШД і природної тріщини від робочої частоти, коли відмінність між сигналами ВСП від природних і ШД стає більшою зі збільшенням робочої частоти. Автори цих робіт припускають, що основною причиною розходжень сигналів природних і ШД є різне розкриття дефектів, оскільки порівнювали сигнали від природних тріщин з малим розкриттям і ШД у вигляді пазів достатньо великої ширини. Зазначимо, що проведені експерименти могли дати хибні результати, оскільки за рівності глибини та довжини порівнюваних природних і ШД не було забезпечено однакових значень їхньої ширини (розкриття) через брак необхідних зразків. Для підтвердження висновку про вирішальний вплив ширини ШД на сигнал ВСП важливо провести відповідні теоретичні дослідження.

Для дослідження впливу ширини (розкриття) дефекту методом об'ємних інтегральних рівнянь [33–34] проведено розрахунок годографів сигналів параметричного ВСП для тріщини однакової глибини та довжини зі зміною її ширини. Досліджували сигнали від тріщини завдовжки 5 мм і завглибшки 1 мм, що залягає в немагнітному півпросторі з ПЕП 20 МСм/м на робочій частоті 1 МГц. Обмотка досліджуваного ВСП складалася із 20 витків заввишки 0,5 мм з внутрішнім і зовнішнім радіусами 0,45 і 0,55 мм відповідно. Отримані значення імпедансу ВСП під час взаємо-

дії з дефектом нормували відносно імпедансу ВСП за встановлення його на бездефектний півпростір з ПЕП 20 МСм/м ( $R_{20} = 0,174$  Ом;  $X_{20} = 1,806$  Ом і  $L_{20} = 0,287$  мкГн). Усі геометричні параметри разом із розкриттям  $c$  нормували відносно середнього діаметра ВСП (1 мм). Розрахунки виконано для відносних значень розкриття  $c'$  від 0,01 до 2,4, що відповідає можливому розкриттю природних і штучних дефектів. Зазначимо, що ШД найчастіше виготовляють з розкриттям до 0,3 мм, що в нашому випадку відповідає приведеному значенню  $c' = 0,3$ . Отримані результати (рис. 10) свідчать, що амплітуда сигналу ВСП суттєво залежить від розкриття тріщини. З його збільшенням від 0,01 до 0,3 амплітуда зростає на порядок (від 0,0026 до 0,083), а фаза сигналу змінюється від 62 до 82°. Зі збільшенням розкриття від 0,01 до 2,4 амплітуда сигналу зростає на два порядки (від 0,026 до 0,26), а фаза змінюється від 62 до 103°.

Отримані розрахункові результати підтвердили висновок про вирішальний вплив ширини дефекту на відмінність сигналів ВСП від природних і ШД. Під час виготовлення СЗ, що імітує втомні тріщини, важливо виконувати ШД з малим розкриттям. Перевагу слід віддавати методам, що передбачають обтискання СЗ зі штучним дефектом для зменшення його ширини.

**5. Дослідження впливу довжини тріщини на сигнал ВСП.** Дослідження впливу довжини тріщини на сигнал ВСП має методологічне значення для визначення умов відтворюваності результатів контролю під час використання СЗ з дефектами типу тріщина. У метрології відтворюваність (в англійській літературі – reproducibility) є характеристикою якості вимірювань, яка відображає близькість результатів вимірювань однієї й тієї ж величини, виконаних у різних умовах [6]. Для дефектоскопії відтворюваність є не менш важли-

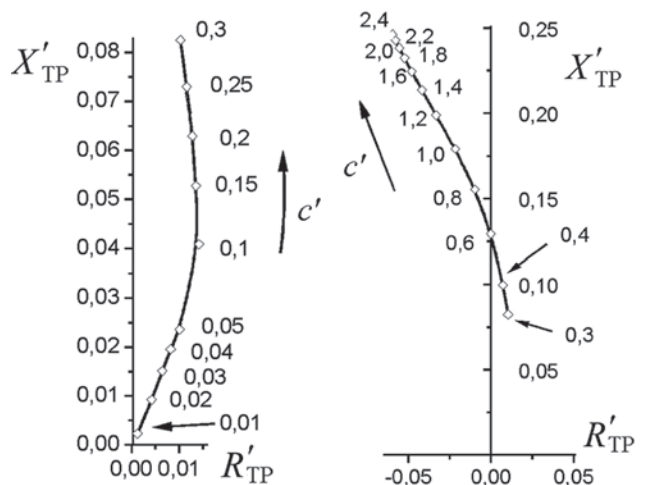


Рис. 10. Годограф сигналу ВСП від тріщини залежно від її розкриття  $c'$  у діапазоні від 0,01 до 0,3 (а) і від 0,3 до 2,4 (б)

вою, оскільки виступає мірою порівнюваності результатів контролю, що отримані у різних місцях, різними операторами-дефектоскопістами та засобами контролю. Зазначимо, що крім терміну «відтворюваність», у новіших документах з метрології використовують споріднений терміни «повторюваність» (в англійській літературі – *repeatability*), який відображає близькість результатів вимірювань в умовах повторюваності, коли незалежні результати випробувань отримано одним методом на ідентичних зразках в одній лабораторії та одним оператором із використанням одного обладнання за короткий інтервал часу [35]. Очевидно, що цей термін відображає індивідуальні особливості оператора, зокрема рівень його кваліфікації.

Вплив довжини тріщини на сигнал ВСП досліджувався у багатьох роботах, які показали близькі результати [36–41]. У [36] за результатами експериментальних досліджень на фізичних моделях зі сплаву Вуда помилково зазначено, що розподіл сигналу ВСП від довгої тріщини має два максимуми в зоні її закінчень за відсутності центрального максимуму, що можна пояснити недостатньою точністю експериментальних досліджень. Очевидно, що теоретичні дослідження дозволяють виявити особливості, які можуть бути пропущені за експериментальних досліджень [37]. У [41] дослідження розподілу сигналу ВСП проведено у широкому діапазоні співвідношення довжини тріщини відносно діаметра ВСП, результати яких добре узгоджуються з результатами досліджень інших авторів [37–40]. У [41] досліджували параметричний ВСП з однією обмоткою під час сканування електропровідного немагнітного ОК з тріщиною у вигляді поверхневого прямокутного пазу довжиною  $l_{\text{ТР}}$ , глибиною  $a$  та шириною (розкриттям)  $c$  ( $l_{\text{ТР}} \gg a \gg c$ ), розміщеного в центрі системи координат, де координати  $X$  і  $Y$  відповідають поперечному та повздовжньому відносно тріщини напрямкам відповідно. Внесені тріщиною зміни амплітуди сигналу ВСП  $Z_{\text{ТР}}$  нормували відносно амплітуди імпедансу ВСП  $Z_{\text{ОК}}$  за встановлення на бездефектну частину ОК:  $Z'_{\text{ТР}} = \Delta Z / Z_{\text{ОК}}$ . Геометричні параметри нормували до діаметру ВСП  $D_c$ , тобто приведена довжина тріщини  $l'_{\text{ТР}} = l_{\text{ТР}} / D_c$ , а приведена координата  $y' = y / D_c$ . Розрахунок розподілу амплітуди по координаті  $Y$  проведено для алюмінієвого сплаву з ПЕП  $\sigma = 20$  МСм/м на робочій частоті 1 МГц. На рис. 11 наведено розподіл амплітуди сигналу вздовж тріщини вздовж її довжини за координатою  $y$  для різних співвідношень довжини тріщини до діаметру ВСП, а саме: для коротких тріщин з  $l'_{\text{ТР}} = 0,3$  (○) і  $l'_{\text{ТР}} = 1$  (●) та довгих тріщин з  $l'_{\text{ТР}} = 4$  (△) і  $l'_{\text{ТР}} = 5$  (▼). Отримані розпо-

діли амплітуди сигналів ВСП у такому широкому діапазоні довжин  $l'_{\text{ТР}}$  дають можливість наглядно підкреслити суттєвий вплив довжини тріщини на характер просторового розподілу амплітуди сигналу від тріщини. Для коротких тріщин розподіл сигналу має двогорбий симетричний характер з мінімумом при  $y = 0$  (ВСП над центром тріщини), який може досягати нуля для тріщин завдовжки  $l'_{\text{ТР}} < 0,3$ . Максимального значення сигнал ВСП досягає, коли коротка тріщина розташована безпосередньо під витками ВСП у зоні максимальних вихрових струмів. Наявність двох максимумів для коротких тріщин може інтерпретуватися як сигнали від двох окремих дефектів. Для довгих тріщин розподіл має один максимум, що відповідає положенню ВСП по центру тріщини. Подальше збільшення довжини тріщини від  $l'_{\text{ТР}} = 4$  вже не буде впливати на амплітуду сигналу, оскільки криві розподілу на цій ділянці фактично збігаються.

Аналіз наведених залежностей дозволяє зробити важливі висновки щодо вибору довжини тріщин під час розробки СЗ. Короткі тріщини створюють велику варіабельність сигналу ВСП під час сканування зони тріщини. Це унеможливає використання СЗ з короткими тріщинами для оцінки відтворюваності або повторюваності результатів вихрострумового контролю, оскільки забезпечення однакових умов відтворюваності результатів під час сканування зони тріщини різними операторами-дефектоскопістами фактично неможливе. Для оцінювання відтворюваності або повторюваності результатів контролю доцільно використовувати СЗ з довгими тріщинами, під час використання яких незначне зміщення не буде суттєво впливати на сигнал ВСП. У цьому випадку доцільно й суттєво простіше виготовити СЗ зразки з дефектом типу тріщина по всій ширині СЗ.

У той же час, СЗ з короткими дефектами типу

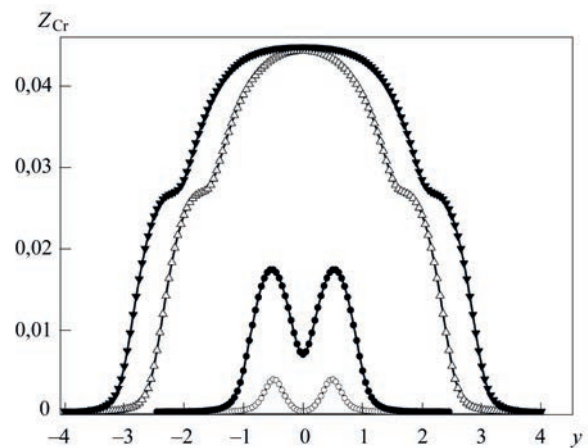


Рис. 11. Розподіл амплітуди сигналу вздовж тріщини за координатою  $y$  залежно від її довжини для коротких ( $l'_{\text{ТР}} = 0,3$  (○) і  $l'_{\text{ТР}} = 1$  (●)) та довгих ( $l'_{\text{ТР}} = 4$  (△) і  $l'_{\text{ТР}} = 5$  (▼)) тріщин

тріщина необхідно використовувати для оцінки границі чутливості по довжині тріщин, які необхідно виявляти у випадках, коли це важливо для поставленої дефектоскопічної задачі (див., наприклад, СЗ на рис. 3).

**6. Методика статистичного оцінювання параметрів стандартних зразків.** Для створення СЗ можливе застосування природних дефектів або дефектів, отриманих під час втомних випробувань (рис. 1). Але проблема полягає у визначенні параметрів таких дефектів, оскільки з достатньою точністю визначити їх шляхом прямих вимірювань можна тільки після руйнування СЗ, коли вони вже непридатні для метрологічного обслуговування приладів НК.

Відомі методики створення СЗ, де цього протиріччя позбуваються шляхом дослідження СЗ з руйнуванням частини відібраних довільно зразків і приписуванням незруйнованим зразкам значення контрольованого параметра, визначеного прямими вимірюваннями [42]. При цьому загальну кількість зразків і тих, що руйнуються, визначають емпірично, а номінальне значення параметра незруйнованим зразкам приписують за неперевіреним припущенням про однорідність всієї вибірки. Очевидно, що така методика є правомірною лише тоді, коли розкид значень контрольованого параметра для більшої кількості зразків невеликий. В інших випадках приписане СЗ значення контрольованого параметра недостатньо обґрунтоване, оскільки може відрізнятись від дійсного з невизначеною похибкою.

Одним із можливих варіантів комплексного вирішення проблеми є використання статистичного підходу, який вперше був використаний для створення СЗ для атестації і повірки приладу вимірювання коефіцієнта заповнення шихти у порошковому дроті [43, 44], що проводили згідно з нашим винаходом (А.Я. Тетерко, О.Л. Годовник, Ю.В. Поздняков, В.Н. Учанин. Способ настройки, калибровки и поверки прибора для контроля заполнения порошковой проволоки шихтой. Авт. свид. СССР № 1569694. Опубл. 07.06.90, Бюл. № 21). У подальшому статистичний спосіб атестації і повірки СЗ був розвинутий для інших задач НК, зокрема дефектоскопії (В.Н. Учанин, Ю.В. Поздняков, Ю.Н. Агапов. Способ получения меры для поверки приборов неразрушающего контроля. Авт. свид. СССР № 1753394. Опубл. 07.08.92, Бюл. № 29). Запропонований статистичний підхід дає оцінку похибки визначення контрольованого параметра незруйнованих СЗ, які залишили для використання, оскільки базуються на можливості використання для оцінювання СЗ робочого засобу

НК, який необхідно повірять. Зазначимо, що в дефектоскопії контрольованим параметром найчастіше є глибина дефектів. Для СЗ вихрострумової дефектоскопії з втомними тріщинами запропоновану методику можна подати як послідовність наступних операцій [45]:

1) На першому етапі відбирають сукупність із  $N$  зразків, якими можуть бути самі контрольовані вироби або їхні фрагменти з природними тріщинами. Матеріал і геометричні параметри відібраних зразків мають бути однаковими. Під час виготовлення СЗ з тріщинами методом втомних випробувань бажано відбирати зразки з однаковою кількістю циклів навантаження. Достатню для групи кількість  $N$  зразків можна визначити заздалегідь, аналізуючи розкид контрольованого параметра для зразків даного типу.

2) На наступному етапі використовують ВД, від якого вимагають тільки певної кореляції між параметрами вихідного сигналу та контрольованим параметром тріщини (наприклад, між амплітудою сигналу та глибиною тріщини). Вибирають робочу частоту такою, щоб існувала залежність сигналу від параметра тріщини (наприклад, глибини) у визначеному діапазоні змін. Для цього можна використати СЗ зі ШД.

3) Контролюють відібрані зразки за допомогою підготовленого ВД і реєструють його покази для кожного зразка. Після цього впорядковують зразки, розташовуючи їх за порядком зростання показів ВД.

4) Формують першу групу контрольованого параметра (глибини тріщини). Для цього із первісної сукупності  $N$  зразків відбирають  $W$  зразків, для яких значення показів приладу є близькими до мінімальних. Для більшості ВД індикаторного типу цього достатньо. Для кількісного контролю формують аналогічно групи зі зразків, що мають середні й максимальні покази ВД у діапазоні змін. За великої дисперсії значень показів приладу необхідно збільшити (наприклад, подвоїти) об'єм первісної вибірки зразків доти, поки із досліджуваної кількості зразків буде отримано по  $W$  однорідних зразків для кожної групи.

5) Далі у довільному порядку відбирають із кожної групи по  $Q$  із  $W$  зразків, дійсні значення  $X$  контрольованого параметра дефекту (глибини) визначають прямими методами (наприклад, за допомогою вимірювального мікроскопа) після їх руйнування.

6) Розраховують оцінку математичного сподівання досліджуваного параметра (глибини) для кожної групи однорідних зразків за формулою:

$$W_{ik} = 1 / Q \sum_{k=1}^Q X_{ik}, \text{ де } i - \text{ номер групи, } k = 1 \dots Q.$$

Цю оцінку приймають за дійсне значення контрольованого параметра, відтворюваного кожною групою мірою. Після цього значення математичного сподівання приписують відповідним СЗ групи на підставі раніше встановленої однорідності зразків, що в неї входять.

Для настроювання ВД можна використати будь-який із незруйнованих зразків. Для калібрування приладів у середині та у кінці діапазону використовують СЗ відповідної групи. Основну похибку приладу в точках калібрування визначає, в основному, похибка кожної з груп, під якою слід розуміти похибку відтворення групами приписаних їм значень. Цю похибку можна оцінити через похибку повірки групи, попередньо оціненої точними прямими методами. Суттєвими чинниками, що визначають цю похибку, є точність прямих вимірювань, кількість зразків, що складають групу, і ступінь їхньої ідентичності за контрольованим параметром. Запропоновану методику статистичної оцінки успішно використано для оцінювання СЗ з втомними тріщинами у трубчастих зразках [45].

## Висновки

Розвинуто методологію метрологічного забезпечення засобів вихрострумової дефектоскопії з використанням СЗ. Зокрема запропоновано класифікацію СЗ зі штучними дефектами та наведено відповідні приклади, що підтверджують правомірність запропонованої класифікації. В якості прикладу представлено конструкції складених багатозначних СЗ для імітації поверхневих і підповерхневих дефектів у циліндричних і плоских ОК. Також наведено конструкцію складеного СЗ і відповідний комплект СЗ, які імітують підповерхневу тріщину однакового розміру з чотирма значеннями глибини її залягання та експериментально досліджено відповідні сигнали ВСП подвійного диференціювання. Запропоновано спосіб виготовлення СЗ для імітації нахилених тріщин. Проаналізовано низку робіт, які розглядають можливі причини відмінності сигналів ВСП від природної тріщини та ШД. За допомогою розрахунків методом об'ємних інтегральних рівнянь показано, що основною причиною відмінності сигналів ВСП від природних втомних дефектів і ШД є їхня ширина (розкриття). Розглянуто вплив довжини тріщини на особливості сигналу ВСП параметричного типу, які необхідно враховувати під час вибору параметрів СЗ щодо довжини тріщини. Наведено статистично обґрунтований спосіб достовірного оцінювання параме-

трів СЗ з природними дефектами, який успішно використано для оцінювання зразків з втомними тріщинами у трубчастих зразках.

## Список літератури

1. Поліщук С.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. (2003) *Метрологія та вимірювальна техніка*. Львів, Бескид Біт.
2. Микитин Г.В. (2000) Особливості метрологічного забезпечення неруйнівного контролю. *Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту*, 5(3), 76–80.
3. Петрик В.Ф., Протасов А.Г. (2015) *Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі* (електр. ресурс). Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського.
4. Udpa, S.S., More P.O., et al. (2004) *Nondestructive testing handbook* (third edition). Vol. 5, *Electromagnetic testing*, American Society for NDT.
5. ДСТУ EN ISO 15548-2:2017. *Неруйнівний контроль. Обладнання для вихрострумового контролю. Частина 2. Визначення характеристик і верифікація перетворювачів* (EN ISO 15548-2:2013, IDT; ISO 15548-2:2013, IDT).
6. Шевченко О.І. (2022) *Метрологія. Терміни та пояснення*. Київ, ВАІТЕ.
7. Solomakha, R., Uchanin, V. (2024) Magnetic hysteresis analysis for non-destructive evaluation of aircraft structural steels. *Transaction in aerospace research*, 276(3), 1–12. DOI: <http://doi.org/10.2478/tar-2024-0013>
8. Uchanin, V.M., Ostash, O.P., Bychkov, S.A., Semenets, O.I., Derecha, V.Yu. (2021) Eddy current monitoring of aluminum alloy degradation during long-term operation of aircraft. *The Paton Welding J.*, 8, 45–51. DOI: <http://doi.org/10.37434/trwj2021.08.09>
9. *Про метрологію та метрологічну діяльність*. Закон України від 5.06.2014 р. № 1314-VII (зі змінами).
10. ISO/IEC Guide 99:2007. *International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms* (VIM).
11. Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение.
12. Билик Ю.З., Дорофеев А.Л. (1981) Электромагнитные дефектоскопы типа «Проба». *Дефектоскопия*, 6, 53–58.
13. Учанін В.М., Бичков С.А., Семенець О.І., Дереча В.Я., Александров С.А. (2022) Автогенераторні вихрострумові дефектоскопи для експлуатаційного контролю авіаційних конструкцій. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 22–29. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.04>
14. McMaster, R.C. McIntire, P. et al. (1986) *Nondestructive Testing Handbook*. Vol. 4: *Electromagnetic Testing (Eddy current, flux leakage and Microwave Nondestructive Testing)*. Second edition. USA, American Society for NDT.
15. Uchanin, V. (2024) Detecting and estimating local corrosion damages in long-service aircraft structures by the eddy current method with double-differential probes. *Transactions on aerospace research*, 275(2), 20–32. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0009>
16. Косовский Д.И., Шкарлет Ю.М., Хватов Л.А. и др. Имитатор для настройки дефектоскопов. Авт. свид. № 739391 СССР, МКИ G 01 N 27/86. Оpubл. 05.06.80; Бюл. № 21.
17. Вяхирев В.Г., Никольшин В.С., Олейников П.П. Имитатор для настройки электромагнитных дефектоскопов. Авт. свид. № 926586 СССР, МКИ G 01 N 27/90. Оpubл. 07.05.82; Бюл. № 17.
18. Вяхирев В.Г., Никольшин В.С., Олейников П.П. Настроечный имитатор для вихретоковых дефектоскопов (его варианты). Авт. свид. № 1006992 СССР, МКИ G 01 N 27/90. Оpubл. 23.03.83; Бюл. № 11.
19. Mook, G., Uchanin, V., Lysenko, Ju. (2024) Studies of eddy current probes for inspection of aluminum alloy structure welds using smartphone-based flaw detector. *The Paton Welding J.*, 12, 42–48. DOI: <http://doi.org/10.37434/trwj2024.12.07>
20. Datsishin, O.P., Marchenko, G.P., Panasyuk, V.V. (1994) Theory of crack growth in rolling contact. *Materials Science*, 29(4), 373–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00566446>
21. Uchanin, V.M. (2025) Specific features of double-differentiation eddy current probe signals from inclined

- cracks. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 61(2), 139–144. DOI: <https://doi.org/10.15407/pcmm2025.02.139>
22. Hagemaijer, D.A., Register, J.A. (1990) Mock eddy current demonstration: cracks versus notches. *Materials Evaluation*, 48, 50–54.
  23. Тетерко А.Я., Назарчук З.Т. (2004) *Селективна вихрострумова дефектоскопія*. Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
  24. Rummel, W.D., Moulder, J.C., Nakagawa, N. (1991) The comparative responses of cracks and slots in eddy current measurements. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 10A, ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, pp. 277–283.
  25. Erdman, J. (1991) Correlation of eddy current response from EDM notches and tight fatigue cracks in ferromagnetic space shuttle RSRM components. *Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation*, 10A, ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, pp. 285–290.
  26. Beissner, R.E. (1994) Slots vs. cracks in eddy current NDE. *J. of Nondestructive Evaluation*, 13(4), 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00742583>
  27. Randle, W.R., Woody, B.D. (1991) Caution about simulated cracks in steel for eddy current testing. *Materials Evaluation*, 1, 44–48.
  28. Uchanin, V.M., Zhenirovs'kyi, M.I. (2008) Effect of the relief of crack surface on the signal of an eddy current converter. *Materials Science*, 44, 274–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-008-9060-8>
  29. Усов В.В., Шкатуляк Н.М. (2005) Фрактальна природа крихких зламіт металу. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 1, 58–62.
  30. Баренблатт Г.И., Ботвина Л.Р. (1986) Методы подобия в механике и физике разрушения. *Физико-химическая механика материалов*, 1, 57–62.
  31. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксагоев А.А. (1994) *Синергетика и фракталы в материаловедении*. Москва, Наука.
  32. Гринченко В.Т., Мацыпура В.Т., Снарский А.А. (2005) *Введение в нелинейную динамику. Хаос и фракталы*. Київ, Наукова думка.
  33. Dunbar, W.S. (1985) The volume integral method of eddy current modeling. *J. of Nondestructive Evaluation*, 5(1), 9–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00568758>
  34. Sabbagh, H.A., Murphy, R.K., Sabbagh, E.H., Aldrin, J.C., Knopp, J.S. (2013) *Computational electromagnetics and model-based inversion – a modern paradigm for eddy-current nondestructive evaluation*. New York, Springer.
  35. ДСТУ ГОСТ ISO 5725-1:2005. *Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 1. Основні положення та визначення*. Київ, Держспоживстандарт.
  36. Беда П.И., Выборнов Б.И., Глазков Ю.А., Луцько С.П., Самойлович Г.С., Шелихов Г.С. (1976) *Неразрушающий контроль металлов и изделий*: Справочник (под ред. Г.С. Самойловича). Москва, Машиностроение.
  37. Беда П.И. (1970) Исследование сигнала накладного датчика в зависимости от изменения размеров и расположения дефектов типа трещин. *Дефектоскопия*, 1, 62–68.
  38. Беда П.И., Путников Ю.Г. (1994) Моделирование сигналов накладного преобразователя, вызванных плоским дефектом произвольной формы. *Дефектоскопия*, 2, 19–26.
  39. Auld, B.A., McFetridge, G., Riaziat, M., Jefferies S. (1985) Improved probe-flaw interaction modeling, inversion processing, and surface roughness clutter. In: *Thompson, D.O., Chimenti, D.E. (eds). Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 4A, 623–634. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9421-5\\_69](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9421-5_69)
  40. Moulder, J.C., Gerlitz, J.C. (1986) Semi-elliptical surface flaw EC interaction and inversion: experiment. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 5A, 395–402.
  41. Uchanin, V.M. (2007) Specific features of the space distribution of the signal of an eddy-current converter caused by cracks of different lengths. *Materials Science*, 43, 591–595. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0068-2>
  42. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. (1969) *Индукционная толщинометрия*. Москва, Энергия.
  43. Походня И.К., Шлепаков В.Н., Максимов С.Ю., Рябцев И.А. (2010) Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой. *Автоматическая сварка*, 12, 34–42.
  44. Панасюк В.В., Тетерко А.Я., Походня И.К. и др. (1975) Непрерывный контроль заполнения шихтой порошковой проволоки в процессе ее изготовления. *Автоматическая сварка*, 5, 48–49.
  45. Uchanin, V.N., Ostash, O.P. (2002) Tubular samples for complex evaluation of heat exchanger tube material by fracture mechanic and nondestructive test methods. *Proc. 8<sup>th</sup> Europ. Conf. for NDT*. Barcelona ([www.ndt.net](http://www.ndt.net)).

## References

1. Polishchuk, E.S., Dorozhovets, M.M., Yatsuk, V.O. et al. (2003) *Metrology and measuring equipment*. Lviv, Beskyd Bit [in Ukrainian].
2. Mykytyn, G.V. (2000) Peculiarities of metrological support of non-destructive testing. *Visnyk Ternop. DTU*, 5(3), 76–80 [in Ukrainian].
3. Petryk, V.F., Protasov, A.G. (2015) *Metrology, standardization and certification in non-destructive testing*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
4. Udpa, S.S., More P.O., et al. (2004) *Nondestructive testing handbook* (3rd Ed.). Vol. 5, *Electromagnetic Testing*, American Society for NDT.
5. EN ISO 15548-2:2013. Non-destructive testing – Equipment for eddy current examination – Pt 2: Probe characteristics and verification (ISO 15548-2:2013).
6. Shevchenko, O.I. (2022) *Metrology. Terms and explanations*. Kyiv, VAITE [in Ukrainian].
7. Solomakha, R., Uchanin, V. (2024) Magnetic hysteresis analysis for non-destructive evaluation of aircraft structural steels. *Transact. in Aerospace Research*, 276(3), 1–12. DOI: <http://doi.org/10.2478/tar-2024-0013>
8. Uchanin, V.M., Ostash, O.P., Bychkov, S.A., Semenets, O.I., Derecha, V.Yu. (2021) Eddy current monitoring of aluminum alloy degradation during long-term operation of aircraft. *The Paton Welding J.*, 8, 45–51. DOI: <http://doi.org/10.37434/trpwj2021.08.09>
9. *On metrology and metrological activities*. Law of Ukraine dated 5.06.2014, No. 1314-VII (as amended) [in Ukrainian].
10. ISO/IEC Guide 99:2007. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms* (VIM).
11. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Y.G. (1980) *Electromagnetic defectoscopy*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
12. Bilik, Y.Z., Dorofeev, A.L. (1981) Electromagnetic flaw detectors of the Proba type. *Defektoskopiya*, 6, 53–58 [in Russian].
13. Uchanin, V.M., Bychkov, S.A., Semenets, O.I., Derecha, V.Ya., Aleksandrov, S.A. (2022) Self-generator eddy current flow detectors for operational control of aircraft structures. *Tekh. Diahnost. ta Neruinivnyi Kontrol*, 3, 22–29 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/dnk2022.03.04>
14. McMaster, R.C. McIntire, P. et al. (1986) *Nondestructive Testing Handbook*. Vol. 4: *Electromagnetic Testing (Eddy current, flux leakage and Microwave Nondestructive Testing)*. Second edition. USA, American Society for NDT.
15. Uchanin, V. (2024) Detecting and estimating local corrosion damages in long-service aircraft structures by the eddy current method with double-differential probes. *Transact. on Aerospace Research*, 275(2), 20–32. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0009>
16. Kosovsky, D.Y., Shkarlet, Y.M., Khvatov, L.A. et al. *Simulator for setting defectoscopes*. USSR Auth. Certificate 739391, Inc. Cl. G 01 N 27/86. Publ. 06.05.80 [in Russian].
17. Vyakhirev, V.G., Nikulshin V.S., Oleinikov P.P. *Simulator for setting up electromagnetic flaw detectors*. USSR Auth. Certificate 926586, Int. Cl. G 01 N 27/90. Publ. 07.05.82 [in Russian].
18. Vyakhirev, V.G., Nikulshin, V.S., Oleinikov, P.P. *Tuning simulator for eddy current defectoscopes (its variants)*. USSR Auth. Certificate 1006992, Int. Cl. G 01 N 27/90. Publ. 23.03.83 [in Russian].
19. Mook, G., Uchanin, V., Lysenko, Ju. (2024) Studies of eddy current probes for inspection of aluminum alloy structure welds using smartphone-based flaw detector. *The Paton Welding J.*, 12, 42–48. DOI: <http://doi.org/10.37434/trpwj2024.12.07>
20. Datsishin, O.P., Marchenko, G.P., Panasyuk, V.V. (1994) Theory of crack growth in rolling contact. *Mater. Sci.*, 29(4), 373–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00566446>

21. Uchanin, V.M. (2025) Specific features of double-differentiation eddy current probe signals from inclined cracks. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 61(2), 139–144. DOI: <https://doi.org/10.15407/pcmm2025.02.139>
22. Hagemaijer, D.A., Register, J.A. (1990) Mock eddy current demonstration: Cracks versus notches. *Materials Evaluation*, 48, 50–54.
23. Teterko, A.Ya., Nazarchuk, Z.T. (2004) *Selective eddy current flaw detection*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
24. Rummel, W.D., Moulder, J.C., Nakagawa, N. (1991) The comparative responses of cracks and slots in eddy current measurements. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 10A, Ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 277–283.
25. Hartman, J. (1991) Correlation of eddy current response from EDM notches and tight fatigue cracks in ferromagnetic space shuttle RSRM components. *Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation*, 10A, Ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 285–290.
26. Beissner, R.E. (1994) Slots vs. cracks in eddy current NDE. *J. of Nondestructive Evaluation*, 13(4), 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00742583>
27. Randle, W.R., Woody, B.D. (1991) Caution about simulated cracks in steel for eddy current testing. *Materials Evaluation*, 1, 44–48.
28. Uchanin, V.M., Zhenirovs'kyi, M.I. (2008) Effect of the relief of crack surface on the signal of an eddy current converter. *Mater. Sci.*, 44, 274–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-008-9060-8>
29. Usov, V.V., Shkatuliak, N.M. (2005) Fractal nature of brittle metal fractures. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 1, 58–62 [in Ukrainian].
30. Barenblatt, G.I., Botvyna, L.R. (1986) Similarity methods in the mechanics and physics of destruction. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 1, 57–62 [in Russian].
31. Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.Zh., Oksagoev, A.A. (1994) *Synergetics and fractals in materials science*. Moscow, Nauka [in Russian].
32. Grynchenko V.T., Matsypura V.T., Snarsky A.A. (2005) *Introduction to nonlinear dynamics. Chaos and fractals*. Kyiv, Naukova dumka [in Russian].
33. Dunbar, W.S. (1985) The volume integral method of eddy current modeling. *J. of Nondestructive Evaluation*, 5(1), 9–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00568758>
34. Sabbagh, H.A., Murphy, R.K., Sabbagh, E.H., Aldrin, J.C., Knopp, J.S. (2013) *Computational electromagnetics and model-based inversion – A modern paradigm for eddy-current nondestructive evaluation*. New York, Springer.
35. DSTU GOST ISO 5725-1:2005: *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Pt 1. Basic provisions and definitions*. Kyiv, Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
36. Beda, P.Y., Vyborno, B.Y., Glazkov, Y.A. et al. (1976) *Non-destructive control of metals and products: Handbook*. Ed. by G.S. Samoilovich. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
37. Beda, P.I. (1970) Investigation of the signal of an overhead sensor in relation to changes in the size and location of crack-type defects. *Defektoskopiya*, 1, 62–68 [in Russian].
38. Beda, P.I., Putnikov, Y.G. (1994) Modeling of overhead transducer signals caused by a planar defect of arbitrary shape. *Defektoskopiya*, 2, 19–26 [in Russian].
39. Auld, B.A., McFetridge, G., Riaziat, M., Jefferies S. (1985) Improved probe-flaw interaction modeling, inversion processing, and surface roughness clutter. In: *Eds. by D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 4A, 623–634. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9421-5\\_69](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9421-5_69)
40. Moulder, J.C., Gerlitz, J.C. (1986) Semi-elliptical surface flaw EC interaction and inversion: Experiment. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 5A, 395–402.
41. Uchanin, V.M. (2007) Specific features of the space distribution of the signal of an eddy-current converter caused by cracks of different lengths. *Mater. Sci.*, 43, 591–595. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0068-2>
42. Dorofeev, A.L., Nikitin, A.I., Rubin, A.L. (1969) *Induction thickness measurement*. Moscow, Energiya [in Russian].
43. Pokhodnya, I.K., Shlepakov, V.N., Maksimov, S.Yu., Ryabtsev, I.A. (2010) Research and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute in the field of electric arc welding and surfacing using flux-cored wire (Review). *The Paton Welding J.*, 12, 34–42.
44. Panasyuk, V.V., Teterko, A.Ya., Pokhodnya, I.K. et al. (1975) Continuous control of the filling of a flux-cored wire charge in the process of its manufacture. *Avtomaticheskaya Svarka*, 5, 48–49 [in Russian].
45. Uchanin, V.N., Ostash, O.P. (2002) Tubular samples for complex evaluation of heat exchanger tube material by fracture mechanic and nondestructive test methods. In: *Proc. of 8<sup>th</sup> Europ. Conf. for NDT*. Barcelona (www.ndt.net).

## METHODOLOGY OF USING STANDARD SPECIMENS WITH DEFECTS FOR EDDY CURRENT INSPECTION: CLASSIFICATION, TYPICAL EXAMPLES, SIGNALS RESEARCH AND STATISTICAL METHOD FOR PARAMETERS ASSESSMENT

V.N. Uchanin

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: vuchanin@gmail.com

The work was aimed at development of a methodology for using reference standards (RS) with defects to ensure high reliability and repeatability of eddy current flaw detection results. In particular, a classification of reference standards with defects is proposed and relevant examples are given to confirm the validity of the proposed classification. As an example, designs of composite multi-valued reference standards are presented for simulating surface and subsurface defects in cylindrical and flat objects under eddy current testing. In particular, new designs of composite reference standards are presented that simulate defects with different depths of occurrence. A corresponding set of RSs is presented that simulate a subsurface crack of the same size with 4 values of its depth of occurrence, and the corresponding double-differentiation eddy current probe signals are experimentally investigated. A proposed method for manufacturing reference standards for simulating inclined cracks is presented. A number of studies are analyzed that consider possible reasons for the difference between eddy current probe signals from a natural crack and artificial defects. By means of calculations using the method of volume integral equations, it is shown that the main reason for the difference between eddy current probe signals from natural fatigue defects and artificial defects is their width (opening). The influence of the crack length on the features of the parametric type eddy current probe signal is considered, which must be taken into account when choosing the length of the cracks of the reference standards to ensure the sensitivity threshold and reproducibility of the inspection results. A statistically based method for reliable estimation of the parameters of the reference standards with natural defects is presented, which has been successfully used to evaluate reference standards with fatigue cracks in tubular specimens. 45 Ref., 10 Fig.

*Keywords: reference standard, classification, eddy current method, non-destructive testing, eddy current probe, artificial defect, defect parameters*

Отримано 03.06.25

Отримано у перекладі 24.07.25

Прийнято 27.08.25

# ОЦІНКА ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АЕ

С.А. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, В.В. Долиненко, О.М. Гур'янов

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

У статті розглянуто підходи до оцінки якості як самого процесу зварювання, так і дефектності, що при цьому виникає. Показано перспективи використання методу акустичної емісії (АЕ) для контролю процесу зварювання та оцінки стану зварних з'єднань. Проаналізовано результати попередніх досліджень АЕ під час проведення випробувань металевих зразків на статичний розтяг до повного руйнування та під час процесу зварювання з використанням системи технічної діагностики ЕМА. Показано високу чутливість методу АЕ до виникнення та розвитку дефектів. Визначено перспективні завдання розвитку контролю зварних з'єднань із застосуванням сучасних АЕ систем, автоматизації процесу контролю та прийняття рішень щодо якості виконання зварювання та визначення дефектності зварних з'єднань. Бібліогр. 19, табл. 1, рис. 2.

*Ключові слова:* зварювання, якість, дефектність, неруйнівний контроль, акустична емісія, залишкові напруження

**Вступ.** Широке застосування процесу зварювання в різних галузях промисловості обумовлено високим ступенем його механізації, роботизації, автоматизації і, як наслідок, високою продуктивністю та низькою собівартістю. Незважаючи на суттєве вдосконалення зварювальних технологій [1], проблема запобігання появі дефектів і руйнуванню зварних з'єднань залишається актуальною. Оскільки ресурси для вдосконалення класичних методів оцінювання дефектності зварних з'єднань небезмежні, створення автоматизованих систем моніторингу процесу зварювання для виявлення дефектів безпосередньо в процесі зварювання дозволить вийти за рамки існуючих обмежень неруйнівного контролю цього технологічного процесу.

Найхарактернішим для промисловості, насамперед важкого машинобудування та залізничного транспорту, є дугове зварювання (ДЗ) [2]. Основна увага при автоматизованому та роботизованому зварюванні приділяється контролю формування наступних дефектів: пористість, подрізи, включення, надмірна асиметрія кутових швів, непровари, надмірні бризки та несплавлення [3, 4]. Контактне точкове зварювання (КТЗ) широко використовують в автомобільній промисловості. Для КТЗ найкритичнішими є такі дефекти: повний або частковий непровар через неякісні електроди, тріщини внаслідок завищеного струму або неякісно зачищені поверхні деталей, розриви при зварюванні внапуск через близькість зварної точки до краю деталі, внутрішній виплеск внаслідок надвеликого струму або надто довгого електричного імпульсу, зовнішній виплеск внаслідок недостатнього стискання деталей, вм'я-

тини від електрода на поверхні виробів, зміщення ядра, тріщини зовнішні та внутрішні [5, 6].

Для контролю якості технологічних процесів, зокрема й для оцінювання якості ДЗ та КТЗ, оцінювання стану технічних об'єктів у процесі експлуатації активно використовуються методи НК. Приблизні оцінки різним методам НК щодо виявлення дефектів у виробках із різних матеріалів і різного призначення такі: радіаційний – 3, акустичний – 5, вихрострумний – 3, магнітний – 3, капілярний – 4, тепловий – 3, оптичний – 0, радіохвильовий – 0 (де 5 – відмінно, 4 – добре, 3 – задовільно, 0 – незадовільно) [7].

Якість зварного з'єднання та його дефектність не є тотожними, хоча й можуть бути пов'язані між собою. Наприклад, зварний шов, виконаний технологічно бездоганно, без внутрішніх або поверхневих дефектів, може бути при цьому неякісним через відхилення від запланованої траєкторії руху дуги. І, навпаки, шов з певними дефектами може влаштувати, і виріб з ним може бути використаний, якщо наявні дефекти не вплинули суттєво на показники міцності шва та виробу в цілому. Тому, ставлячи завдання неруйнівного контролю зварного шва, треба чітко розуміти, які показники треба отримувати й про що саме вони свідчитимуть. Контроль зварного шва (з'єднання) після проведення зварювання є простішим у виконанні, але автоматизований контроль безпосередньо в процесі зварювання можна вважати ефективнішим. Розглянемо детальніше застосування методу АЕ з цією метою.

**Метод та засоби АЕ.** Як відомо, акустична емісія (АЕ) – це явище генерації хвиль напружень,

Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>, Долиненко В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8001-1337>, Гур'янов О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9566-1706>

© С.А. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, В.В. Долиненко, О.М. Гур'янов, 2025

викликаних раптовою перебудовою в структурі металу [8, 9]. Незважаючи на те, що теоретичні підходи щодо застосування АЕ для контролю та моніторингу процесів зварювання ще до кінця не сформовані, численні прикладні дослідження ДЗ [10] дозволяють запропонувати гіпотезу про зв'язок характеру АЕ з формуванням у зварному з'єднанні таких дефектів або недоліків технологічного процесу, як: пористість, недостатнє проплавлення, паразитні включення, підрізи, гарячі тріщини, непровари, надмірне розбризкування металу електрода та ін. При виконанні КТЗ застосування АЕ контролю дозволить виявляти такі дефекти, як: повний або частковий непровар, тріщини, розриви, внутрішній або зовнішній виплеск, вм'ятини від електрода, зміщення литого ядра та ін.

При використанні методу АЕ електричні сигнали формуються спеціальними високочутливими широкосмуговими датчиками, призначеними для перетворення хвиль напружень, які генерують як сам процес зварювання, так і дефекти, що виникають при ньому. Потім вони підсилюються, реєструються мікропроцесорною апаратурою та піддаються подальшій обробці та інтерпретації. Спеціально розроблені датчики, з урахуванням зміни температури під час зварювання, встановлюють безпосередньо в зоні шва або максимально близько до неї.

На даний час спостерігається інтенсивний розвиток методу та засобів АЕ, що пов'язано з появою недорогих швидкодіючих мікропроцесорів та радіокомпонентів, які мають апертурний час порядку наносекунд. Це дозволяє виконувати складну апаратну обробку імпульсних сигналів АЕ та визначати наступні параметри сигналу: координати джерела імпульсу ( $x, y, z$ ); час наростання імпульсу; амплітуда піку імпульсу; енергія імпульсу; тривалість імпульсу; кількість періодів несучої частоти в імпульсі; поріг фіксації імпульсу; час фіксації імпульсу; частота формування імпульсів. Далі з обсягу параметрів імпульсів АЕ можна отримати ймовірнісну модель (можливо, й за допомогою штучного інтелекту), яка передбачатиме формування дефектів у зварному з'єднанні.

**Метою** даного дослідження є створення АСУ процесом зварювання з використанням АЕ апаратури з відповідним математичним і програмним забезпеченням, а також із аналізом характеристик процесу зварювання, що дозволить отримувати важливу інформацію щодо характеру виконання технологічної операції та надавати об'єктивну оцінку якості отриманого зварного з'єднання. Об'єктом контролю в такій постанов-

ці задачі виступає не сам виріб, що зварюється, а процес зварювання та його результати.

**Виклад основного матеріалу.** Успішне застосування для контролю якості зварних швів у режимі реального часу системи АЕ з автоматизованою системою прийняття рішень і використанням алгоритму машинного навчання, до якої надходять дані АЕ і параметри зварювання, а задіяні алгоритми послідовності тегів і логістичної регресії досягають точності прогнозування 91,18 і 82,35 % відповідно порівняно з металографічним аналізом, наведено в [11].

Ефективність застосування методу АЕ для контролю вже виконаних зварних з'єднань показують результати проведених авторами досліджень АЕ при руйнуванні зварних зразків [12] і під час процесу зварювання [13] з використанням АЕ систем ЕМА, у яких реалізовано алгоритми прогнозу руйнівного навантаження та залишкового ресурсу. Показано високу чутливість методу АЕ до виникнення та розвитку дефектів. При випробуваннях у процесі зварювання зареєстровано значну кількість подій АЕ з високими амплітудами. Система АЕ зареєструвала незначні пошкодження типу дислокаційних зсувів або подібні до них. Це означає, що значніші дефекти також можуть бути зафіксовані, але потрібно розробити та застосувати фільтри й додаткові методи обробки для відбраковування отриманих сигналів АЕ за певними критеріями, виділяючи з них ті події, які відповідають наявності дійсно небезпечних дефектів. Це вимагає додаткових досліджень. Показниками, які могли б використовуватися для контролю дефектності при виконанні зварювання, можуть слугувати: амплітуда сигналів, кількість імпульсів, частотний спектр, температура фазових перетворень (динаміка зміни температури пришовної зони), час, за який зникає акустична активність після завершення зварювання, тощо.

Проведені експериментальні дослідження АЕ при руйнуванні зразків після виконання різних типів зварювання та проведення АЕ контролю процесу зварювання на статичний розтяг показали наступне.

За наявності у випробуваних зразках зварного з'єднання воно й є основним джерелом АЕ. Кількість подій АЕ у зразках зі зварним з'єднанням, як правило, перевищує кількість подій АЕ у суцільних зразках. Процес руйнування зварних зразків характеризується більш рівномірною за часом активністю АЕ для зразків з найбільшим об'ємом матеріалу зварного з'єднання і менш рівномірною – для зразків з найменшим об'ємом матеріалу зварного з'єднання. Найбільшим об'ємом матеріалу зварного з'єднання відповідають максимальні кількість і амплітуди подій АЕ. Для зразків зі зварними з'єднаннями характерна більша різноманітність одер-

жуваної картини часового розподілу АЕ, амплітудних та інших характеристик, ніж для зразків без зварювання, що свідчить про вплив якості зварного з'єднання на кількість внесених ним у матеріал пошкоджень. Активність АЕ залежить від рівня пошкодженості матеріалу, спричиненої зварюванням. Прогноз руйнівного навантаження для більшості зразків дав задовільні показники. Для зразків, що під час випробувань піддаються позацентровому розтягу, прогноз руйнування дав дещо завищені показники руйнівного навантаження. Це слід враховувати при випробуваннях конструкцій, де наявний такий спосіб навантаження зварного з'єднання. Параметром, який може слугувати характеристикою пошкодження металу зварного з'єднання, є сума подій АЕ. Кут перегину кривої суми подій АЕ дозволяє відрізнити випробування суцільного металу від металу зі зварним з'єднанням. Наявність можливості оцінити об'єм задіяного під час зварювання металу може підвищити достовірність використання даної характеристики. На рис. 1 показано графіки АЕ випробувань зразків зі сталі 17ГС без зварного з'єднання (а) та за його наявності (б). Лініями 1 побудовано стовпчастий графік амплітуд подій АЕ (А, мВ), 2 – лінійний графік навантаження на зразок (Р, кг), 3 – точковий графік параметру «Райс тайм» (R, мкс), який характеризує час наростання сигналу до максимуму, 4 – лінійний графік сумарного числа подій АЕ (N, безрозмірний). На осі абсцис позначено час від початку випробування.

Чітко видно, що крива деформування Р, крива суми подій N та розподіл амплітуд А у часі суттєво відрізняються для суцільного зразка та зразка зі зварним з'єднанням. Це типово для випробувань усіх зразків, що підтверджує чутливість методу АЕ до характеру виникнення та розвитку дефектів за різних умов.

Слід звернути увагу на таке явище як виникнення залишкових напружень [13] внаслідок зварювання. Отримані розрахунковим шляхом графіки

залишкових напружень у пластині при КТЗ для матеріалу з модулем пружності 210000 МПа та коефіцієнтом поперечної деформації 0,3 при наступних початкових даних: товщина пластини  $h = 1$  см, відстань від поверхні  $z_0 = 1$  мм, наведено на рис. 2 [14].

Задані параметри є характерними для деяких високоміцних сталей, наприклад, 15Х2ГМФ та 15Х2НМФА, границя плинності яких дорівнює або перевищує 600 МПа. Як видно з графіку, напруження в зоні незначного радіусу, наближеній до центру зварної точки, досягають значень, порівнянних із зазначеними. У даному випадку метод АЕ теоретично можна використати для встановлення дефектності зварного з'єднання, пошкодженого за рахунок надвисоких залишкових напружень. Якщо дефекти будуть виявлені ще на стадії зварювання, то це може надати значний економічний ефект, оскільки на практиці при виникненні у виробі значних залишкових напружень виконують роботи з їх зниження. За наявності у виробі небезпечних дефектів він буде відбракований ще на стадії зварювання, й необхідність додаткової обробки відпаде.

Попередній аналіз результатів проведених робіт дозволив сформулювати наступні висновки щодо практичного застосування АЕ контролю та моніторингу процесів зварювання:

- визначено дві основні проблеми АЕ контролю процесу зварювання: недостатня роздільна здатність АЕ обладнання, яке використовували для отримання АЕ інформації, та високий рівень шумів під час зварювання;

- системи технічної діагностики ЕМА, які використовують для проведення досліджень в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, мають вищу, ніж типові АЕ системи, роздільну здатність (часова апертура складає близько 125 нс) і кілька ступенів відбракування шумів (аналоговий і цифровий у приладі та програмний), що надає додаткові можливості отримати якісніші результати при випробуваннях. За технічними характеристиками вони мають певні пере-

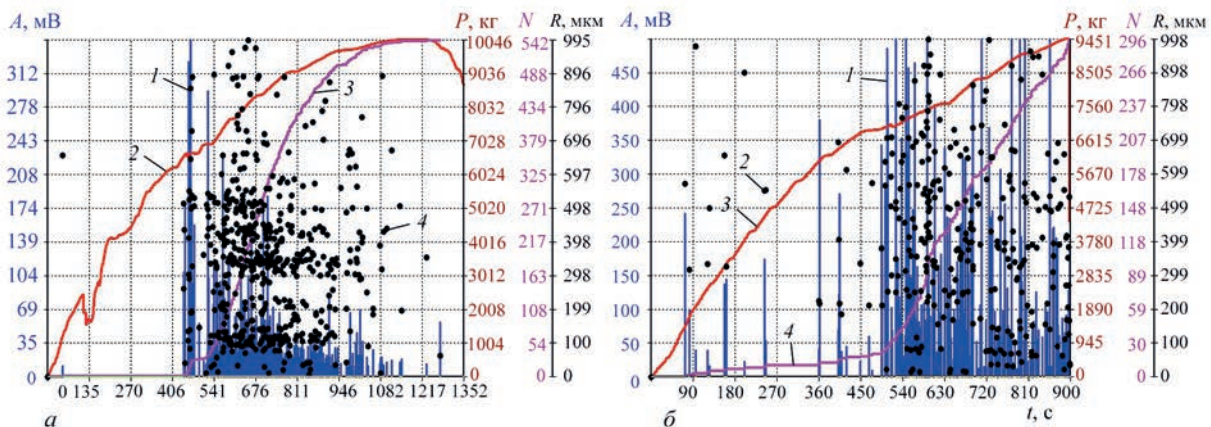


Рис. 1. Графіки АЕ випробувань зразків зі сталі 17ГС без зварного з'єднання (а) та за його наявності (б) з'єднанням

Технічні характеристики АЕ систем

| Прилад (виробник)                | Частотний діапазон, МГц | Частота дискретизації, МГц | Часова роздільна здатність, нс | Амплітудна дискретизація, біт | Динамічний діапазон, дБ |
|----------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| PCI-2 (Physical Acoustics Corp.) | 0,02...1                | 10                         | 100                            | 12                            | 80                      |
| AMSY-6 (Vallen Systeme)          | 0,02...2                | 100                        | 10                             | 14                            | 75                      |
| VS-150 (Vallen Systeme)          | 0,02...2                | 40                         | 25                             | 8                             | 60                      |
| ZEDO (DAKEL)                     | 0,02...1,5              | 20                         | 50                             | 12                            | 65                      |
| PCI-2M (MISTRAS Group)           | 0,02...1                | 10                         | 100                            | 12                            | 80                      |

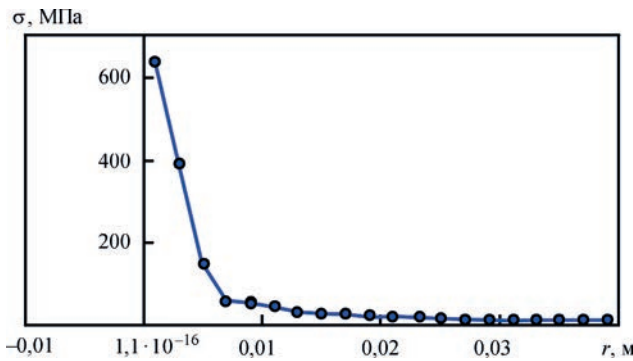


Рис. 2. Розраховані напруження  $\sigma$ , на глибині 1 мм залежно від відстані до зварної точки

ваги перед наведеними у таблиці характеристиками розповсюджених у світі АЕ систем [15–19] (зокрема динамічний діапазон 100 дБ, що дозволяє відстежувати сигнали АЕ незначної амплітуди навіть в умовах високої зашумленості об’єктів контролю).

Сформулюємо основні завдання для створення автоматизованої системи визначення дефектності зварних з’єднань:

- визначення наявності дефектів методом АЕ;
- дослідження взаємозв’язків між дефектністю зварного з’єднання та сигналами АЕ, що супроводжують процеси зварювання;
- створення методики визначення методом АЕ технічного стану об’єктів зі зварними з’єднаннями під час випробувань перед введенням в експлуатацію;
- розроблення нових та вдосконалення існуючих приладів і відповідного математичного та програмного забезпечення, що дозволить автоматизувати процес оцінки стану зварних з’єднань у реальному часі з кількісними показниками якості та визначити параметри зварювання.

Виконання цих завдань дозволить:

- оптимально вибрати параметри АЕ, які надалі будуть використані для оцінки дефектності зварних з’єднань з урахуванням особливостей процесу зварювання;
- підвищити ефективність застосування методу АЕ для контролю процесу зварювання та відстеження якості формування зварного шва та пришовної зони;
- визначити інформаційні параметри АЕ шляхом аналізу експериментальних даних, отриманих

під час процесу зварювання, та оцінити результати за допомогою додаткових методів перевірки.

Для проведення подальших досліджень необхідно адаптувати обладнання та математичне забезпечення АЕ систем, створити методики вимірювання акустичної активності матеріалів і визначення діапазону відхилень процесу зварювання від оптимального. Кінцевою метою наукових досліджень має стати створення методології автоматизованого визначення якості виконання зварювання в режимі онлайн. Також має бути розроблена методика визначення небезпечності дефектів зварювання за їхніми акустичними характеристиками. Результати, отримані з використанням методу АЕ, необхідно порівняти з такими, що отримані іншими методами НК. Далі слід розробити ТЗ на прототип електронного пристрою контролю зварних з’єднань і створити макет пристрою для оцінки дефектності зварних з’єднань.

**Висновки**

Застосування систем АЕ контролю та моніторингу в автоматизованих системах керування процесом зварювання при виготовленні промислових виробів підвищеної небезпеки дозволить забезпечити як своєчасне виявлення та усунення дефектів зварювання, так і збільшення кількості бездефектних виробів.

**Список літератури**

1. Chidambaresh, S., Radhika, N., Deepak Kumar, N.H., Sivasaalam, B. (2023) A review on welding techniques: properties, characterisations and engineering applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 10(2), 1126–1181. DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2186638>
2. Савуляк В.І., Осадчук А.Ю. (2004) *Ручне дугове зварювання. Навчальний посібник*. Вінниця, ВНТУ.
3. Abed Fares Ali (2021) Defects, types and classification of the advance welding process-based industry: A review. *J. of Mechanical Engineering Research and Developments*. [https://www.researchgate.net/publication/359554366\\_Defects\\_types\\_and\\_classification\\_of\\_the\\_advance\\_welding\\_process\\_based\\_industry\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/359554366_Defects_types_and_classification_of_the_advance_welding_process_based_industry_A_review).
4. Abdul Kadir, M.H., Asmelash, M., Azhari, A. (2020) Investigation on welding distortion en stainless steel sheet using gas tungsten arc welding process. *Materials Today: Proceedings*, 46(4), 1674–1679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.264>
5. Літовченко П.І., Іванова Л.П. (2016) *Технологія конструкційних матеріалів. Навчальний посібник*. Харків, НА НГУ.
6. Koçak O.O. (2003) *Defect assessment of spot welds*. A thesis submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University. <https://hdl.handle.net/11511/13975>
7. Шаповалов Е.В., Галаган Р.М., Клишар Ф.С., Запара В.И. (2013) Современные методы и средства неразрушающе-

- го контролю сварного з'єднання, виконаного контактною точечною сваркою (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 10–22.
8. Андрейків О.Є., Скальський В.Р., Сулим Г.Т. (2007) *Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування*. Львів, Сполом.
  9. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение*. Киев, Индпром.
  10. Yusof, M.F.M., Ishak, M., Ghazali, M.F. (2021) Acoustic methods in real-time welding process monitoring: Application and future potential advancement. *J. Mech. Eng. Sci.*, **15**(4), 8490–8507. DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.15.4.2021.03.0669>
  11. Asif, K., Zhang, L., Derrible, S. et al. (2022) Machine learning model to predict welding quality using air-coupled acoustic emission and weld inputs. *J. of Intelligent Manufacturing*, **33**, 881–895. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01667-x>
  12. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А., Бойчук О.І., Овсієнко М.А. (2021) Метод акустичної емісії при оцінюванні стану зварних швів та їх службових властивостей. Частина 1. Вплив типу зварного з'єднання на акустичну емісію. *Автоматичне зварювання*, **2**, 52–59. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.09>
  13. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А., Бойчук О.І., Овсієнко М.А. (2021) Метод акустичної емісії при оцінюванні стану зварних швів та їх службових властивостей. Частина 2. Практичне застосування. *Автоматичне зварювання*, **4**, 36–48. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.04.06>
  14. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Boichuk, O.I., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A., Voloshkevych, I.G. (2024) Residual Stresses in Plates During Contact Spot Welding. *Strength of Materials*, **56**, 713–731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-024-00685-x>
  15. (2015) Physical Acoustics Corporation. PCI-2 Data Acquisition System: User Manual. PAC.
  16. (2019) Vallen Systeme GmbH. AMSY-6 Acoustic Emission Diagnostics System: Technical Manual. Vallen.
  17. (2018) Systeme GmbH. VS-150 Portable Acoustic Emission Instrument: Brochure. Vallen.
  18. (2017) DAKEL AE Systems. ZEDO Acoustic Emission Data Acquisition: Datasheet. DAKEL.
  19. (2020) MISTRAS Group. PCI-2M Acoustic Emission Monitoring System: Product Datasheet. MISTRAS.
  - facts\_types\_and\_classification\_of\_the\_advance\_welding\_process-based\_industry\_A\_review.
  4. Abdul Kadir, M.H., Asmelash, M., Azhari, A. (2020) Investigation on welding distortion in stainless steel sheet using gas tungsten arc welding process. *Materials Today: Proceedings*, **46**(4), 1674–1679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.264>
  5. Litovchenko, P.I., Ivanova, L.P. (2016) *Technology of structural materials*. Textbook. Kharkiv, NA NGU [in Ukrainian].
  6. Koçak, O.O. (2003) *Defect assessment of spot welds*. A thesis submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University. <https://hdl.handle.net/11511/13975>
  7. Shapovalov, E.V., Galagan, R.M., Klishchar, F.S., Zapara, V.I. (2013) Modern methods and means of NDT of welded joint made by resistance spot welding (Review). *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 10–22 [in Russian].
  8. Andreykiv, O.E., Skalsky, V.R., Sulim, G.T. (2007) *Theoretical foundations of the acoustic emission method in fracture mechanics*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
  9. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) *Acoustic emission and structural life: Theory, methods, technologies, tools, application*. Kyiv, Indprom [in Russian].
  10. Yusof, M.F.M., Ishak, M., Ghazali, M.F. (2021) Acoustic methods in real-time welding process monitoring: Application and future potential advancement. *J. Mech. Eng. Sci.*, **15**(4), 8490–8507. DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.15.4.2021.03.0669>
  11. Asif, K., Zhang, L., Derrible, S. et al. (2022) Machine learning model to predict welding quality using air-coupled acoustic emission and weld inputs. *J. of Intelligent Manufacturing*, **33**, 881–895. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01667-x>
  12. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A., Boichuk, O.I., Ovsienko, M.A. (2021) Method of acoustic emission at evaluation of the state of welds and their service properties. Pt 1. Effect of welded joint type on acoustic emission. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, **2**, 52–59 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.09>
  13. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A., Boichuk, O.I., Ovsienko, M.A. (2021) Method of acoustic emission at evaluation of the state of welds and their service properties. Pt 2. Practical application. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, **4**, 36–48 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.04.06>
  14. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Boichuk, O.I. et al. (2024) Residual stresses in plates during contact spot welding. *Strength of Materials*, **56**, 713–731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-024-00685-x>
  15. (2015) Physical Acoustics Corporation. PCI-2 Data Acquisition System: User Manual. PAC.
  16. (2019) Vallen System GmbH. AMSY-6 Acoustic Emission Diagnostics System: Technical Manual. Vallen.
  17. (2018) System GmbH. VS-150 Portable Acoustic Emission Instrument: Brochure. Vallen.
  18. (2017) DAKEL AE Systems. ZEDO Acoustic Emission Data Acquisition: Datasheet. DAKEL.
  19. (2020) MISTRAS Group. PCI-2M Acoustic Emission Monitoring System: Product Datasheet. MISTRAS.

## References

1. Chidambaresh, S., Radhika, N., Deepak Kumar, N.H., Sivasailam, B. (2023) A review on welding techniques: Properties, characterizations and engineering applications. *Adv. in Materials and Processing Technologies*, **10**(2), 1126–1181. DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2186638>
2. Savulyak, V.I., Osadchuk, A.Yu. (2004) *Manual arc welding. Textbook*. Vinnytsia, VNTU [in Ukrainian].
3. Abed Fares Ali (2021) Defects, types and classification of the advance welding process-based industry: A review. *J. of Mechanical Engineering Research and Developments*. [https://www.researchgate.net/publication/359554366\\_De](https://www.researchgate.net/publication/359554366_De)

## ASSESSMENT OF THE QUALITY OF WELDED JOINTS USING THE AE METHOD

S.A. Nedosieka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko, V.V. Dolynenko, O.M. Hurianov

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

The paper discusses approaches to assessing the quality of both the welding process itself and the defects that arise during it. The prospects for using the acoustic emission (AE) method to control the welding process and assess the condition of welded joints are shown. The results of previous AE studies during static tensile testing of metal samples to complete failure and during the welding process using the EMA technical diagnostic system are analyzed. The high sensitivity of the AE method to the occurrence and development of defects is demonstrated. Promising tasks for the development of welded joint control using modern AE systems, automation of the process of control and decision-making regarding the quality of welding and the determination of welded joint defects are identified. 19 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

*Keywords:* welding, quality, defectiveness, non-destructive testing, acoustic emission, residual stress

Отримано 16.07.25

Отримано у переглянутому вигляді 18.08.25

Прийнято 23.09.25

# УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

**І.В. Рибіцький<sup>1</sup>, О.М. Карпаш<sup>1</sup>, С.С. Войтенко<sup>1</sup>, М.О. Карпаш<sup>2</sup>, П.М. Райтер<sup>3</sup>, А.В. Яворський<sup>3</sup>,  
І.Р. Ващишак<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 61123, м. Харків, вул. Полтавський Шлях, 123.  
E-mail: [info@hups.mil.gov.ua](mailto:info@hups.mil.gov.ua)

<sup>2</sup>Університет Короля Данила, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Євгена Коновальця, 35. E-mail: [university@ukd.edu.ua](mailto:university@ukd.edu.ua)

<sup>3</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.  
E-mail: [admin@nung.edu.ua](mailto:admin@nung.edu.ua)

Актуальність питання контролю якості природного газу, в першу чергу його енергетичних характеристик, зокрема його питомої вищої та нижчої теплоти згоряння на даний час обумовлена вимогами Закону України, що регламентує запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії. У роботі наведено результати досліджень щодо удосконалення методу експрес-контролю теплоти згоряння, як вищої так і нижчої, природного газу, що відповідає вимогам Закону України «Про ринок природного газу». Показано, що застосовані схематичні рішення дозволяють значно зменшити похибку вимірювання, реалізувати можливість вимірювання не тільки нижчої, але й вищої теплоти згоряння природного газу, а також розширити можливості застосування реалізованого пристрою як у промислових, так і в побутових умовах. Бібліогр. 11, рис. 9.

*Ключові слова:* якість природного газу, вимірювання, ультразвукові коливання, підвищення точності, тригер, температурна залежність

**Вступ.** Значну роль у глобальному енергетичному переході до низьковуглецевої енергетики відіграє природний газ, оскільки він є найчистішим викопним паливом. Перехід з вугілля на природний газ з метою суттєвого зменшення викидів CO<sub>2</sub> спричинив швидке зростання споживання природного газу в світі [1]. Окрім природного газу, з кінця 2024 р. у газотранспортну систему (ГТС) України почалася передача біометану, що пояснюється вимогами законів України щодо розвитку виробництва біометану, які закладають основу для виробництва, використання, а також його експорту. Збагачений біометан не відрізняється від природного газу, тому його можна транспортувати та використовувати таким же чином, має переваги природного газу, залишаючись при цьому вуглецево нейтральним [2].

Актуальності задача визначення одного з основних якісних фізико-хімічних показників (ФХП) природного газу, а саме, значення об'ємної вищої і нижчої теплоти згоряння, набуває через значну розгалуженість ГТС України, наявність багатьох точок входу в систему від різних джерел і динамічний характер її роботи. Оперативне визначення теплоти згоряння природного газу – це не тільки встановлення його енергетичної цінності, а й для багатьох споживачів можливість керувати числен-

ними технологічними процесами для досягнення необхідної якості продукту. На даний час кодекс ГТС України передбачає визначення ФХП природного газу в точках виходу, погоджених з операторами суміжних систем або прямими споживачами, з використанням автоматичних потокових приладів (автоматичних хроматографів і вологомірів) та/або вимірювальних хіміко-аналітичних лабораторій [3]. Точки визначення ФХП (місця відбору проб) природного газу та періодичність проведення вимірювань при використанні для визначення ФХП вимірювальних хіміко-аналітичних лабораторій узгоджуються оператором газотранспортної системи з операторами суміжних систем, суміжними газовидобувними підприємствами або іншими суб'єктами, безпосередньо підключеними до газотранспортної системи, окремим протоколом [4]. Як правило, за допомогою потокових хроматографів значення теплоти згоряння природного газу отримують раз на добу, а з використанням вимірювальних хіміко-аналітичних лабораторій дані отримуються раз на тиждень.

На практиці значення питомої теплоти згоряння в точці відбору у споживача для розгалуженої системи з декількома джерелами моделюється за допомогою спрощених, припущених умов або станів, ігноруючи деякі складні характеристики самої системи. Ці

І.В. Рибіцький – <https://orcid.org/0000-0003-3596-3918>, О.М. Карпаш – <https://orcid.org/0000-0002-9240-1623>,

С.С. Войтенко – <https://orcid.org/0000-0003-4134-5964>, М.О. Карпаш – <https://orcid.org/0000-0002-4223-3828>,

П.М. Райтер – <https://orcid.org/0000-0002-3437-2844>, А.В. Яворський – <https://orcid.org/0000-0002-5970-4286>,

І.Р. Ващишак – <https://orcid.org/0000-0002-9078-6726>,

© І.В. Рибіцький<sup>1</sup>, О.М. Карпаш, С.С. Войтенко, М.О. Карпаш, П.М. Райтер, А.В. Яворський, І.Р. Ващишак, 2025

обмеження не дозволяють реалізувати оперативне визначення динамічних змін величини теплотворної здатності природного газу з прийнятною точністю [3]. Відповідно єдине рішення полягає у вимірюванні значення питомої теплоти згоряння природного газу безпосередньо у споживача, що відповідає вимогам Закону України «Про ринок природного газу», який регламентує облік природного газу із застосуванням значення об'єму в одиницях вимірювання, що базуються на одиницях енергії.

Аналіз існуючих засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу показав [5], що основним недоліком згаданих технічних засобів є те, що їх подекуди неможливо, а в інших випадках – занадто дорого використовувати для вимірювання безпосередньо у кінцевого споживача, оскільки одні з них потребують для роботи розхідних матеріалів, інші – необхідності спалювання газової проби у великих обсягах, треті не дають змогу проводити вимірювання теплоти згоряння природного газу в мережах низького тиску.

Відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 15112:2020 теплоту згоряння природного газу можна визначати за прямими, непрямими та кореляційними методами, останні з яких на даний час значно розвинулись. Авторами проведено значний об'єм науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт з розроблення методу та виготовлення дослідного зразка приладу для експрес-вимірювання теплоти згоряння природного газу, який базується саме на кореляційному методі [6]. Проте саме похибка вимірювання даного приладу, яка складає 5 %, не дозволяє повноцінне його використання в якості комерційного засобу вимірювання.

Тому **метою** даного дослідження є розроблення удосконаленого методу та засобу вимірювання якості природного газу, зокрема його вищої та нижчої теплоти згоряння.

**Аналіз проблем процесу експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу.** Для

вирішення задачі оперативного визначення динамічних змін величини теплотворної здатності природного газу запропоновано експрес-метод вимірювання теплоти згоряння природного газу, що базується на алгоритмах штучних нейронних мереж [7] і використанні таких фізичних параметрів природного газу, як швидкість поширення ультразвукових коливань і вміст діоксиду вуглецю у пробі [6]. Даний метод дозволяє створювати засоби вимірювання, що дають можливість отримувати дані щодо теплоти згоряння в інтервалі часу до 15 хв без втрати природного газу в мережах низького тиску.

Ранні варіанти реалізації схемотехнічних і конструктивних рішень методу експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу підтвердили можливість здійснення самого процесу вимірювання та правильність самого підходу, проте вони мали суттєві недоліки, що значно підвищувало похибку вимірювання та обмежувало можливості самого методу. Зокрема при вимірюваннях не враховувалось реальне значення температури природного газу, нехтувалась похибка, спричинена «втратою півхвилі» ультразвукових сигналів та повною мірою не використані можливості блоку підсилення сигналів, реалізувавши тільки сталий коефіцієнт підсилення.

Реалізацію методу було здійснено у вигляді дослідного зразка приладу для експрес-контролю нижчої теплоти згоряння природного газу [6]. Даний прилад (рис. 1) виконано в зручному для транспортування пило- та вологозахищеному корпусі з класом захисту IP67. За допомогою розробленого приладу теплоту згоряння природного газу можливо контролювати в експрес-режимі з похибкою 4,1 %.

У приладі реалізовано принцип опосередкованого визначення нижчої та вищої теплоти згоряння природного газу на основі комплексного використання результатів вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань і концентрації

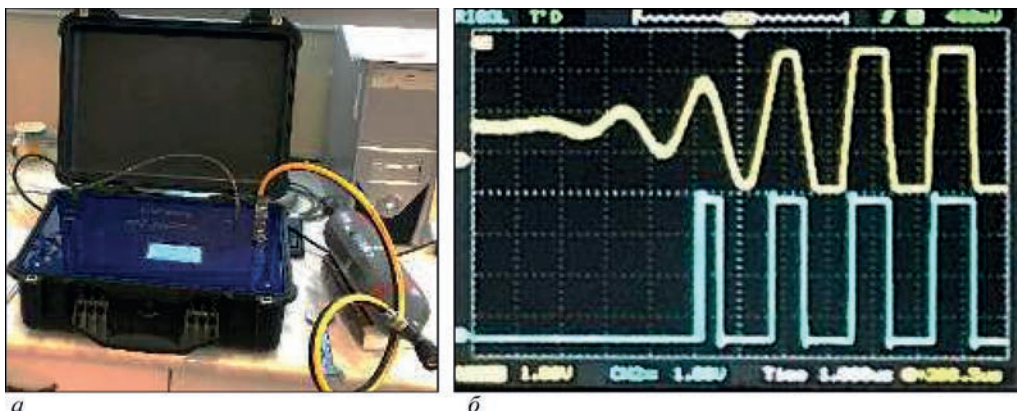


Рис. 1. Зовнішній вигляд удосконаленого приладу для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу (а) та осцилограма ультразвукового луна-імпульсу для визначення швидкості поширення ультразвукових коливань у пробі природного газу (б)

діоксиду вуглецю у відібраній пробі природного газу за допомогою алгоритмів штучних нейронних мереж, які реалізовані в приладі програмно.

З метою удосконалення приладу та підвищення точності вимірювань були продовжені дослідження розробленого методу, за результатами яких встановлено, що вказане вище відносно велике значення похибки вимірювань теплоти згоряння природного газу за допомогою розробленого дослідного зразка приладу пов'язане з частковим нехтуванням реальним значення температури природного газу та неврахуванням похибки, яка має місце в процесі вимірювання часу проходження ультразвукових хвиль у середовищі, такої як «втрата півхвилі».

У перших варіантах приладу здійснювались вимірювання лише двох параметрів, таких як швидкість поширення ультразвукових коливань і вміст діоксиду вуглецю в пробі природного газу [7]. Такі параметри природного газу, як значення тиску та температура, приводились до нормальних умов. Це збільшувало час вимірювання однієї проби та похибку вимірювань, а також унеможлиблювало використання методу за температури навколишнього середовища, що значно (більш ніж на 10°C) відрізняється від нормальних умов. Виконані експериментальні дослідження показали, що значення швидкості поширення ультразвукових коливань в одній і тій же газовій пробі може змінюватись від 400 до 420 м/с (тобто на 5 %) за умов зміни температури природного газу від +5°C до +40°C.

Для виявлення характеру залежності швидкості ультразвукових коливань у природному газі від температури та значення самого температурного коефіцієнта було проведено багатократні вимірювання на різних пробах газу. Для цього було розроблено спеціальну експериментальну установку, яка дозволяла змінювати температуру проби природного в діапазоні +2 ... +80°C (рис. 2).

Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити температурний коефіцієнт швидкості ультразвукових коливань у природному газі, який складає 0,53 м/(с·°C) та встановити залежність приведення швидкості ультразвукових коливань у природному газі до нормальних умов за температурою:

$$v_0 = v - 0,53 \cdot (20^\circ\text{C} - t_0), \quad (1)$$

де:  $v_0$  – швидкість ультразвукових коливань у пробі природного газу з температурою  $t_0$ ,  $v$  – швидкість ультразвукових коливань у тій же пробі природного газу за нормальних умов.

Наступним етапом досліджень був пошук рішень з метою зменшення впливу похибки, спричиненої «втратою півхвилі» ультразвукових сиг-

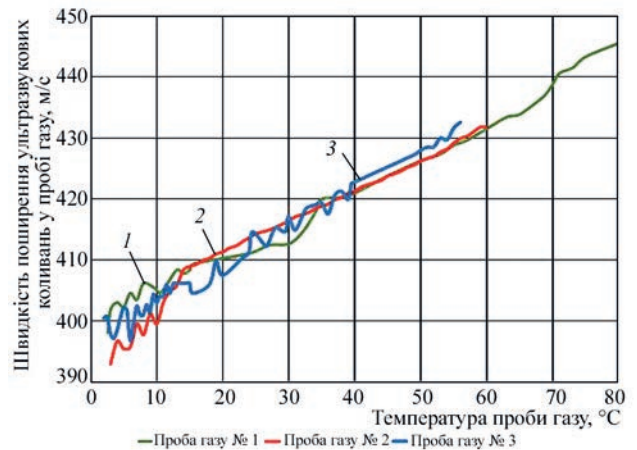


Рис. 2. Залежності швидкості поширення ультразвукових коливань від температури газу для трьох проб газу

налів у процесі вимірювання швидкості звуку в досліджуваній пробі газу. Частота ультразвукових коливань, які генеруються в пробі природного газу за допомогою спеціально розроблених п'єзоелектричних перетворювачів, складає 1 МГц. Луна-імпульс, який проходить через пробу природного газу, має форму кількох періодів синусоїдального сигналу (хвильового пакету), амплітуда якого від першого до наступних періодів спочатку наростає до певного максимального значення, яке залежить від коефіцієнта затухання ультразвукових коливань у природному газі, а потім спадає до нуля на ділянці останнього періоду хвильового пакету (рис. 1, б). Відлік моменту проходження ультразвукового імпульсу в природному газі здійснюється по фронту, коли амплітуда синусоїди при наростанні досягає певного значення. При цьому в перших варіантах приладу відлік здійснювався лише по додатних значеннях синусоподібного луна-імпульсу періоду сигналу.

Оскільки для різного складу природного газу є характерним різне значення коефіцієнта затухання ультразвукових коливань, то й швидкість наростання амплітуди синусоподібного луна-імпульсу буде різною, а отже, момент відліку може розпочатись не від першої півхвилі, а вже від другої півхвилі періоду сигналу. За таких умов похибка вимірювання швидкості складає більше  $\pm 2$  м/с (або більше 6 %). На рис. 3 наведено розраховану залежність похибки «втрати півхвилі» від відстані до ультразвукових п'єзоперетворювачів робочою частотою 1 МГц при вимірювання швидкості ультразвукових коливань у пробі природного газу.

Як бачимо з рис. 3, збільшення відстані між п'єзоперетворювачами призводить до зменшення похибки «втрати півхвилі». Проте оскільки величина затухання ультразвукових коливань у природному газі залежить від його густини та шляху про-

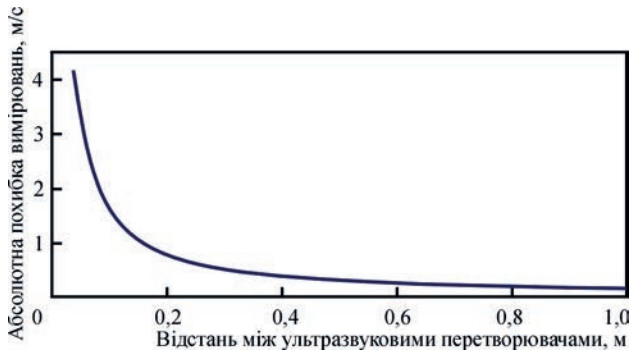


Рис. 3. Залежність «похибки втрати» півхвилі від відстані між перетворювачами

ходження коливань, то за певних значень відстані між п'єзоперетворювачами корисний луна-сигнал маскується шумами й виявити його практично неможливо. Виконане математичне моделювання та багатократні експериментальні дослідження показали, що вже при відстані більше 100 мм досить важко провести вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань у пробах природного газу, значення густини якого є меншим за  $0,7 \text{ кг/м}^3$ .

Тому з метою зменшення впливу похибки, спричиненої «втратою півхвилі» [8], запропоновано й реалізовано ряд схематехнічних та алгоритмічних заходів. На перший погляд, логічним рішенням є подача луна-сигналів ультразвукового давача, після їх підсилення/нормалізації за амплітудою, безпосередньо на вхід цифрового сигнального процесора для вимірювання часових інтервалів проходження ультразвукового сигналу через

ділянку вимірювальної камери з пробою природного газу. Проте детальні експериментальні дослідження форми луна-імпульсів ультразвукових сигналів у середовищі природного газу з різним його складом свідчать, що форма хвиль перших періодів хвильового пакету луна-імпульсу суттєво змінюється зі зміною складу природного газу. Тому це безпосереднього буде призводити до отримання неоднозначних результатів для різних складів природного газу, а отже, й до зростання невизначеності вимірювань швидкості поширення ультразвукових сигналів у них.

**Удосконалення методу та засобу вимірювання для експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу.** Суть схематехнічних рішень полягає в удосконаленні блоку підсилення та формування луна-імпульсу шляхом врахування при обробці значень як додатних, так і від'ємних півперіодів хвильового пакету синусоподібного луна-імпульсу, розробленні алгоритму змінного в часі коефіцієнта підсилення ультразвукових коливань [8], що пройшли крізь досліджувану пробу природного газу, а також алгоритму пошуку максимуму амплітуди синусоподібного луна-імпульсу (рис. 4).

На рис. 4, а зображено осцилограму хвильового пакету луна-сигналу ультразвукових коливань, які пройшли через пробу природного газу та були підсилені за допомогою інструментального підсилювача з низьким рівнем власних шумів AD600;

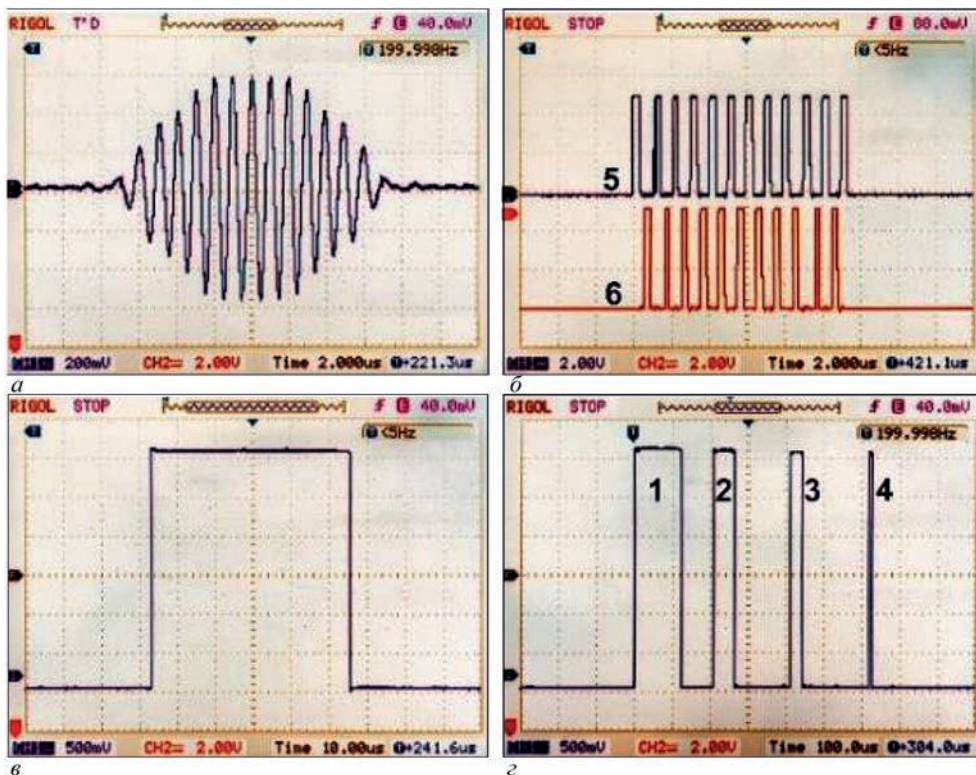


Рис. 4. Осцилограми, які ілюструють методу опрацювання інформаційних сигналів

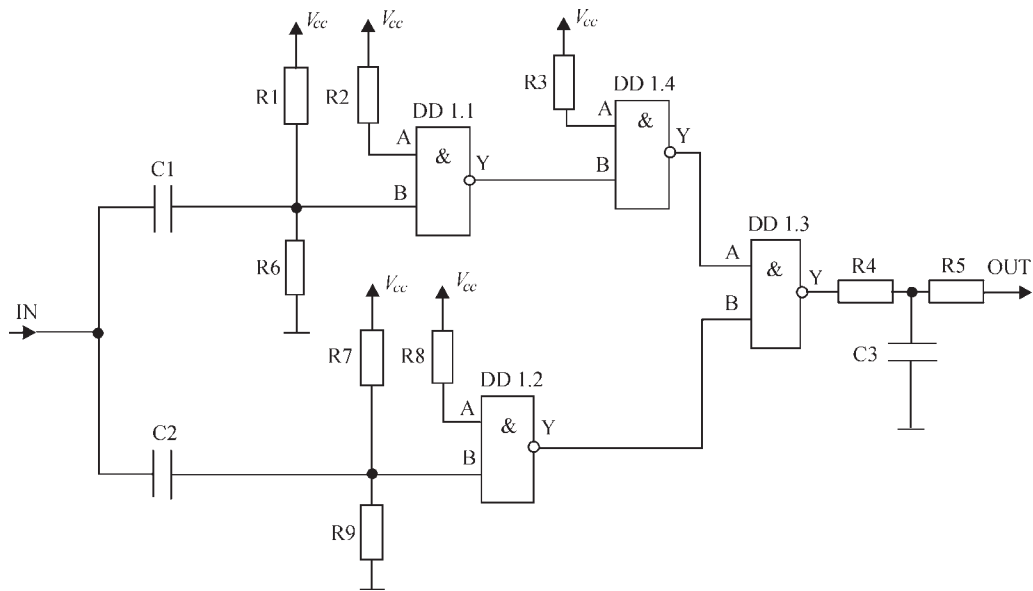


Рис. 5. Функціональна схема блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу

*b* – осцилограми луна-сигналу ультразвукових коливань, які пройшли через пробу природного газу та були опрацьовані за допомогою електронної схеми на базі тригерів: позначка 5 – додатні значення синусоїди (з додатних півперіодів синусоїдального сигналу), позначка 6 – від’ємні значення (з від’ємних півперіодів синусоїдального сигналу) синусоїди луна-сигналу; *в* – осцилограма після проведення підсумовування та інтегрування сигналів 5 та 6; *г* – 2, 3, 4 серія луна-сигналів, яка виникає через часткове відбиття від поверхні п’єзоперетворювача, *l* – збуджуючий імпульс.

Розглянемо детальніше роботу функціональної схеми обробки луна-сигналів (рис. 5).

Блок інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу виконано на базі інтегральної мікросхеми 74НС00 фірми Philips Semiconductors, як містить збірку з чотирьох двовходових тригерів Шмітта з елементів типу I-HE: DD1-1 – DD1.4 (рис. 5). Тригер Шмітта є електронною моделлю двопозиційного релейного елемента, статична

характеристика якого має зону неоднозначності (петлю гістерезису, рис. 6, *a*). Перевагою тригера Шмітта є те, що він має прямокутну петлю гістерезису та дозволяє формувати чіткі прямокутні імпульси [9].

Елемент (або вентиль) I-HE (англ. Not AND, NAND) є логічним вентиляем, який реалізує операцію кон’юнкції з інверсією результату. Ця операція також носить назву «штрих Шефера». Активний сигнал («логічна 1», «істина») на виході цього вентиля присутній тоді, коли хоча б на одному його вході присутній пасивний сигнал («логічний 0», «хиба»). Лише коли на обох входах сигнал активний, на виході буде пасивний сигнал (рис. 6, *б*).

Принцип роботи розробленого блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу полягає в наступному. Луна-сигнал ультразвукових коливань, які пройшли через пробу природного газу та були підсилені за допомогою інструментального підсилювача з низьким рівнем власних шумів, потрапляє на вхід блоку інверсії, підсумовування та

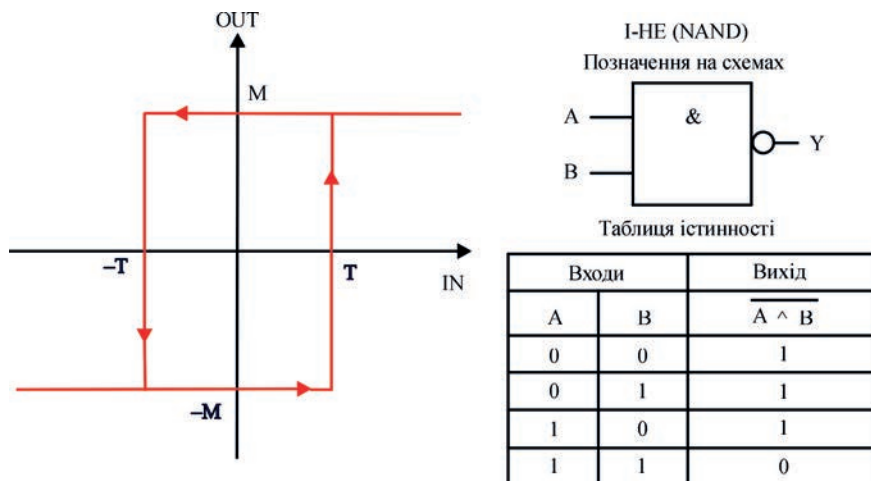


Рис. 6. Петля гістерезису тригера Шмітта (*a*) та функціональна таблиці елементу I-HE (*б*)

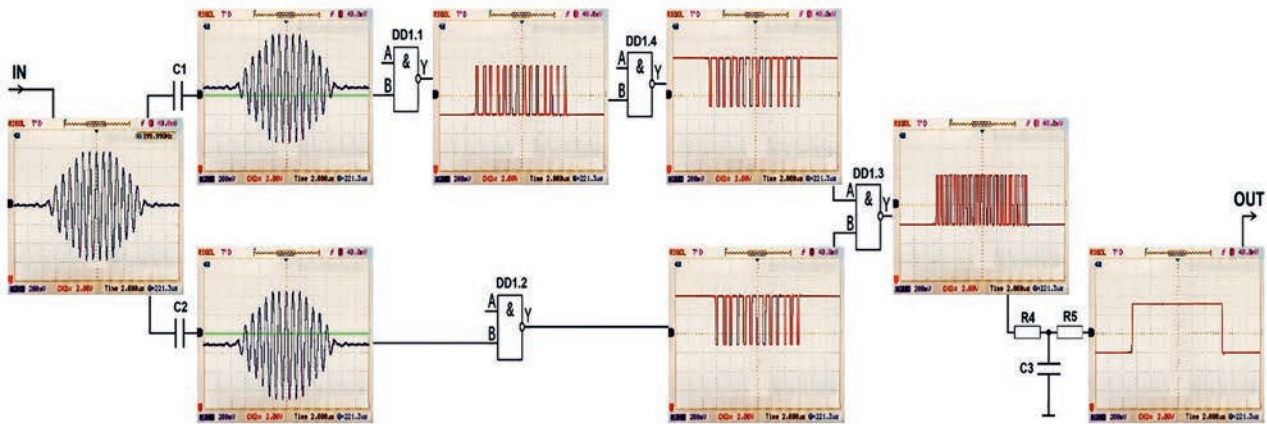


Рис. 7. Функціональна блок-схема блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу

інтегрування. Сигнал проходить паралельно через два конденсатори C1 та C2 (рис. 5), які призначені для вилучення з нього постійної складової напруги. Після конденсаторів сигнал паралельно поступає на два логічні елементи DD1.1 та DD1.2, які, за допомогою резисторів R1, R6 та R7, R9, що задають рівень спрацювання тригерів, налаштовані таким чином, що елемент DD1.1 реагує на появу лише додатної півхвилі луна-сигналу, а елемент DD1.2 – на появу лише від’ємної півхвилі. Оскільки за таких умов відбувається інверсія сигналу елементами тригера Шмітта, то рівень напруги елемента DD1.1, який сприймається як відсутність вхідного сигналу, буде мати значення 0 В, а рівень напруги, що визначає ситуацію наявності вхідного сигналу вказаного елемента, дорівнюватиме напрузі живлення  $V_{cc}$ . Для елемента DD1.2 маємо зворотню ситуацію – рівень відсутності сигналу на вході елемента буде за умови напруги на вході, що дорівнює  $V_{cc}$ , а рівень наявності на вході логічного елемента DD1.2 вхідного сигналу буде за умови значення напруги 0 В на його вході. Для приведення рівнів сигналу до одного логічного значення було введено логічний елемент DD1.4, який в даному випадку виконує функцію інвертора. Після приведення рівнів сигналу до одного логічного значення сигнали паралельно поступають на логічний елемент DD1.3, який в даному випадку виконує роль інвертора та суматора. Після інверсії та підсумовування сигнал поступає на інтегратор, виконаний за допомогою елементів R4, C3, R5. Осцилограму сигналу на виході з блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу показано на рис. 4, в.

Детальні осцилограми луна-сигналів на всіх етапах їх обробки за допомогою елементів DD1.1 – DD1.4 блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу наведено на функціональній блок-схемі (рис. 7).

На рис. 8 наведено зображення виготовленого та змонтованого в прилад блоку підсилен-

ня та інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу.

Нормоване номінальне значення затримки розповсюдження сигналу від входу до виходу логічних елементів I-HE мікросхеми 74HC00 фірми Philips Semiconductors [9] складає (за напруги живлення 4,5 В) лише 9 нс, тоді сумарно три логічні елементи блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу (рис. 7) призведуть до затримки поширення сигналу 27 нс.

Для отримання числових значень часових інтервалів між луна-імпульсами в середовищі природного газу та розрахунку теплотворної здатності газу (з використанням алгоритмів штучних нейронних мереж) у приладі застосовано 16-ти бітний мікроконтролер (цифровий сигнальний процесор) PIC24HJ256GP610A фірми Microchip (США) і в останніх версіях приладу – новіший мікроконтролер dsPIC33FJ256GP710A [10]. Вказаний мікроконтролер містить на своєму кристалі швидкодіючий модуль порівняння-захоплення зміни вхідного сигналу (Input Capture module). Даний модуль дозволяє захоплювати передній або задній фронт вхідного імпульсу і з затримкою 62 нс почати підрахунок імпульсів внутрішнього тактового генератора

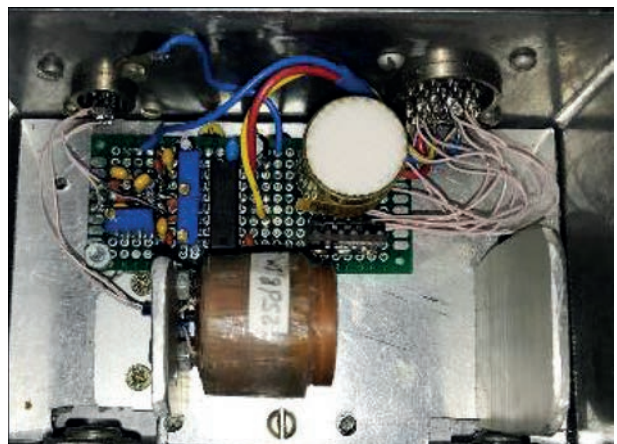


Рис. 8. Блок підсилення інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу

з частотою заповнюючих імпульсів 10 МГц і періодом 100 нс. Налаштування та функціонування даного модуля порівняння-захоплення відбувається з використанням розробленого системного програмного забезпечення. Швидкодіюча система опрацювання переривання такого мікроконтролера в поєднанні з оптимізованим кодом, написаним на мові асемблера мікроконтролера, дозволили за допомогою вказаних мікроконтролерів вимірювати часові інтервали між імпульсами з точністю 100 нс за умови максимальної стабільної затримки 124 нс. Враховуючи затримку поширення сигналу на блоці інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу 27 нс, сумарна затримка від моменту появи переднього фронту луна-сигналу на виході давача до початку підрахунку часу його появи мікроконтролером складатиме 151 нс. Враховуючи, що частота коливань у хвильовому пакеті луна-імпульсу 1 МГц, або період 1000 нс, то існує принципова можливість визначати не лише момент приходу переднього фронту першого імпульсу хвильового пакету луна-імпульсу, а й визначати момент приходу кожного переднього фронту кожного імпульсу хвильового пакету з затримкою 151 нс.

Як вище зазначалось, форма імпульсів хвильового пакету суттєво залежить від складу природного газу. Тому в процесі подальших удосконалень пристрою визначення теплотворної здатності з метою підвищення точності вимірювання швидкості поширення ультразвуку в середовищі планується використовувати як базову мітку не передній фронт першого імпульсу хвильового пакету, а час появи переднього фронту імпульсу хвильового пакету, що є в центрі хвильового пакету і його форма практично не залежить від складу природного газу проби. Це дає можливість забезпечити інваріантність вимірювання швидкості поширення ультразвукових імпульсів від складу природного газу в частині впливу на вимірювання форми сигналу луна-імпульсу.

Також удосконалення зазнав і генераторний блок приладу для вимірювання якісних характеристик природного газу (рис. 9), який призначений для формування високовольтного та височастотного імпульсу напруги для збудження п'єзоелектричного ультразвукового перетворювача.

Суть удосконалення генераторного блоку приладу для вимірювання якісних характеристик природного газу полягає в розробці схемотехнічних рішень, які забезпечили його роботу в імпульсному режимі тільки на момент проведення вимірювання, що підвищило потужність зондуючого імпульсу, значно скоротило енергоспоживан-

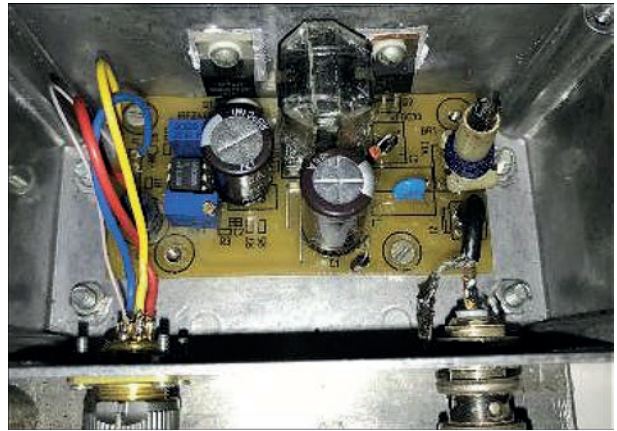


Рис. 9. Генераторний блок приладу для вимірювання характеристик природного газу

ня приладу та забезпечило можливість його довготривалої роботи автономно від акумуляторних батарей.

Урахування залежності швидкості ультразвукових коливань у природному газі від його температури, прийняті схемотехнічні та алгоритмічні заходи дозволили вдосконалити технологію вимірювання та сам прилад, зокрема: зменшився час вимірювання однієї проби, оскільки немає потреби догрівати чи охолоджувати пробу; розширились можливості використання приладу при різних діапазонах температури газу та навколишнього середовища, а також значно зменшилась похибка вимірювань (до 1 %) та стабільність і повторюваність результатів.

Загалом вказані вдосконалення дають можливість забезпечити інваріантність вимірювання швидкості поширення ультразвукових імпульсів від складу природного газу в частині впливу на вимірювання форми сигналу луна-імпульсу.

## Висновки

У ході проведених досліджень запропоновано технічні рішення щодо вдосконалення засобу вимірювання для експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу, а саме:

1. Удосконалено метод експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу, суть якого полягає в застосуванні ряду схемотехнічних рішень, які зменшують вплив похибки «втраати півхвилі» при ультразвукових вимірюваннях, а також реалізації алгоритму пошуку точки відліку акустичного сигналу.

2. Введена в алгоритм вимірювань залежність компенсації температури проби природного газу дозволяє проводити вимірювання як у побутових, так і в промислових умовах зі значенням похибки вимірювання основної енергетичної характеристики природного газу на рівні 1 %.

3. Реалізовано можливість вимірювання вищої теплоти згоряння природного газу, що відповідає вимогам Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії».

### Список літератури/References

1. *Forbes: Natural Gas is Critical to Achieving Global Climate Goals. Here's Why.* <https://www.forbes.com/sites/kensilverstein/2024/09/09/natural-gas-is-critical-to-achieving-global-climate-goal-heres-why/>
2. ДСТУ EN 16723-1:2023 *Природний газ і біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу. Частина 1. Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу* (EN 16723-1:2016, IDT) [in Ukrainian].  
DSTU EN 16723-1:2023. *Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection into the natural gas network. Pt 1. Technical characteristics of biomethane for injection into the natural gas network* (EN 16723-1:2016, IDT) [in Ukrainian].
3. *Кодекс газотранспортної системи* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#n18>  
*Code of the gas transport system* [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#n18>
4. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії». Відомості Верховної Ради (ВВР), 2022, № 5, ст. 30. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1850-20#Text>  
Law of Ukraine «On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Introduction of Accounting and Settlements on the Natural Gas Market by Gas Volume in Energy Units». *Vidomosti Verkhovnoi Rady (VVR)*, 2022, 5, 30 [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1850-20#Text>
5. Maksymiuk, S., Rybitskyi, I., Karpash, O., Tsykh, V., Doroshenko, Y. (2024) *Method for estimating the calorific value of natural gas for branched networks using express quality control tools.* Eds. by V. Babak, A. Zaporozhets. In: *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*, Vol 561. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_16), Print ISBN 978-3-031-68371-8.
6. Райтер П.М., Карпаш О.М., Яворський А.В. та ін. (2014) *Природний газ: інноваційні рішення для сталого розвитку* : монографія. Під заг. ред. О.М. Карпаша. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ. ISBN 978-966-694-215-2  
Reiter, P.M., Karpash, O.M., Yavorsky, A.V. et al. (2014) *Natural gas: Innovative solutions for sustainable development: Monograph.* Ed. by O.M. Karpash. Ivano-Frankivsk, IFNTUNG [in Ukrainian]. ISBN 978-966-694-215-2
7. Рибіцький І.В., Карпаш О.М., Карпаш М.О. (2020) *Моделювання можливості вимірювання вищої теплоти згоряння природного газу за наявних інформативних параметрів. Методи та прилади контролю якості*, 1(44), 147–154. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1\(44\)-147-154](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1(44)-147-154)  
Rybitskyi, I.V., Karpash, O.M., Karpash, M.O. (2020) *Modeling the possibility of measuring the higher calorific value of natural gas using available informative parameters. Metody ta Prylady Kontroliu Yakosti*, 1(44), 147–154 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1\(44\)-147-154](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1(44)-147-154)
8. Карпаш О.М. (2010) *Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу.* Патент України на винахід 92846, МПК G 01 N25/20, G 01 N29/00. Заявка № а200905201 від 25.05.2009. Бюл. № 23/2010 від 10.12.2010.  
Karpash, M.O. (2010) *Method for express-determination of heat of combustion of natural gas.* Patent UA, 92846 Int. Cl. IPC G 01 N25/20, G 01 N29/00 a 200905201, 10.12.2010 [in Ukrainian].
9. David, J., Cheeke, N. (2002) *Fundamental and Application of Ultrasonic Waves. CRC Series in Pure and Applied Physics.* CRC Press LLS.
10. Lokesh Soni, Neeta Pandey (2024) *A low power Schmitt-trigger driven 10T SRAM Cell for high speed applications. Integration*, 97, 102187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2024.102187>
11. *dsPIC33FJXXXGPX06/X08/X10. Data Sheet High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers, 2009 Microchip Technology Inc.* <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70286C.pdf>

## I

### IMPROVEMENT OF NATURAL GAS QUALITY CONTROLLING METHOD

I.V. Rybitsky<sup>1</sup>, M.O. Karpash<sup>2</sup>, S.S. Voitenko<sup>1</sup>, O.M. Karpash<sup>1</sup>, P.M. Raiter<sup>3</sup>, A.V. Yavorsky<sup>3</sup>, I.R. Vashchysk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kharkiv Ivan Kozhedub National University of the Air Force. 123 Poltavskyi Shliakh Str., 61123, Kharkiv, Ukraine.  
E-mail: [info@hups.mil.gov.ua](mailto:info@hups.mil.gov.ua)

<sup>2</sup>King Danylo University. 35 E. Konovaltsia Str., 76018, Ivano-Frankivsk, Ukraine.  
E-mail: [university@ukd.edu.ua](mailto:university@ukd.edu.ua)

<sup>3</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 15 Karpatska Str., 76019, Ivano-Frankivsk, Ukraine.  
E-mail: [admin@nung.edu.ua](mailto:admin@nung.edu.ua)

The relevance of the issue of controlling the quality of natural gas, in particular its specific higher and lower calorific value, is currently primarily due to the requirements of the Law of Ukraine, which regulates the introduction of gas volume accounting and calculations in energy units on the natural gas market. The paper presents the results of research on improving the method of express control of the calorific value of natural gas, both higher and lower, that meets the requirements of the Law of Ukraine «On the Natural Gas Market». It is shown that the applied circuit and technical solutions allow significantly increasing the accuracy of measurement, realizing the possibility of measuring not only the lower, but also the higher calorific value of natural gas, as well as expanding the possibilities of using the implemented device in both industrial and domestic conditions. 11 Ref., 9 Fig.

*Keywords: natural gas quality, measurement, ultrasonic vibrations, increasing accuracy, trigger, temperature dependence*

Отримано 15.09.25

Отримано у переглянутому вигляді 03.11.25

Прийнято 12.12.25

# РОЗРОБКА МАТЕРІАЛІВ І ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИКИ ПОШКОДЖЕНЬ КОНСТРУКЦІЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ВНАСЛІДОК УДАРІВ

М.Л. Казакевич<sup>1,2</sup>, В.М. Казакевич<sup>1,2</sup>, О.І. Семенець<sup>3</sup>, О.В. Денищенко<sup>1</sup>, П.О. Слободенюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: kazakevich.m@gmail.com

<sup>2</sup>ТОВ «НДТ Україна». E-mail: m\_kazakevich@ukr.net

<sup>3</sup>АТ «АНТОНОВ». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполєва, 1. E-mail: semenets@antonov.com

Стаття присвячена розробці технології та засобів експрес-діагностики концентраторів напружень на поверхні літальних апаратів, які створюються внаслідок механічних ударів птахів або уламків гравію при посадці на невідготовлені аеродроми. Неможливість своєчасно виявити місця таких ударів може спричинити катастрофічні наслідки. Авторами проведено дослідження щодо використання комбінації методів крихкого покриття з капілярним тестуванням і розроблено технологію експрес-моніторингу поверхонь великогабаритних авіаконструкцій з виявлення місць напружень і пошкодження. Запропоновано до стандартизованого штатного захисту авіаконструкції додати спеціальні покриття, у тому числі фарбу, що містить індикатор-люмінофор, та крихкий шар авіаційного лаку. Якщо при механічному ударі буде пошкоджено покриття, волога розчинить індикатор та УФ освітлення візуалізує місце впливу. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 6.

*Ключові слова:* експрес-діагностика поверхні літальних апаратів, концентратори напружень, метод крихких покриттів, капілярний метод неруйнівного контролю

**Вступ.** Дія різноманітних зовнішніх чинників на конструкції призводить до утворення концентраторів напружень та їх пошкоджень. Трапляється, що короткочасна дія зовнішнього чинника на виріб не дозволяє виявити жодної візуальної зміни, залишаючи у той же час внутрішні дефекти. Особливу небезпеку така ситуація створює в авіації, коли внаслідок механічних ударів, які досить часто трапляються в польоті з-за птахів, або впливу інших факторів, наприклад, гравію при посадці на ґрунтовий аеродром, виникає загроза людському життю. У процесі експлуатації літальних апаратів необхідний постійний моніторинг і технічна діагностика цілісності конструкцій. Після аналізу зіткнень літаків із птахами встановлено, що більшість таких аварій (82 %) відбувається під час зльоту та посадки літальних апаратів. Найуразливіші деталі конструкції, що зазнають ударів птахів, – це крило, обтічник двигуна, елементи системи управління польотом. Відома низка пов'язаних з цим катастроф. На жаль, проведення детального моніторингу технічного стану сучасних авіалайнерів за час між польотами не завжди є можливим.

**Метою** цієї роботи було створення високопродуктивного дистанційного методу експрес-діагностики концентраторів напружень на поверхні літальних апаратів. Задача обумовлена реальною ситуацією, коли при експлуатації літаків внаслідок

механічного впливу (удару) виникало пошкодження елементів керування. Місця в конструкції, де відбувається різке зростання напружень, спричинене зміною порушення цілісності матеріалу, є концентраторами напружень. Внаслідок великих розмірів літака такі дефекти не завжди вдається своєчасно виявити. Це може призводити до створення аварійної ситуації.

**Аналіз існуючих методів виявлення місць розташування концентраторів напружень.** Методи виявлення місць концентрації напружень наступні: фотопружність, тензометрія та інфразвуковий аналіз. Найпоширенішим серед існуючих методів визначення напружено-деформованого стану елементів конструкції є тензометричний. Він базується на вимірюванні деформацій у зовнішніх шарах деталі за допомогою тензодатчиків. Виходячи з фізичних принципів, відрізняють такі основні методи тензометрії: рентгенівські, поляризаційно-оптичні, інтерференційні, акустичні, крихких покриттів [1]. Останній метод є найзручнішим для проведення експрес-діагностики напружено-деформованого стану авіаційних конструкцій.

**Метод крихких покриттів.** Метод крихких покриттів (МКП) [2] полягає в нанесенні на досліджувану поверхню виробу тонкого крихкого шару та у візуальному спостереженні за утворенням у цьому шарі тріщин при навантаженні на ви-

ріб. Тріщини, що утворилися, дозволяють виявити зони максимальних деформацій та напрямки головних деформацій (напружень).

Чутливістю крихкого покриття називають максимальне відносне подовження, при якому з'являються перші дефекти, а сталою крихкого покриття по напруженню – максимальне напруження розтягу на поверхні. Для отримання якісних покриттів, які забезпечують визначення деформацій, матеріал покриття повинен бути прозорим, мати гарну адгезію до конструкційних матеріалів, достатньо низьку та стабільну границю міцності в робочих інтервалах температур і вологості навколишнього середовища. Способи виготовлення та нанесення крихких чутливих покриттів повинні забезпечувати безпеку роботи з такими покриттями та оперативність їх застосування для проведення випробувань у лабораторних і виробничих умовах.

Метод дуже зручний для дослідження місць розташування концентраторів напружень. Незважаючи на високу інформативність цього методу при роботі на великих площах поверхні, у традиційному виконанні він не здатен забезпечити необхідний рівень чутливості. Тому авторами було запропоновано його удосконалити шляхом поєднання з методом проникаючих речовин або капілярним методом неруйнівного контролю.

**Капілярний метод неруйнівного контролю.** Капілярний метод неруйнівного контролю [3] заснований на капілярному проникненні всередину дефекту індикаторної рідини та призначений для виявлення дефектів, що мають вихід на поверхню об'єкта контролю. Цей метод придатний для виявлення щілин з поперечними розміром 0,1...500 мкм, у тому числі наскрізних, на поверхні чорних і кольорових металів, сплавів, кераміки, скла і т.п., та широко застосовується для контролю цілісності зварного шва. Розрізняють люмінесцентний і кольоровий методи капілярної дефектоскопії.

При капілярному контролі кольорові або люмінесцентні сліди стає можливим зафіксувати візуально. Перевагою капілярної дефектоскопії є те, що з її допомогою можна не тільки виявити поверхневі та наскрізні дефекти, але й отримати інформацію по їх розташуванню, протяжності, формі та орієнтації по поверхні, тобто цінну інформацію про характер дефекту й навіть деякі причини його виникнення (концентрація напружень, недотримання технології тощо). В якості індикаторних рідин застосовують органічні люмінофори – речовини, що дають яскраве власне світіння під дією ультрафіолетових променів, а також різні барвники [4, 5]. Чутливість капілярного

контролю – здатність виявлення щілин заданого розміру із заданою ймовірністю при використанні конкретної технології контролю. Клас чутливості контролю визначають залежно від мінімального поперечного розміру виявлених дефектів.

Оскільки глибина та довжина дефекту також чинять істотний вплив на можливість його виявлення (зокрема, глибина повинна бути істотно більшою від ширини розкриття), ці параметри вважаються стабільними. Нижній поріг чутливості, тобто мінімальна величина розкриття виявлених дефектів, обмежується тим, що вельми мала кількість пенетранта, який затримався в порожнині невеликого дефекту, виявляється недостатньою, щоб отримати контрастну індикацію при даній товщині шару. Існує також верхній поріг чутливості, який визначається тим, що з широких, але неглибоких дефектів пенетрант вимивається при усуненні надлишків на поверхні.

**Результати експериментальних досліджень діагностики механічних пошкоджень.** Аналіз інформації щодо капілярного методу неруйнівного контролю дає змогу стверджувати [6], що він оптимально доповнює метод крихких індикаторних покриттів для виявлення місць ударів при експлуатації літальних апаратів. Для їх сукупної реалізації необхідно, щоб індикаторна проникаюча речовина (пенетрант) була додана до штатного лакофарбового покриття (ЛФП) (підкладки) у вигляді твердих частинок або емульсії у фарбі та зберігала свої якості до моменту пошкодження крихкого покриття. У зв'язку з тим, що зовнішній вигляд авіатехніки щодо фарбування не повинен змінюватися впродовж її експлуатації, було зроблено висновок про перевагу люмінесцентних пенетрантів. При механічному пошкодженні зовнішнього шару покриття та змочуванні досліджуваної поверхні водою розроблений пенетрант виходить на поверхню, де його можна бачити тільки в ультрафіолетовому світлі.

Розроблено наступну схему підготовки зразків та аналізу руйнування лакофарбових захисних матеріалів і визначення місць розташування концентраторів напружень:

- нанесення захисних ЛФП за стандартною схемою до передостаннього шару;
- нанесення передостаннього шару, модифікованого люмінофором;
- фарбування останнім шаром ЛФП;
- випробування ЛФП за допомогою установки «Константа 1А»;
- спостереження зони удару в ультрафіолетовому світлі.

**Розробка матеріалів для діагностики механічних ушкоджень.** Для модифікації передостаннього шару ЛФП люмінофором нами запропоновано три методики:

1. Модифікація передостаннього шару ЛФП люмінесцентним пенетрантом ЛЖ-6Ам (ТУ У 21585720-049-99), в якому розчинений люмінофор.

2. Модифікація ЛФП за допомогою мікрокапсул розміром 5...10 мкм, що містять люмінофор.

3. Введення в штатну поліуретанову фарбу твердих частинок люмінофора розміром 1...3 мкм.

**Методика 1.** У зв'язку з тим, що при виявленні місць удару згідно з першим варіантом як підкладку використовують поліуретанову емаль, що містить люмінофор, метод крихких покриттів не може бути використаний у стандартному вигляді. Тому для поліпшення виявлення місць удару в якості зовнішнього покриття нами рекомендовано для застосування лак АК-113М. Після висихання отриманого зразка, що складається з підшару модифікованою люмінофором поліуретанової емалі УР-1176, який перекрито шаром лаку АК-113М, нами були випробувані фізико-механічні характеристики отриманого «сендвіча». При цьому виявилось, що характеристики міцності й адгезія до підкладки відповідають стандартним вимогам.

При випробуванні ударної міцності виявилось, що при ударі з енергією 6,7 Дж верхній шар пошкоджується, при цьому нижній шар УР-1176 залишається неушкодженим, а люмінофор, що входить до його складу, просвічує через дефекти покривного шару. Це дає можливість визначити місце удару при освітленні зразка ультрафіолетовим ліхтарем.

На рис. 1 наведено зовнішній вигляд зразка, виготовленого за методикою 1 після випробування на установці «Константа 1А» з енергією удару 6,7 Дж. Через механічне пошкодження у зовнішньому покритті добре видно, що світиться в УФ світлі передостанній шар.



Рис. 1. Зображення зразка, підготовленого за методикою 1, після нанесення удару

**Методика 2.** У зв'язку зі складною технологією мікрокапсулювання люмінофора нами запропоновано реалізувати цей варіант технології шляхом приготування емульсійної фарби на основі штатної поліуретанової фарби. Для цього 1%-й розчин люмінофора в етиленгліколі емульгують у поліуретановій фарбі за допомогою ультразвукової установки. Краплі розчину люмінофора в етиленгліколі, що вводиться в покриття, мають розмір 5...10 мкм (рис. 2). Люмінофор з передостаннього шару виходить на поверхню пошкодженого покриття та світиться в УФ світлі.

**Методика 3.** Найефективнішою, на нашу думку, є методика 3. Після випробування на удар поверхня зволожується водою. Проникаючі в дефекти, вода розчиняє люмінофор, який дифундує на зовнішню поверхню крила та стає видимим при освітленні

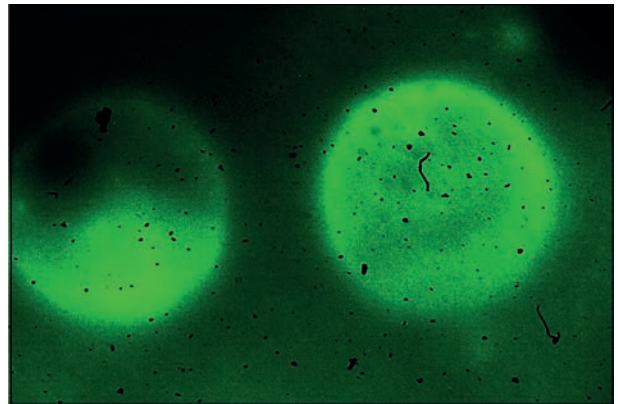


Рис. 2. Капсули розчину люмінофора в суміші етиленгліколю з водою

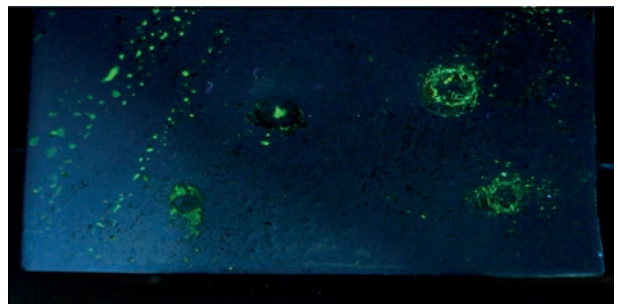


Рис. 3. Зображення зразка, підготовленого за методикою 3, після нанесення удару

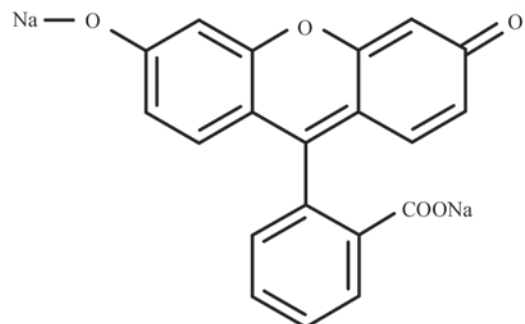


Рис. 4. Уранін А

джерелом УФ опромінення (рис. 3). Індикація місць удару енергією 6...7 Дж за цією методикою стає можливою при товщині зовнішнього шару 30...50 мкм. Для підвищення ефективності даної методики доцільно при її реалізації використовувати в якості зовнішнього покриття лак АК-113м.

**Діагностика місць ударів літальних апаратів.** При створенні системи діагностики стану конструкції літака, яка б дозволяла фіксувати пошкодження внаслідок механічних ударів, було визначено, що найефективнішим є використання методу крихких покриттів, який удосконалено за допомогою люмінесцентних пенетрантів. Для цього авторами запропоновано введення в штатне ЛФП мікрочастинок нетоксичного люмінофору (натриевої солі флуоресцеїна – уранина А), який широко використовують як компонент водних сумішей.

Уранін А являє собою динатрієву сіль флуоресцеїну, що не розчиняється у ЛФП, натомість добре розчиняється у воді з надзвичайно сильною зеленою флуоресценцією. Застосовується у побутовій хімії для підфарбовування лікувальних солей (у т.ч. хвойного концентрату), миючих засобів, мила. В якості основного ЛФП при проведенні експерименту була обрана поліуретанова емаль (наприклад, УР-1176 або її аналоги). Емалі застосовуються для захисту алюмінієвих і сталевих деталей. В авіації разом з поліуретановим покриттям дуже часто використовують акриловий лак АК-113, у тому числі для покриття ділянок поверхні літака, що не були попередньо оброблені поліуретановою емаллю.

Розроблене індикаторне покриття складається з двох шарів: безпосередньо емалі з вмістом ураніну А (підкладки) та крихкого покриття. Для запобігання передчасної люмінесценції ураніну в рідкому лаку звичайні розчинники було замінено на неполярні (метилацетат та уайт-спирит), у результаті чого було отримано лак АК-113м, властивості якого майже не відрізняються від штатного авіаційного лаку, виготовленого на основі звичайних розчинників (див. табл.).

Процес обробки зразків полягав у послідовному нанесенні зазначених шарів за допомогою аерозолю. Для цього еталон із алюмінієвого сплаву Д16АТ розміром 100×100 мм<sup>2</sup> був знежирений та

**Властивості лаку АК-113м**

|  |         |
|--|---------|
| Масова частка нелетучих речовин, %                           | 6...9   |
| Вихідна в'язкість за В34, с                                  | 13...17 |
| Твердість плівки, у.о., по маятниковому приладу:<br>типу М-3 | 0,5     |
| типу ТМЛ (маятник А)   | 0,45    |
| Міцність при згині, мм                                       | 1       |
| Режим затвердіння при 20 °С, год                             | 2       |

оброблений шаром емалі, яка містила люмінофор. Після повного висихання він додатково був пофарбований лаком АК113м і висушений впродовж 2 год. Підготовлений таким чином зразок після обробки водою не світився під світлом УФ лампи. Далі його використовували для підбору режимів технологічного процесу виявлення пошкоджень під дією ударів.

**Випробувальний комплекс «ВК-1» для виявлення механічних пошкоджень внаслідок ударів.** Для метрологічного забезпечення проведення досліджень авторами спроектовано, укомплектовано та виготовлено випробувальний комплекс для проведення досліджень матеріалів для виявлення механічних пошкоджень елементів управління літака. Комплекс розроблено на базі приладу для визначення міцності плівок при ударі.

Комплекс «ВК-1» включає прилад «КОНСТАНТА У-1А» і мікроскоп Sigeta QX500, інформація з якого оброблюється за допомогою спеціально розробленої програми (рис. 5).

Прилад «КОНСТАНТА У-1А» складається зі станини (основи) із запресованим у неї ковадлом. Усередині направляючої труби знаходяться пристосування для утримання та скидання вантажу і власне вантаж. У направляючої труби є проріз, уздовж якого нанесено шкалу 0...500 мм з ціною поділки 10 мм для перевірки висоти встановлення вантажу.

Пристосування для утримання та скидання вантажу (далі за текстом – пристосування) складається з корпусу, стопора, кнопки та вказівної стрілки. Воно вільно переміщається по трубі уздовж прорізу та фіксується на необхідній висоті стопорним гвинтом. Вантаж масою 1 кг складається з обважнювача, рукоятки та конуса. Рукоятка вантажу проходить через проріз напрямної труби. Конус слугує для фіксації вантажу в пристосуванні.



Рис. 5. Комплекс «ВК-1» для проведення досліджень і контролю якості індикаторних матеріалів для виявлення механічних пошкоджень

За допомогою стопорного гвинта пристосування встановлюється за шкалою направляючої труби на необхідну для випробувань висоту. Вантаж за ручкою підводиться до контакту, конус потрапляє в стопор і вантаж автоматично закріплюється (фіксується) у пристосуванні. При натисканні на кнопку конус звільняється зі стопора та вантаж масою 1 кг вільно падає. Після випробування зразок розміщується в портативному мікроскопі, з'єднаному з комп'ютером.

Портативний цифровий мікроскоп QX500 з LED підсвічуванням і збільшенням  $\times 5 \dots 500$  поєднує в собі якість зображення, компактність і портативність. Завдяки підключенню до комп'ютера з'являється можливість записувати фото і відео з QX500, що містить матрицю CMOS і має максимальну роздільну здатність 2.0 МП.

Яскраве підсвічування з 8 діодів з можливістю регулювання гарантує оптимальний підбір освітленості предмета. Наявність діодів, випромінюючих в ультрафіолетовому діапазоні, дозволяє збуджувати люмінесценцію пенетранта в місцях дефектів. Розширені можливості фотографічної та відеозйомки дозволяють робити фотографії з витримкою і 24-бітної передачею кольору та записувати відео з частотою 30 кадрів на секунду.

Для обробки інформації щодо виявлення «слідів» дефектів розроблено комп'ютерну програму на основі операційної системи Windows 2000/xp/Vista/732bit/64bit MAC. Програма дозволяє робити кількісну оцінку індикаторного малюнку «слідів» дефектів.

Міцність плівки при ударі умовно визначають значенням максимальної висоти в сантиметрах, падіння якої на пластинку не завдає механічних пошкоджень покриття (тріщин, відшарування).

Слід від удару виявляють після обробки поверхні водою за яскравим випромінюванням індикаторного покриття при УФ освітленні зони пошкодження (рис. 6). Це обумовлено проникненням

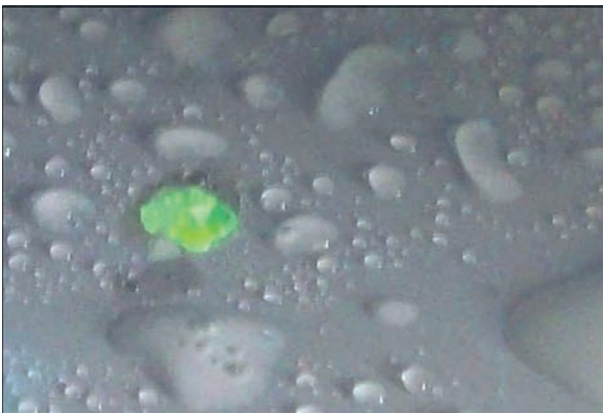


Рис. 6. Зображення зразка, підготовленого за методикою 3, після нанесення удару

водного розчину люмінофору в тріщини крихкого покриття, утворені в результаті удару. Тверді частинки люмінофору розчиняються при змочування поверхні конструкції водою, яка проникає у пошкодження, захоплює сусідні тверді частинки люмінофору та тим самим формує більш розширену зону індикаторного сліду. Цей процес сприяє підвищенню чутливості саме експрес-діагностики.

## Висновки

Внаслідок вивчення проблеми пошкодження елементів керування конструкції літаків під дією ударів птахів та уламків ґрунтових аеродромів запропоновано експрес-методику виявлення пошкоджень на базі поєднання методу крихких індикаторних покриттів і капілярного неруйнівного контролю. Нова методика дозволяє проводити виявлення дефектів габаритних авіаційних конструкцій під час контролю між польотами, що дає змогу підвищити безпеку експлуатації та зменшити витрати на обслуговування.

Для реалізації технології виявлення місць пошкоджень обшивки крила та поверхні літальних апаратів внаслідок механічних ударів обрано метод крихких покриттів, суміщений з капілярним контролем, який був реалізований у вигляді трьох методик, а саме:

- шляхом модифікації штатного поліуретанового ЛФП люмінесцентним пенетрантом, призначеним для капілярного контролю;
- шляхом виготовлення індикаторної емульсійної фарби, яка містить розчин люмінофора;
- шляхом введення в штатну поліуретанову фарбу твердих частинок люмінофора «Ураніна А» розміром 1...3 мкм.

Усі три варіанти дозволяють виявляти місця розташування механічних деформацій при енергії удару, що перевищує 6,7 Дж. Найбільш ефективною (чутливою) серед них є остання методика, що використовує тверду фазу люмінофора, який при контролі розчиняється у воді.

Встановлено, що метод «крихких покриттів» може бути реалізований з використанням лаку АК-113м. На основі акрилової смоли та неполярних розчинників розроблено рецептуру такого лаку, який не розчиняє люмінофор.

Розроблено індикаторне двошарове покриття для тестування цілісності авіаційних конструкцій, які зазнали впливу ударів птахів або інших механічних пошкоджень. Запропоновані склад і технологія експрес-оцінювання результатів проведення неруйнівного контролю дозволяють їх застосування для технічної діагностики літальних апаратів із композитних матеріалів.

Список літератури

1. Тимчик Г.С., Філіппова М.В., Демченко М.О. (2023) *Діагностика напружено-деформованого стану металевих конструкцій. Монографія.* Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка».
2. Касаткін Б.С., Кудрін А.Б., Лобанов Л.М. (1981) *Експериментальні методи дослідження деформацій та напружень : Довідковий посібник.* Київ, Наукова, думка, 1981.
3. 2020) *Principles and Applications of Liquid Penetrant Testing.* ASNT, ISBN 978-1-57117-1-479-6.
4. Казакевич М.Л., Семенец А.И., Дереча В.Я., Казакевич В.М. (2015) Современные задачи диагностирования технического состояния авиационной техники методом проникающих веществ. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 49–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.03.09>
5. Alburger, J.A. (1972) *Testing panel for inspection penetrants having cracks of controlled depth and width.* Patent US3791198A, 5007 Hillard Ave., La Canada, Calif. 9101, Nov. 27, 1972. Appl. No. 309,690.
6. Казакевич М.Л., Семенец О.И., Дереча В.Я. (2015) *Індикаторний матеріал для виявлення дефектів в поверхневих шарах деталей машин.* Патент на корисну модель № 100082. Заявка № U201500018 від 05.01.2015 р. Опубл. 10.07.2015 р. Бюл. № 13. <https://iprop-ua.com/inv/ftxyuqom/>

References

1. Tymchyk, G.S., Filippova, M.V., Demchenko, M.O. (2023) *Diagnostics of stress-strain state of metal structures. Monograph.* Kyiv, KPI, Vyd-vo Politekhnika [in Ukrainian].
2. Kasatkin, B.S., Kudrin, A.B., Lobanov, L.M. (1981) *Experimental methods of strain and stress investigation: Textbook.* Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
3. 2020) *Principles and Applications of Liquid Penetrant Testing.* ASNT, ISBN 978-1-57117-1-479-6.
4. Kazakevich, M.L., Semenets, A.I., Derecha, V.Ya., Lazakevich, V.M. (2015) Modern tasks of diagnostics of technical condition of aviation equipment by penetrant inspection. *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol*, 3, 49–51 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.03.09>
5. Alburger, J.A. (1972) *Testing panel for inspection penetrants having cracks of controlled depth and width.* Patent US3791198A, 5007 Hillard Ave., La Canada, Calif. 9101, Nov. 27, 1972. Appl. No. 309,690.
6. Kazakevych, M.L., Semenets, O.I., Derecha, V.Ya. (2015) *Indicator material for identification of defects in surface layers of machine parts.* Pat. on utility model 100082. Appl. U201500018 of 05.01.2015. Publ. 10.07.15. <https://iprop-ua.com/inv/ftxyuqom/>

DEVELOPMENT OF MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR EXPRESS DIAGNOSTICS OF DAMAGE TO AIRCRAFT STRUCTURES DUE TO IMPACTS

M.L. Kazakevych<sup>1,2</sup>, V.M. Kazakevych<sup>1,2</sup>, O.I. Semenets<sup>3</sup>, O.V. Denyshchenko<sup>1</sup>, P.O. Slobodenyuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: [kazakevich.m@gmail.com](mailto:kazakevich.m@gmail.com)

<sup>2</sup>LLC «NDT Ukraine», Kyiv, Ukraine. E-mail: [m\\_kazakevich@ukr.net](mailto:m_kazakevich@ukr.net)

<sup>3</sup>SC «Antonov». 1 Acad. Tupolev str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: [semenets@antonov.com](mailto:semenets@antonov.com)

The paper is devoted to the development of technology and means of express diagnostics of stress raisers on the surface of aircraft, which are generated as a result of mechanical impacts of birds or gravel fragments when landing on unprepared airfields. The inability to timely detect the places of such impacts can cause catastrophic consequences. The authors conducted a study on the use of a combination of brittle coating methods with capillary testing and developed a technology for express monitoring of the surfaces of large-sized aircraft structures to detect stress and damage. It is proposed to add special coatings to the standardized protection of aircraft structures, including paint containing a phosphor indicator, and a brittle layer of aviation varnish. If the coating is damaged by mechanical impact, moisture will dissolve the indicator and UV lighting will visualize the impact site. 6 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: *express diagnostics of aircraft surfaces, stress raisers, brittle coating method, capillary method of non-destructive testing*

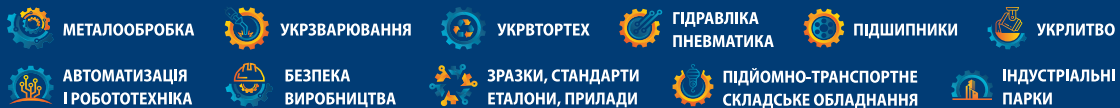
Отримано 08.10.25

Отримано у переглянутому вигляді 04.11.25

Прийнято 12.12.25

XXIV МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2026

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ



Генеральний інформаційний партнер:



26-28 травня

Місце проведення: МВЦ, м. Київ, Броварський пр-т, 15, станція метро «Лівобережна»

+38 (095) 268-05-85, +38 (096) 505-52-66

[plast@iec-expo.com.ua](mailto:plast@iec-expo.com.ua)  
[www.iec-expo.com.ua](http://www.iec-expo.com.ua)



# ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ МАГНІТНИХ СУСПЕНЗІЙ

В.С. Якотюк<sup>1</sup>, С.М. Глабець<sup>1,2</sup>, Ю.Ю. Лисенко<sup>1</sup>, А.С. Момот<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: [j.lysenko@kpi.ua](mailto:j.lysenko@kpi.ua)

<sup>2</sup>ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади». 03061, м. Київ, вул. Патріотів, 103. E-mail: [s.hlabets@kpi.ua](mailto:s.hlabets@kpi.ua)

Магнітопорошковий контроль є ефективним методом неруйнівного контролю, що використовується для виявлення дефектів у феромагнітних матеріалах. Незважаючи на постійний розвиток і впровадження сучасних технологій, практичні аспекти застосування та аналіз ефективності витратних матеріалів, зокрема магнітних суспензій, залишаються вкрай важливими. Особливої актуальності це набуває в умовах обмеженого доступу до нових ресурсів. У статті проаналізовано практичний досвід застосування різних магнітних суспензій та проведено експериментальну оцінку їхньої ефективності на стандартних зразках MTU-3 та MT Тип 2, що відносяться відповідно до типів 1 та 2 згідно з EN ISO 9934-2:2015. Дослідження містило аналіз готових до застосування суспензій в аерозольних балонах, концентратів і суспензій з різним терміном експлуатації та приготування. Результати експериментів демонструють вплив якості суспензії та терміну її придатності на ефективність виявлення дефектів, підкреслюючи необхідність ретельного вибору та контролю стану витратних матеріалів для забезпечення надійності. Виявлені відмінності в ефективності різних суспензій та вплив терміну їхньої експлуатації на чутливість контролю мають важливе практичне значення для фахівців з неруйнівного контролю. Бібліогр. 15, рис. 4.

*Ключові слова:* магнітопорошковий контроль, сучасні технології неруйнівного контролю, флуоресцентні суспензії, магнітні концентрати, ефективність, аналіз придатності, виявлення дефектів, опрацювання зображень

**Вступ.** Магнітопорошковий контроль (МПК) залишається важливим методом неруйнівного контролю (НК) протягом тривалого часу. Це зумовлено його ефективністю, відносно низькою вартістю та простотою застосування для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів у феромагнітних матеріалах [1, 2]. У сучасній промисловості зростають вимоги до якості та надійності виробів, що стимулює постійний розвиток методів НК. Останні технологічні досягнення надають нові можливості для покращення чутливості, точності та продуктивності МПК, адаптуючи його до сучасних промислових потреб.

Сучасні системи для МПК оснащуються вдосконаленими джерелами намагнічування, що дає змогу точніше контролювати параметри магнітного поля та оптимізувати процес виявлення дефектів [3, 4]. Покращення характеристик магнітних порошків, таких як форма, розмір і магнітні властивості частинок, поліпшує їхню здатність скупчуватись у зоні дефектів, збільшуючи контрастність і чіткість індикацій дефектів [5]. Як наслідок, на ринку матеріалів для МПК зараз представлені магнітні порошки з флуоресцентними та кольоровими пігментами, що забезпечують кращу візуалізацію дефектів за різних умов освітлення та кольору поверхні ОК.

Автоматизація є ще одним ключовим напрямком розвитку МПК. Впровадження роботизованих систем дає змогу точніше контролювати параметри магнітного поля та оптимізувати процес виявлення дефектів [3, 4].

них систем для нанесення магнітного порошку та сканування поверхні об'єкта контролю дає змогу значно підвищити продуктивність і відтворюваність контролю, оптимізувати витрати розхідних матеріалів, а також зменшити вплив людського фактора [6]. Автоматизовані системи аналізу зображень, отриманих під час МПК, забезпечують отримання швидкої та об'єктивної оцінки результатів контролю та можливість їх документування, мінімізуючи вплив суб'єктивного фактора на інтерпретацію індикацій [7–9].

Актуальні дослідження в області технологій МПК спрямовані на створення нових типів магнітних частинок з покращеними фізичними властивостями. Зокрема розробляються магнітні порошки з частинками з низькою схильністю до скупчення, що забезпечує кращу дисперсність і рівномірне нанесення суспензії на поверхню об'єктів контролю (ОК), а також частинки з підвищеною чутливістю до малих дефектів. Використання наноматеріалів у магнітних порошках відкриває нові перспективи для підвищення чутливості та роздільної здатності МПК [10, 11].

Не менш важливим для забезпечення надійності МПК є розроблення матеріалів і модернізація методик контролю, що знижують вплив зовнішніх факторів, таких як: температура, вологість і забруднення поверхні. Впровадження захисних покриттів

С.М. Глабець – <https://orcid.org/0009-0004-2740-9209>, Ю.Ю. Лисенко – <https://orcid.org/0000-0001-9110-6684>, А.С. Момот – <https://orcid.org/0000-0001-9092-6699>

© В.С. Якотюк, С.М. Глабець, Ю.Ю. Лисенко, А.С. Момот 2025

та оптимізованих складів суспензій дає змогу проводити контроль якісно та відтворювано незалежно від умов навколишнього середовища [12–14].

Враховуючи сучасні тенденції розвитку та критичну важливість практичного застосування МПК в умовах обмеженого доступу до нових і високоякісних витратних матеріалів, **метою** даної статті є аналіз придатності магнітних суспензій – зокрема тих, чий термін придатності минув або наближається до завершення (або навіть перевищений). Таке дослідження має практичне значення для оперативного контролю в нестандартних, зокрема польових (військових) умовах [15].

**Магнітні суспензії та концентрати.** Магнітні суспензії та концентрати відіграють ключову роль як витратні матеріали МПК. За своєю суттю вони являють собою дрібнодисперсні феромагнітні частинки, дисперговані в рідині-носії, якою може бути вода або нафтопродукти (масло, гас та ін.). Вибір конкретного типу суспензії визначається комплексом факторів, включаючи вимоги до чутливості контролю, стану виробу, що досліджується, просторової орієнтації поверхні ОК та умови проведення інспекції.

Виробники пропонують широкий спектр витратних матеріалів для МПК, які відрізняються властивостями, класом чутливості та призначенням. Розрізняють сухі порошки, рідкі концентрати для приготування суспензій та готові суспензії в аерозольних балонах. На практиці найбільш поширені:

- флуоресцентні магнітопорошкові суспензії, які використовуються для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів (MR-76F від MR Chemie, 14A від Magnaflux). Флуоресцентні частинки, що входять до їхнього складу, забезпечують високу контрастність індикацій при освітленні ультрафіолетовим (УФ) світлом, що значно полегшує процес виявлення дефектів;

- кольорові (чорні, зелені, червоні тощо) магнітопорошкові суспензії, які застосовуються для широкого спектра завдань контролю, зокрема виявлення тріщин і макродефектів (Magnaflux 7HF, 8A).

Залежно від конкретних вимог, ці суспензії можуть бути як флуоресцентними, так і кольоровими.

Магнітні концентрати використовуються для приготування робочих суспензій шляхом їх розведення у відповідній рідині-носії. Використання концентратів є економічно вигідним і забезпечує зручність транспортування та зберігання, особливо за необхідності виконання значних обсягів МПК. Серед магнітних концентратів, що отримали позитивні відгуки на практиці, можна виділити на-

ступні: MR-158 (високочутливий флуоресцентний концентрат), FW1 AC (для приготування суспензій загального призначення), Magnaflux 14A (для водорозчинних суспензій із задовільною розчинністю та стабільністю), Magnaflux 20B (флуоресцентний концентрат для високочутливих суспензій), Magnaflux 14AM (для суспензій з високою чутливістю та довговічністю) тощо. Вибір оптимального магнітного концентрату залежить від специфічних вимог до контролю, таких як: необхідна чутливість, тип дефектів, що підлягають виявленню, та конкретні умови проведення перевірки.

**Експериментальне дослідження ефективності магнітних суспензій.**

*Матеріали та методи.* Для оцінювання ефективності різних магнітних суспензій було проведено експериментальне дослідження з використанням стандартних зразків MTU-3 Тип 1 (висота 10 мм, діаметр 50 мм, ширина розкриття тріщин 2...10 мкм) та MT Тип 2 (довжина 154 мм, ширина 40 мм, висота 18 мм). MTU-3 та MT Тип 2 відповідають зразкам типу 1 та 2 відповідно до EN ISO 9934-2:2015 [13]. Паспортні зображення, характерні для використовуваних зразків, наведено на рис. 1. Відповідно до методики, зазначеної у EN ISO 9934-1 [13], зразки були підготовлені – проведено їх очищення від забруднень, попередній візуальний огляд, для MT Тип 2 проведено градуювання згідно з методикою EN ISO 9934-2 [14].

У процесі експерименту напруженість магнітного поля, виміряна магнітометром Novotest МФ-1, у ділянках зразка з мітками «+4» та «-4» становила +100 та -100 А/м відповідно.

Використовувались наступні магнітні суспензії:

1. суспензія №1: FW1 AC, виробництва 2024 р. (термін придатності 2 роки), розведена перед експериментальним дослідженням;

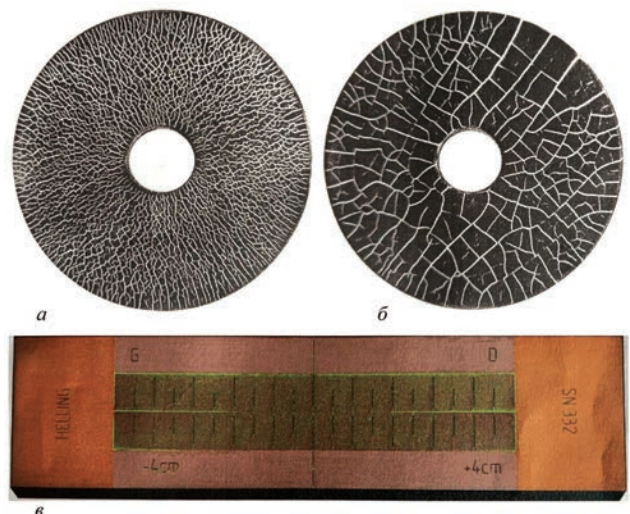


Рис. 1. Паспортні зображення зразків MTU-3 Тип 1 (а – сторона А, б – сторона Б) та MT Тип 2 (в)

2. суспензія №2: MR 76 F, виробництва 2024 р. (термін придатності 3 роки), має масляну основу в аерозольному балоні;

3. суспензія №3: MR – 158, приготована у 2021 р. з концентрату 2016 р. випуску (термін придатності концентрату 3 роки);

4. суспензія №4: MR – 158, приготована безпосередньо перед експериментом з концентрату 2016 р. випуску (термін придатності 3 роки).

Контроль проводився у затіненому приміщенні з використанням УФ-освітлення з параметрами, що рекомендовано для флуоресцентних суспензій. Результати контролю оцінювалися візуально за якістю нанесеного покриття та чіткістю індикацій дефектів, порівнюючи їх з еталонними зображеннями зразків.

*Результати експерименту та їх обговорення.* Результати експерименту, проведеного 2025 р., продемонстрували різну ефективність випробуваних магнітних суспензій. На зразку MTU-3 суспензії №1 та №2 виявилися найбільш ефективними, чітко відобразивши усі дефекти, передбачені паспортом зразка (рис. 2).

Суспензія №3 очікувано продемонструвала незадовільні результати. Як видно з рис. 3, а та рис. 3, б, дефекти на стороні А не були виявлені, а на стороні Б – є ледь помітними. У той же час, суспензія №4 показала певні проблеми з рівномірністю покриття, що також ускладнює проведення якісного контролю (рис. 3, в та рис. 3, г). Однак у порівнянні з резуль-

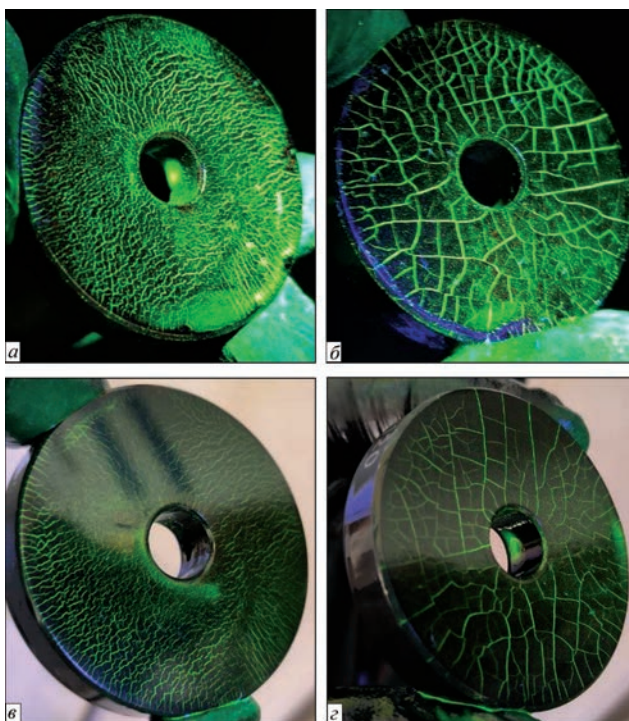


Рис. 2. Зразок MTU 3 з нанесеними суспензіями №1 (а та б відповідає сторонам А та Б) та №2 (в та г відповідає сторонам А та Б)

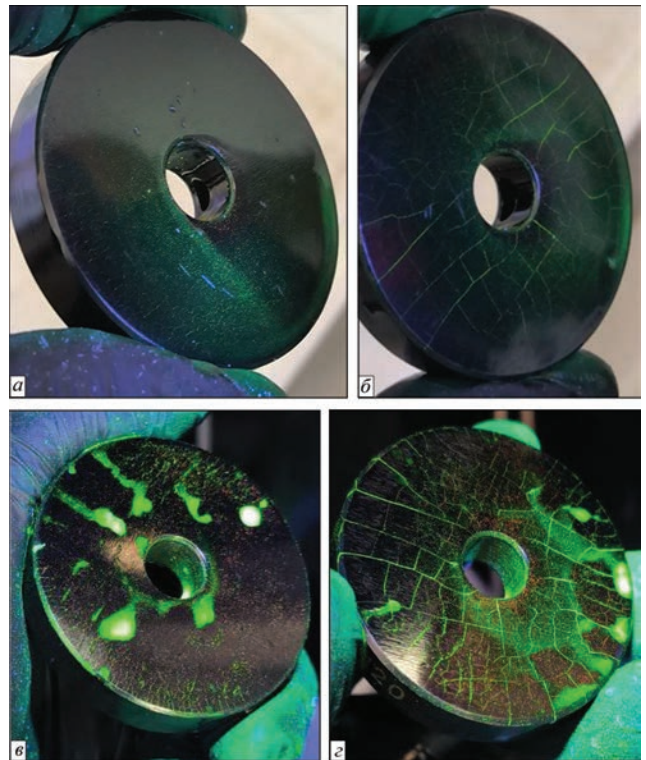


Рис. 3. Зразок MTU 3 з нанесеними суспензіями №3 (а та б відповідає сторонам А та Б) та №4 (в та г відповідає сторонам А та Б)

татами суспензії №3 результати є кращими, хоч і не відповідають паспорту зразка повною мірою.

На рис. 4 наведено результати тестування зразка МТ Тип 2, на якому випробувані суспензії виявили очікувані індикації відповідно до паспорта зразка, хоча й з різною рівномірністю покриття поверхні. Так, суспензії №1 та №2 продемонстрували довжину індикацій 88 та 87 мм відповідно (рис. 4, а та рис. 4, б). У той же час, суспензія №3 дозволила отримати індикацію завдовжки 77 мм (рис. 4, в), а така ж суспензія, що була приготована безпосередньо перед експериментом (суспензія №4), не надала впевненого результату (рис. 4, г).

Результати експерименту підтверджують важливість контролю якості магнітних суспензій та умов їхнього зберігання та експлуатації для ефективності МПК. Суспензії №1 та №2 продемонстрували рівномірне покриття поверхні зразка та показали високу надійність виявлення дефектів.

Суспензія №3 показала прийнятну покриваність поверхні зразка, але така ж суспензія, приготована безпосередньо перед експериментом, мала серйозніші проблеми із рівномірністю покриття поверхні, що ускладнило якісний контроль. Погана ефективність суспензії №3, очевидно, пов'язана із закінченням терміну її придатності, що призвело до погіршення її властивостей. Незадовільна рівномірність покриття у свіжоприготованій суспензії №4 може свідчити про аналогічну проблему з концентратом.

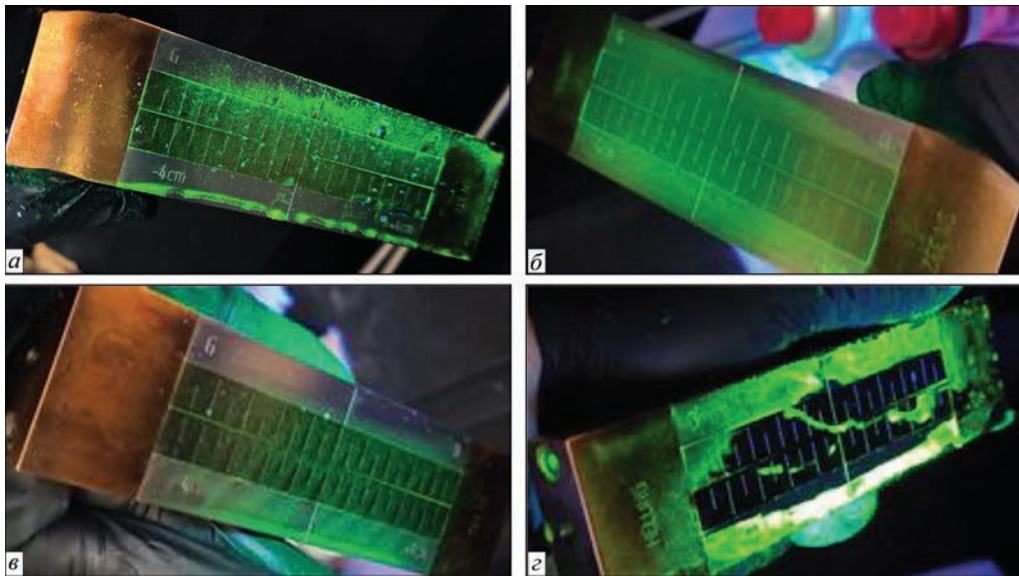


Рис. 4. Зразок МТ Тип 2 з нанесеними суспензіями №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г)

## Висновки

Проведені експерименти показали, що ефективність магнітних суспензій суттєво залежить від їхнього типу, стану придатності та умов зберігання. На зразку МТУ-3 суспензії №1 і №2 виявилися найефективнішими, показавши усі дефекти, які мають бути видимі на цьому зразку відповідно до паспорта. Натомість суспензія №3 продемонструвала незадовільні результати: тріщини на стороні А не були виявлені, а тріщини на стороні Б – ледь помітні. Це підтверджує, що тривалий термін зберігання готової суспензії після приготування з концентрату може призвести до погіршення її властивостей, унеможливаючи якісне виявлення дефектів. У той час як свіжоприготована суспензія (№4) мала кращі результати, але також мала проблеми з рівномірністю покриття зразка МТУ-3 та не відповідала паспорту повною мірою.

На зразку МТ Тип 2 суспензії №1 та №2 продемонстрували сумарну довжину індикацій 88 та 87 мм відповідно. Суспензія №4 досягла 77 мм, тоді як №3 не надала впевнених результатів.

Таким чином, можна зробити висновок, що суспензії №1 і №2 є найефективнішими для використання, забезпечуючи високу якість виявлення дефектів впродовж усього терміну їхньої придатності. Результати дослідження наочно демонструють, що використання магнітних суспензій після закінчення рекомендованого терміну придатності може призвести до суттєвого зниження ефективності МПК. Це ще раз підтверджує важливість перевірки якості матеріалів безпосередньо перед використанням згідно з вимогами нормативних документів з метою досягнення необхідної чутливості, рівномірності покриття, контрасту (для ультрафіолету) та якості контролю.

Дослідження має практичне значення для оперативного контролю в польових (військових) умовах з обмеженими ресурсами, адже використання прострочених матеріалів знижує надійність МПК. Рекомендовано проводити перевірку концентрату перед розведенням, уникати тривалого зберігання розведених форм і пріоритет свіжих матеріалів для забезпечення чутливості.

## Список літератури/References

1. Куц Ю.В., Протасов А.Г., Цапенко В.К., Єременко В.С., Лисенко Ю.Ю. (2012) *Магнітний неруйнівний контроль: Навчальний посібник*. Київ, НТУУ «КПІ». Kuts, Yu. V., Protasov, A. G., Tsapenko, V. K., Eremenko, V. S., Lysenko, Y. Yu. (2012) *Magnetic non-destructive testing: Textbook*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
2. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. (2016) *Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник*. Ужгород, Видавництво УжНУ. Suslikov, L. M., Studenyak, I. P. (2016) *Non-destructive testing methods: Textbook*. Uzhhorod, UzhNU Publishing House [in Ukrainian].
3. Wright, M. (2017) *Nondestructive Testing Methods*. In: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe157>
4. Учанін В.М., Мінаков С.М., Соломаха Р.М. (2024) Дослідження залишкової намагніченості сталевих конструкцій після локального намагнічування приставним магнітним перетворювачем. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 3–7. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.01.01>  
Uchanin, V. M., Minakov, S. M., Solomakha, R. M. (2024) Research of the residual magnetization of steel structures after local magnetization with an attachable magnetic transducer. *Tekhnichna Diahnostyka ta Neruinivnyi Kontrol*, 1, 3–7 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.01.01>
5. (2020) *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Ed. by Hellier, Charles J., 3rd Ed. New York, McGraw-Hill Education. ISBN: 9781260441437
6. Tadamalle, P., Thopate, S., Tatiya, P. et al. (2021) Automation of magnetic particle inspection machine for performance optimization. *Intern. Advanced Research J. in Science, Engineering and Technology*, 8(6), 8–15. DOI: <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2021.8602>
7. Chen, Y., Kang, Y., Feng, B. et al. (2022) Automatic defect identification in magnetic particle testing using a digital

- model aided De-noising method. *Measurement*, **198**, 111427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111427>
8. Galagan, R., Andreiev, S., Stelmakh, N., Rafalska, Y., Momot, A. (2024) Automation of polycystic ovary syndrome diagnostics through machine learning algorithms in ultrasound imaging. *Applied Computer Science*, **20(2)**, 194–204. DOI: <https://doi.org/10.35784/acs-2024-24>
  9. Storozhyk, D., Protasov, A., Kuts, Y. et al. (2024) Enhancing neural network efficiency in automated image analysis for thermal nondestructive testing. *J. of Theoretical and Applied Mechanics*, **54(2)**, 242–252. DOI: <https://doi.org/10.55787/jtams.24.54.2.242>
  10. Li, Y., Kang, Y., Chen, Y., Guo, Y., Duan, Z., Feng, B. (2024) Feature enhancement method for magnetic particle testing based on isolation strip. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **73**, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3373080>
  11. Martínez-Pedrero, F. (2020) Static and dynamic behavior of magnetic particles at fluid interfaces. *Advances in Colloid and Interface Sci.*, **284**, 102233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102233>
  12. ASTM E709-21. *Standard Guide for Magnetic Particle Testing*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
  13. EN ISO 9934-1:2016. *Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Pt 1: General principles*. Geneva, International Organization for Standardization.
  14. EN ISO 9934-2:2015. *Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Pt 2: Detection media*. Geneva, International Organization for Standardization.
  15. Poddubchenko, A., Lysenko, I., Hlabets, S., Posypaiko, Y., Pavlyi, O. (2022) Experience in the use of surface NDT for the diagnostics of military equipment during full-scale military operations. *Intern. J. «NDT Days»*, **5(5)**, 277–282 [in Russian].

## PRACTICAL EXPERIENCE OF APPLICATION AND ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF VARIOUS MAGNETIC SUSPENSIONS

V.S. Yakotyuk, S.M. Glabets, Yu.Yu. Lysenko, A.S. Momot

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

Magnetic particle inspection is an efficient non-destructive testing technique, which is used to detect defects in ferromagnetic materials. Despite the continuous development and introduction of modern technologies, practical aspects of application and analysis of the effectiveness of consumable materials, in particular, magnetic suspensions, remain extremely important. It becomes especially relevant under the conditions of a limited access to new resources. In this paper the practical experience of application of various magnetic suspensions is analyzed, and experimental assessment of their effectiveness is performed on standard specimens MTU-3 and MT Type 2, which belong to type 1 and type 2 according to EN ISO 9934-2:2015, respectively. The study included analysis of ready-to-use suspensions in aerosol cans, concentrates and suspensions with different shelf life and preparation. Experimental results demonstrate the influence of the suspension quality and its shelf life on the effectiveness of defect detection, emphasizing the need for a thorough selection and monitoring of the condition of consumable materials to ensure the reliability. The revealed differences in the effectiveness of various suspensions and the influence of their shelf life on inspection sensitivity are of great practical importance for specialists on non-destructive testing. 15 Ref., 4 Fig.

*Keywords: magnetic particle inspection, modern non-destructive testing technologies, fluorescent suspensions, magnetic concentrates, effectiveness, feasibility analysis, defect detection, image processing*

Отримано 12.11.25

Отримано у переглянутому вигляді 10.12.25

Прийнято 19.12.25



## МІЖНАРОДНА ВИСТАВКА «НАФТОГАЗЕКСПО 2025»



З 14 по 16 жовтня 2025 року у Міжнародному виставковому центрі (м. Київ) відбулася Міжнародна виставка «НАФТОГАЗЕКСПО 2025». Захід проходив у рамках Міжнародного бізнес-форуму «5Е» одночасно з виставками гірничодобувного та енергетичного спрямування: MINING&MINERALSEXPO, ESOENERGYEXPO, ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВОСТІ, ELECTROINSTALL, E-COMPS+DIGITEC. Виставку відвідали близько 10 тис. відвідувачів з 22 країн світу: Австрії, Алжиру, Великобританії, Греції, Італії, Іспанії, Індії, Канади, Китаю, Кувейту, Марокко, Нідерландів, Німеччини, Польщі, Румунії, Словаччини, США,

Туреччини, України, Франції, Чехії. Загальна експозиційна площа становила понад 11 тис. м<sup>2</sup>.

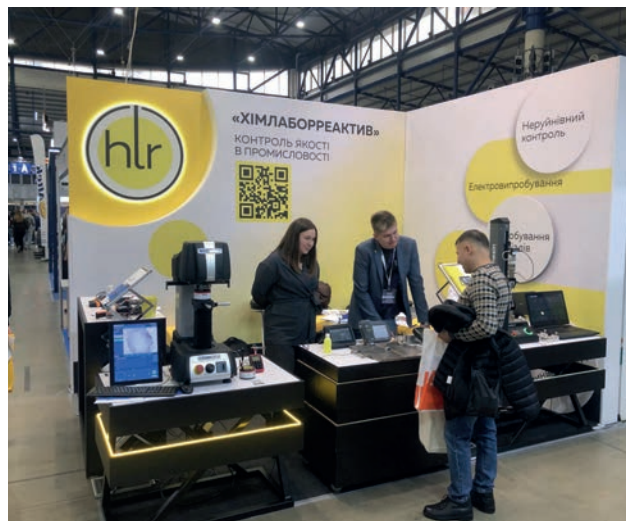
У рамках виставки «НАФТОГАЗЕКСПО 2025» було представлено: техніку, технології та сервіси для буріння свердловин їх освоєння та ремонту; обладнання для резервуарних парків, LNG-терміналів, сховищ нафти і газу; труби великого діаметру та ізоляція; трубопровідну арматуру, приводи та системи автоматики; прилади вимірювання та контролю; газорегуляторне обладнання та лічильники; лабораторне обладнання; енергетичне та електротехнічне обладнання; системи та засоби індивідуального захисту, спецодяг та інше.

Під час роботи виставки було проведено семінар «Зварювання та неруйнівний контроль в нафтогазовій галузі», організований Видавничим домом «ПАТОН», який викликав широкий інтерес у відвідувачів виставки, серед яких представники АТ «АНТОНОВ», ТОВ «Інтронсет», ТОВ «Газорозподільчі мережі України», ТОВ СП «Товариство технічного нагляду «ДІЕКС», ТОВ ТАС «Полтававагон», НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Програма конференції містила наукові доповіді спеціалістів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», ТОВ «Плазма-Мастер Лтд», Асоціації «ОКО».

Було заслухано 11 доповідей, а саме: Л.І. Ниркова «Корозійно-механічна тривкість трубної сталі тривало експлуатованого магістрального газопроводу»; С.А. Резнік (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ) «Механізоване зварювання резервуарів нафтогазової галузі»; О.І. Сом (ТОВ «Плазма-Мастер Лтд», м. Київ) «Біметалеві втулки



Стенд ТОВ НВФ «УЛЬТРАКОН» під час роботи виставки



Стенд «Хімлаборреактив» під час роботи виставки



Під час проведення семінару



Доповідь Л.І. Ниркової



Доповідь С.А. Резніка

бурих насосів з плазмовим наплавленням зносостійкого шару»; О.В. Павлій (ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», м. Київ) «Еволюція рентгенапаратів для дефектоскопії трубопроводів. Презентація CP 200B», «Direct Radiography – Системи Go-scan - універсальні рішення, що зробили революцію в дефектоскопії» та «Практичні кейси цифрової радіографії - приклади рішень різних задач дефектоскопії»; В.П. Дядін (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ) «Особливості діагностичного контролю нафтохімічного обладнання, яке знаходиться тривалий час в експлуатації»; Ю.М. Посипайко (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ) «Діагностування технічного стану зварних резерву-



Доповідь А. Паренюк

арів з метою їх ремонту та відновлення експлуатації»; А. Паренюк (OKOndt GROUP, м. Київ) «Метод TOFD як засіб для підвищення якості та продуктивності проведення ультразвукового контролю зварних з'єднань»; С.М. Глабець (ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», м. Київ) «Практичні підходи з ультразвукового контролю зварних з'єднань поліетиленових труб».

Доповідачі та учасники семінару зазначили важливість проведення подібних заходів, що сприяють плідному обміну думками та розвитку співпраці між науковцями та виробничниками та висловили сподівання на проведення подібних заходів у майбутньому.

Ірина Романова, Видавничий дім «ПАТОН»

## НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ

27 лютого 2025 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона відбулася науково-технічна конференція «Зварювання та споріднені технології для відновлення України», в якій взяли участь більше семидесяти дослідників, інженерів та виробничників із інститутів та організацій з Києва, Дніпра, Львова, Каменського, Полтави. Конференція проходила у форматі пленарних і стендових доповідей. Відкрив конференцію директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона академік НАН України І.В. Кривцун. Він зазначив, що конференція присвячена науково-технічним проблемам зварювання та споріднених технологій. Без перебільшення можна стверджувати, що зварювальні технології, які вже більше ста років широко використовуються у різних галузях промисловості, відносяться до найактуальніших напрямів розвитку сучасного промислового виробництва і потенційні можливості розвитку цих технологій потребують подальших наукових досліджень та практичної перевірки, чому й присвячена ця конференція.

Під час конференції були заслухані наступні пленарні доповіді:

- Матвійчук В.А. «Компоненти ГТД зі сплаву ВТ6: адитивне виготовлення та властивості» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона);
- Ковальчук ДВ. «xBeam 3D Metal Printing – нові дослідження, матеріали і технологічні рішення» (ТОВ «Червона Хвиля», м. Київ);
- Яровицян О., Черв'яков М., Мотруніч С., Волосатов І., Звягінцева Г., Пестов В., Хрущов Г., Томко Д., Джульєнь Д. «Матеріалознавчі проблеми дугового адитивного виробництва деталей зі сплаву Inconel 625» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона);
- Коржик В.М., Ілляшенко Є.В., Чигілейчик С.Л., Торба Ю.І., Чечет О.В. «3D друк виробів із жароміцних сплавів адитивним плазмово-дуговим наплавленням: нові технологічні підходи та розробка обладнання» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона, АО «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка, НУ «Запорізька політехніка»);
- Шаповалов Є.В., Долиненко В.В., Коляда В.О., Ващенко В.М., Новодранов А.С., Ващенко О.Ю., Мангольд А.М., Клішар Ф.С. «Розробка та дослідження робототехнічної системи для реалізації адитивної технології WAAM виготовлення бурового інструменту» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона);

- Коржик В.М., Строгонов Д.В., Терещенко О.С. «Застосування дугових плазмотронів з трубчастими мідними електродами для отримання дрібнодисперсних сферичних порошків металевих сплавів» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона);

- Демченко В., Номіровський Д., Кривцун І. «Оптимізація форми імпульсів струму за критерієм силової дії модульованого струму» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київський національний університет ім. Тараса Шевченка);

- Kovalenko Dmytro, Krivtsun Igor, Biber Alexander, Mokrov Oleg, Pavlov Oleksii. «Features of increasing penetration in high-frequency pulsed TIG welding of carbon and stainless steel (experimental studies)» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона, RWTH Aachen University, ISF - Welding and Joining Institute);

- Лобанов Л., Стельмах Д., Дядін В., Савицький В. «Технічна діагностика стану мостів на основі фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона);

- Махненко О.В., Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Махненко О.О. «Чисельний аналіз експлуатаційної міцності зварних поглинаючих стрижнів системи управління та захисту енергетичного реактора ВВЕР-1000» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона);

- Павлій О.В. «Цифрові системи радіографічного контролю зварних швів» (ТОВ «НВФ Діагностичні прилади», м. Київ);

- Юдін Ю.В. «Колаборативні роботи АОТАЙ — системне рішення кадрових криз, спричинених нестачею кваліфікованих робітників на промислових підприємствах» (ТОВ «ВТЦ», м. Київ).

На конференції також було представлено 48 стендових доповідей в галузі зварювання, електрометалургії, неруйнівного контролю, технічної діагностики і споріднених технологій, отримані фахівцями з України та країн далекого зарубіжжя.

Декілька компаній взяли участь в експрес-виставці обладнання, матеріалів і технологій для зварювання та неруйнівного контролю. Серед них:

- ПРАТ «Асоціація ОКО», м. Київ – провідний український розробник ультразвукових і вихреstromових дефектоскопів, у т.ч. для контролю рейок та зварних швів;

- ТОВ «НВФ Діагностичні прилади», м. Київ – обладнання та матеріали для неруйнівного контролю, послуги з неруйнівного контролю та дефектоскопії;



Виступ академіка НАН України І.В. Кривцуна

- ТОВ «ВТЦ», Центр Зварювальних технологій, м. Київ – повний спектр обладнання для зварювання трубопроводів, колаборативні роботи АОТАЙ;
- ТОВ «ВЕЛТЕК», м. Київ - м. Дніпро – лідер виробництва порошкових дротів в Україні;
- ТОВ «Червона Хвиля», м. Київ – технології 3D друку якісних деталей з титану, ніобію, нержавкої сталі, міді та інших металів за технологією xBeam 3D Metal Printing з використанням зварювального дроту;
- ТОВ «Промавтосварка», м. Київ – обладнання для зварювання та комплекси для електродугової металізації.



Пленарна доповідь Д.І. Стельмаха

Захід об'єднав провідних українських дослідників, інженерів і представників промисловості, які оприлюднили актуальні результати досліджень і технологічні розробки у сфері зварювання та матеріалознавства. У межах конференції були презентовані напрацювання з адитивного виробництва, роботизованих комплексів, високотемпературних матеріалів, неруйнівного контролю та цифрових технологій у зварювальних процесах. Особливу увагу спікери приділили тому, як сучасні технології можуть бути застосовані для відновлення критичної інфраструктури, мостів, енергетичних систем і промислових об'єктів у післявоєнний період. Учасники наголосили на важливості інтеграції наукових розробок у практику, розширення співпраці між науковою спільнотою та бізнесом, а також на необхідності підготовки висококваліфікованих кадрів для реалізації масштабних проектів відбудови. Конференція стала знаковою подією для обміну досвідом і визначення стратегічних напрямів розвитку зварювальних технологій в Україні. Отримані результати сприятимуть посиленню технологічного потенціалу держави та формуванню ефективних рішень для швидкого і безпечного відновлення інфраструктури.



Під час сесії стендових доповідей



Виставка обладнання, матеріалів і технологій для зварювання та неруйнівного контролю

Враховуючи масштаб проблем у галузі зварювання при реалізації проектів відбудови України, учасники конференції висловили побажання в проведенні конференції аналогічного спрямування кожного наступного року 27 листопада – у день народження академіка Бориса Євгеновича Патона.

Зі збіркою тез доповідей конференції можна ознайомитись за посиланням: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/WRT2025>.

Олександр Зельніченко, Ірина Романова  
Видавничий дім «ПАТОН»



**НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА  
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**  
член Європейської федерації з неруйнівного контролю  
член Міжнародного комітету з неруйнівного контролю



# УКРАЇНСЬКЕ ТОВАРИСТВО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ: 35 РОКІВ ВІД ДНЯ ЗАСНУВАННЯ

**В.О. Троїцький, Ю.М. Посипайко, А.Л. Шекеро**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

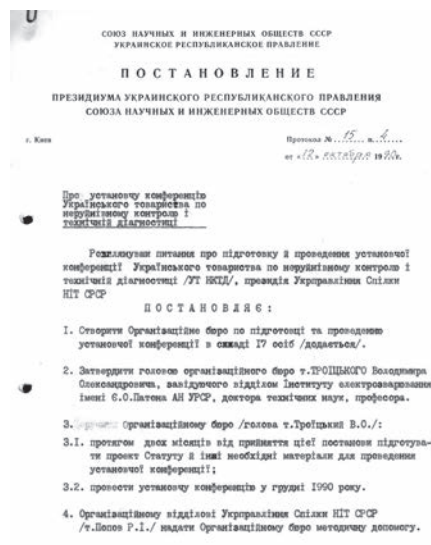
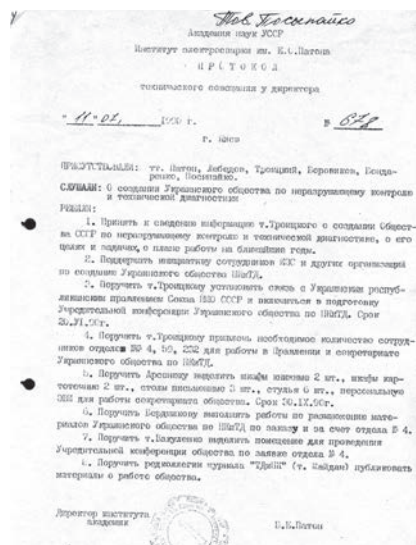
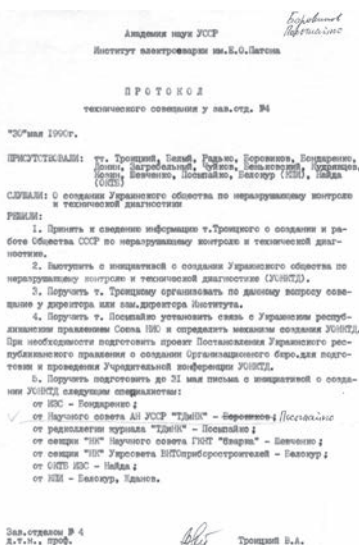
16 листопада 2025 р. виповнилось 35 років від дня заснування Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД) – всеукраїнської громадської організації, що об’єднує науковців, інженерів і робітників різних організацій, підприємств і лабораторій, професійна діяльність яких пов’язана з НК і ТД.

Офіційна історія створення Товариства починалась в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ ім. Є.О. Патона) з засідання за участі співробітників відділу №4 і Київського політехнічного інституту, де було прийнято рішення виступити з ініціативою заснування Українського товариства НКТД. Велику підтримку у створенні УТ НКТД надав директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Президент Національної академії наук України академік Б.Є. Патон. Саме в його кабінеті 11 липня 1990 р. відбулась технічна нарада з цього питання, на якій ініціативній групі в складі Ю.М. Посипайка, О.С. Боровикова, В.О. Троїцького,

Ю.К. Бондаренка, М.Г. Білого було дано доручення розпочати підготовчі роботи з організації установчої конференції та звернутися до Українського республіканського правління Спілки наукових та інженерних товариств. Підсумком організаційної роботи стала Постанова Президії УРП Спілки НІТ «Про установчу конференцію Українського товариства по неруйнівному контролю і технічній діагностиці», згідно з якою був визначений персональний склад Організаційного бюро та його Голова, доручено підготувати проект Статуту та інші необхідні матеріали і, власне, провести саму установчу конференцію.

16 листопада 1990 р. у Києві в історичній великій залі корпусу №1 ІЕЗ ім. Є.О. Патона відбулась Установча конференція, яка прийняла Статут Товариства, обрала Правління та Голову (проф. В.О. Троїцький).

Згідно з прийнятим на конференції Статутом головною метою Товариства була визначена «консолідація зусиль науково-технічних праців-



Протоколи технічних нарад в ІЕЗ ім. Є.О. Патона щодо заснування Українського товариства НКТД

Постанова Президії УРП Спілки НІТ «Про установчу конференцію Українського товариства по неруйнівному контролю і технічній діагностиці»

**ПОСТАНОВА**  
 Установчої конференції встановчого товариства українського контролю та технічної діагностики  
 м. Київ 16 листопада 1990 р.

1. Створити Українське товариство українського контролю та технічної діагностики (УТ НКТД) – техніку громадської організації.

2. Визначити Старець УТ НКТД:

3. Обрати до складу правління УТ НКТД:

- Борисенко В.М., к.т.н., доцент ІНІТ, м.Київ
- Вікторов Г.В., к.т.н., доцент, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Коваленко В.М., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Борисенко О.С., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Борисенко І.В., к.т.н., доцент ІНІТ, м.Київ
- Варшавський Г.В., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Мельник С.В., д.т.н., проф., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Літвиненко С.В., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Борисенко В.М., к.т.н., доцент ІНІТ, м.Київ
- Вікторов Г.В., к.т.н., доцент, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Борисенко А.В., д.т.н., проф., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Мельник А.І., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Посипайко Ю.М., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Семішкін А.В., д.т.н., проф., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Тетерко А.Я., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Вікторов Г.В., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Посипайко Ю.М., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Троїцький В.О., д.т.н., проф., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Борисенко В.М., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Вікторов Г.В., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Посипайко Ю.М., к.т.н., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Троїцький В.О., д.т.н., проф., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ

4. Обрати до складу редколегії:

- Коваленко В.М., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Посипайко Ю.М., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ
- Борисенко В.М., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ

5. Обрати членів УТ НКТД Троїцького В.О., д.т.н., проф., м.Київ, Інститут ІНІТ, м.Київ

6. Дирекція українського товариства українського контролю та технічної діагностики і організація його роботи в 1991 році.

Голова установчої конференції: Троїцький В.О.  
 Секретар установчої конференції: Посипайко Ю.М.

**ПРОТОКОЛ №1**  
 засідання правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики  
 м. Київ 16 листопада 1990 р.

ПРИСУТНІ: В.О.Троїцький – голова Товариства, Е.М.Посипайко, І.П.Вілакур, В.М.Борисенко, О.С.Боровиков, Г.В.Вікторов, Г.М.Кідило, В.М.Коваленко, В.М.Коваленко, О.М.Александров, А.М.Посипайко, В.П.Рамко, А.М.Семішкін, О.М.Семішкін, А.Я.Тетерко, В.Г.Троїцький, А.С.Варшавський, О.І.Довгань.

В присутстві дня внесені наступні питання:

- Вибори заступника голови Товариства.
- Вибори ученого секретаря Товариства.
- Про вступ в Українське республіканське об'єднання Спілки науковців та інженерів об'єднання СРСР. Вибори представника Товариства в республіканське правління Спілки ІНІ СРСР.

Заслухавши та обговоривши питання повністю дня, правління **ВИРІШИЛО:**

- Обрати заступником голови Товариства А.Я.Тетерко, к.т.н., зав.відділом фізико-механічного Інституту ім.Г.В.Карпенка АН УРСР, м.Київ.
- Обрати ученим секретарем Товариства В.М.Посипайко, інженера Інституту електрозварювання ім.С.О.Патона АН УРСР, м.Київ.
- Вступити до складу Української республіканської організації Спілки ІНІ СРСР. Обрати представником Товариства в республіканському правлінні Спілки ІНІ СРСР О.С.Боровикова, к.т.н., старшого наукового співробітника Інституту електрозварювання ім.С.О.Патона АН УРСР, м.Київ.
- Схвалити ініціативу Українського республіканського правління Спілки ІНІ СРСР про створення Спілки ІНІ України. Направити представників Товариства на установчу конференцію Спілки ІНІ України (В.О.Троїцького, О.С.Боровикова, В.М.Посипайко).

Голова Товариства: проф. Троїцький В.О.  
 Учений секретар Товариства: Посипайко Е.М.



Постанова Установчої конференції щодо створення УТ НКТД

Рішення першого засідання Правління УТ НКТД

Оповіднення про створення УТ НКТД

ників, що працюють в галузі дефектоскопії та діагностики, з метою комплексного вирішення проблем підвищення якості та надійності промислових виробів і споруд, розвитку творчої та ділової активності, обміну інформацією, розширення співробітництва та міжнародних контактів, захисту законних соціальних, економічних, творчих та інших спільних інтересів».

Цього ж дня новостворене Правління Товариства обрало заступника Голови (А.Я. Тетерко, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України), вченого секретаря (Ю.М. Посипайко, ІЕЗ ім. Є.О. Патона), представника в Українському республіканському правлінні Спілки ІНІ (О.С. Боровиков, ІЕЗ ім. Є.О. Патона).



На Установчій конференції УТ НКТД (16.11.1990 р.)

Товариство зареєстроване в Міністерстві юстиції України як всеукраїнське громадське об'єднання.

Протягом 1992–93 рр. було зібрано матеріали та сформовано Державну науково-технічну програму «Технічна діагностика і неруйнівний контроль». Програма містила 263 проекти, у виконанні яких мали взяти участь біля 160 організацій і підприємств. Вона була схвалена Президією Національної Академії наук України та Державним комітетом з питань науки і технологій. На жаль, у той час уряд не міг фінансувати таку масштабну програму. Але на її основі було створено ряд галузевих програм, а в переліку головних напрямків розвитку науки і техніки в Україні, за яким проводилося щорічне конкурсне фінансування, з'явилась тема «Діагностичне забезпечення надійної і ефективної експлуатації енерго- і ресурсоемних машин», а з 1995 р., крім того, тема «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». У 2000 р. була сформована нова Національна програма розвитку неруйнівного контролю та технічної діагностики в Україні «Технічний контроль – 2000».

За ініціативи фахівців ІЕЗ ім. Є.О. Патона виконані організаційні роботи зі створення Технічного комітету стандартизації «Технічна діагностика і неруйнівний контроль» ТК-78. Комітет створено спільним наказом Національної академії наук, Державного комітету по стандартизації, метрології і сертифікації та Державного комітету по нагляду за охороною праці (№ 60/106/48 від 31 травня 1993 р.). Головною метою діяльності ТК-78 є організація робіт з гармонізації національної науково-технічної документації в галузі технічної діагностики та неруйнівного контролю й відповідності її міжнародним стандартам, матеріалам і нормам європейських країн. За сприяння ТК-78 в Україні вже прийнято і введено в дію більше 200 національних стандартів з НК і ТД, тотожних відповідним європейським і міжнародним. ТК-78 співпрацює з аналогічним комітетом Всесвітньої організації із стандартизації ISO/TC 135 «Non-Destructive Testing», бере активну участь в обговоренні проєктів міжнародних стандартів з усіх методів неруйнівного контролю та голосує з питань їх прийняття.

Надзвичайно важливе значення для України має організація системи сертифікації персоналу, зайнятого в неруйнівному контролі за процедурами, гармонізованими з європейськими та міжнародними стандартами. Цьому питанню УТ НКТД приділяє першочергову увагу. У 1994 р. за спільним наказом № 172/64/106/221 від 7 липня

1994 р. Міністерства освіти України, Національної академії наук України, Державного комітету України по нагляду за охороною праці і Державного комітету України по нагляду в атомній промисловості в структурі УТ НКТД був створений Національний атестаційний комітет України з неруйнівного контролю. Головним завданням комітету була організація системи сертифікації персоналу, яка відповідала б міжнародним стандартам. Зусиллями активістів УТ НКТД В.О. Троїцького, О.М. Карпаша, І.П. Білокура, Ю.К. Бондаренка, Ю.Б. Єськова О.В. Мозгового, М.Г. Білого, І.Я. Шевченка та ін. були розроблені перші галузеві нормативні документи з сертифікації персоналу в нафтогазовій промисловості, авіації, для промислових об'єктів підвищеної небезпеки. У 2000 р. Правлінням товариства було розроблено стандарт СТТУ УТ НКТД 01-2000 «Система сертифікації персоналу з неруйнівного контролю. Основні положення», що відповідав положенням європейського стандарту EN 473. За ініціативи УТ НКТД і ТК-78 Держстандарт України ввів у дію як національні, гармонізовані європейські стандарти ДСТУ EN 473:2008, а згодом – ДСТУ EN ISO 9712:2014 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю» і в 2022 р. – нову редакцію цього стандарту.

У 2002 р. рішенням Правління при Товаристві було створено Центр сертифікації персоналу з НК. ЦС при УТ НКТД здійснює сертифікацію спеціалістів, що працюють в галузі неруйнівного контролю на 1, 2 і 3 рівні кваліфікації у відповідності до вимог EN ISO 9712, американської процедури SNT-TC-1A, а також галузевого НПАОП 0.00-1.63-13. ЦС при УТ НКТД акредитовано Національним агентством з акредитації України як позавідомчий незалежний орган із сертифікації персоналу в галузі неруйнівного контролю на відповідність вимогам Міжнародного стандарту ISO/IEC 17024:2012 «Оцінка відповідності – Загальні вимоги до органів, що здійснюють сертифікацію персоналу». Схема і процедури сертифікації визначені у відповідності до вимог EN ISO 9712:2012.

Сертифікати, що видані Центром сертифікації при УТ НКТД, визнаються як в Україні, так і за її межами. За минулі роки у визначених ЦС при УТ НКТД учбових і екзаменаційних центрах отримали професійні знання та були атестовані багато спеціалістів з Грузії, Вірменії, Казахстану, Узбекистану, Молдови, Таджикистану, Естонії, Польщі, Болгарії, Словенії.

Товариство проводить професійні конкурси серед спеціалістів і організацій, що працюють у галузі



Член Правління УТ НКТД О.М. Козін підписує документ про створення Європейської федерації з НК (Копенгаген, 1998 р.)



Візит Президента Міжнародного комітету з НК (ICNDT) Giuseppe Nardoni до Києва (2001 р.)



А.Л. Шекеро, В.О. Троїцький, О.М. Козін на засіданні ISO/TC 135 «Non-Destructive Testing» під час 15-ї Всесвітньої конференції з НК у Римі (2000 р.)



В.О. Троїцький, О.М. Карпаш, Е.С. Крилов, В.А. Куліш, Я.М. Зінчак. Стенд УТ НКТД на 8-й Європейській конференції з НК у Барселоні (2002 р.)



І.Я. Шевченко і В.О. Троїцький біля стенду УТ НКТД на 16-й Всесвітній конференції з НК у Монреалі (2004 р.)



З Президентом ICNDT Douglas Marshall. Стенд УТ НКТД на 9-й Європейській конференції з НК в Берліні (2006 р.)

НКТД, з метою визначення кращих вчених, спеціалістів, трудових колективів, лабораторій, фірм, підприємств та організацій, для популяризації їх досягнень.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона продовжує видаватись журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» (4 номери на рік), якому Правління УТ НКТД приділяє багато уваги, готуючи до пу-

блікації статті, повідомлення, інформацію, рекламу та ін. З 2023 р. у журналі запроваджено спеціальний розділ «Новини УТ НКТД». Користуючись нагодою, запрошуємо всіх спеціалістів України з неруйнівного контролю стати авторами та читачами цього досить необхідного фахового журналу.



Голова УТ НКТД проф. В.О. Троїцький на 17-й Всесвітній конференції з НК у Шанхаї (2008 р.)



З Президентом ICNDT Mike Farley біля стенду УТ НКТД на 18-й Всесвітній конференції з НК у Дурбані (2012 р.)



Члени делегації УТ НКТД В.Г. Радько, В.М. Учанин, А.Л. Шекеро з зарубіжними колегами на 11-й Європейській конференції з НК у Празі (2014 р.)



Л.П. Павлій, І.В. Павлій, Н.П. Троїцька, В.О. Троїцький, Т.М. Луценко біля стенду УТ НКТД на 19-й Всесвітній конференції з НК у Мюнхені (2016 р.)

З 1998 до 2022 рр. УТ НКТД самостійно видавав інформаційний бюлетень «НК-Інформ» (4 номери на рік).

Одним з головних напрямків роботи УТ НКТД є організація та проведення конференцій, семінарів і виставок, головною з яких є Національна конференція «Неруйнівний контроль та технічна діагностика».

Значну увагу правління УТ НКТД приділяє контактам та співробітництву з аналогічними товариствами з інших країн. у 1995 р. УТ НКТД прийнято до складу Європейського комітету з неруйнівного контролю. У 1998 р. УТ НКТД стало співзасновником і членом Європейської федерації з неруйнівного контролю (EFNDT), до якої входять національні товариства й асоціації з НК 27 країн Європи. Також УТ НКТД є членом Міжнародного комітету з неруйнівного контролю (ICNDT) і Міжнародного товариства з моніторингу технічного стану (ISCM). Було укладено ряд угод про спів-

робітництво з товариствами Польщі, Болгарії, Чехії, Німеччини, Італії, Данії, США, та ін. Делегації УТ НКТД брали участь у європейських та всесвітніх конференціях і виставках з неруйнівного контролю: у Копенгагені (1998 р.), Римі (2000 р.), Барселоні (2002 р.), Монреалі (2004 р.), Берліні (2006 р.), Шанхаї (2008 р.), Дурбані (2012 р.), Празі (2014 р.), Мюнхені (2016 р.), Гетеборзі (2018).

*У секретаріаті УТ НКТД, що працює в ІЕЗ ім. Є.О. Патона (тел.: 044-205-22-15, 205-22-49, e-mail: usndt@ukr.net), а також на сайті Товариства [www.usndt.com.ua](http://www.usndt.com.ua) можна ознайомитись з новинами в галузі НКТД, періодичними виданнями, книгами, одержати консультації з питань неруйнівного контролю та технічної діагностики, обговорити проблеми практичного технічного контролю та шляхи їх вирішення.*

Технічний комітет стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» нагадує спеціалістам з НК, що на сьогодні в Україні діють більше 200 національних стандартів з неруйнівного контролю. Майже всі з них гармонізовані з відповідними європейськими та міжнародними. Деякі стандарти було прийнято методом перекладу, тоді як більша частина – методом підтвердження, тобто без перекладу українською.

Нижче публікуємо структурований за методами актуальний перелік національних стандартів з неруйнівного контролю, що стосуються основних принципів методів контролю, загальних вимог до проведення контролю, термінології, засобів контролю. У наступному номері журналу цей список буде доповнено стандартами з неруйнівного контролю певних видів продукції: зварних з'єднань, поковок, прокату, литва.

| Позначення   | Назва   | Позначення НД, який замінено (скасовано)             | Мова |
|--|---|--|------|
| <b>Візуальний контроль (VT)</b>  |   |  |      |
| ДСТУ EN 13018:2017<br>(EN 13018:2016, IDT)                                 | Неруйнівний контроль. Візуальний контроль. Загальні принципи  | ДСТУ EN 13018:2005                                   | en   |
| ДСТУ EN 1330-10:2016<br>(EN 1330-10:2003, IDT)                             | Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 10. Терміни, які використовують у візуальному контролі            | –  | en   |
| ДСТУ EN 13927:2005   | Неруйнівний контроль. Контроль візуальний. Устаткування   | –  | ua   |
| <b>Капілярний контроль (PT)</b>  |   |  |      |
| ДСТУ CEN/TR 16638:2022<br>(CEN/TR 16638:2014, IDT)                         | Неруйнівний контроль. Тестування проникальними речовинами та магнітними порошками за допомогою синього світла | –  | en   |
| ДСТУ CEN/TR 17108:2022<br>(CEN/TR 17108:2017, IDT)                         | Неруйнівний контроль. Освітлення під час проникаючої та магнітопорошкової дефектоскопії. Належна практика     | –  | en   |
| ДСТУ CEN/TS 17100:2022<br>(CEN/TS 17100:2017, IDT)                         | Неруйнівний контроль. Пенетрантний контроль. Еталонні фотографії та розмір індикацій                          | –  | en   |
| ДСТУ EN ISO 12706:2016<br>(EN ISO 12706:2009, IDT, ISO 12706:2009, IDT)    | Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Словник термінів   | ДСТУ EN ISO 12706:2008                               | en   |
| ДСТУ EN ISO 3059:2016<br>(EN ISO 3059:2012, IDT, ISO 3059:2012, IDT)       | Неруйнівний контроль. Капілярний та магнітопорошковий контроль. Умови огляду                                  | ДСТУ EN ISO 3059:2007                                | en   |
| ДСТУ EN ISO 3452-1:2022<br>(EN ISO 3452-1:2021, IDT; ISO 3452-1:2021, IDT) | Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи                                       | ДСТУ EN ISO 3452-1:2014<br>(EN ISO 3452-1:2013, IDT) | en   |
| ДСТУ EN ISO 3452-2:2022<br>(EN ISO 3452-2:2021, IDT; ISO 3452-2:2021, IDT) | Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 2. Випробування пенетрантів                                | ДСТУ EN ISO 3452-2:2014<br>(EN ISO 3452-2:2013, IDT) | en   |
| ДСТУ EN ISO 3452-3:2014  | Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 3. Контрольні випробувальні зразки                         | ДСТУ EN ISO 3452-3:2005                              | en   |
| ДСТУ EN ISO 3452-4:2008  | Неруйнівний контроль. Контроль капілярний. Частина 4. Устаткування  | –  | ua   |
| ДСТУ EN ISO 3452-5:2014  | Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 5. Капілярний контроль при температурах понад 50°C         | –  | en   |
| ДСТУ EN ISO 3452-6:2014  | Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 6. Капілярний контроль при температурах нижче 10°C         | –  | en   |
| <b>Магнітний контроль (MT)</b>   |   |  |      |
| ДСТУ CEN/TR 16638:2022<br>(CEN/TR 16638:2014, IDT)                         | Неруйнівний контроль. Тестування проникальними речовинами та магнітними порошками за допомогою синього світла | –  | en   |
| ДСТУ CEN/TR 17108:2022<br>(CEN/TR 17108:2017, IDT)                         | Неруйнівний контроль. Освітлення під час проникаючої та магнітопорошкової дефектоскопії. Належна практика     | –  | en   |
| ДСТУ EN ISO 12707:2017<br>(EN ISO 12707:2016, IDT; ISO 12707:2016, IDT)    | Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Словник термінів  | ДСТУ EN 1330-7:2009                                  | ua   |

|   |  |  |    |
|---|--|--|----|
| ДСТУ EN ISO 3059:2016<br>(EN ISO 3059:2012, IDT, ISO 3059:2012, IDT)          | Неруйнівний контроль. Капілярний та магнітопорошковий контроль. Умови огляду   | ДСТУ EN ISO 3059:2007  | en |
| ДСТУ EN ISO 9934-1:2018<br>(EN ISO 9934-1:2016, IDT; ISO 9934-1:2016, IDT)    | Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги   | ДСТУ EN ISO 9934-1:2015<br>(EN ISO 9934-1:2015, IDT; ISO 9934-1:2015, IDT) | en |
| ДСТУ EN ISO 9934-2:2015<br>(EN ISO 9934-2:2015, IDT; ISO 9934-2:2015, IDT)    | Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 2. Засоби контролю   | ДСТУ EN ISO 9934-2:2005  | en |
| ДСТУ EN ISO 9934-3:2015<br>(EN ISO 9934-3:2015, IDT; ISO 9934-3:2015, IDT)    | Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 3. Обладнання  | ДСТУ EN ISO 9934-3:2005  | en |
| <b>Ультразвуковий контроль (UT)</b>   |  |  |    |
| ДСТУ EN ISO 16809:2022<br>(EN ISO 16809:2019, IDT; ISO 16809:2017, IDT)       | Неруйнівний контроль. Ультразвукове вимірювання товщини  | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 16810:2016<br>(EN ISO 16810:2014, IDT, ISO 16810:2012, IDT)       | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Загальні вимоги   | ДСТУ EN 583-1-2001   | en |
| ДСТУ EN ISO 16811:2015<br>(EN ISO 16811:2014, IDT; ISO 16811:2012, IDT)       | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Налаштування чутливості та діапазону розгортки  | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 16823:2016<br>(EN ISO 16823:2014, IDT, ISO 16823:2012, IDT)       | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Метод проходження   | ДСТУ EN 583-3:2005   | en |
| ДСТУ EN ISO 16826:2015<br>(EN ISO 16826:2014, IDT; ISO 16826:2012, IDT)       | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Виявлення несущільностей перпендикулярних до поверхні   | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 16827:2015<br>(EN ISO 16827:2014, IDT; ISO 16827:2012, IDT)       | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик і розмірів несущільностей  | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 16828:2015<br>(EN ISO 16828:2014, IDT; ISO 16828:2012, IDT)       | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Дифракційно-часовий метод для виявлення та визначення розмірів несущільностей                                     | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 22232-1:2022<br>(EN ISO 22232-1:2020, IDT; ISO 22232-1:2020, IDT) | Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 1. Прилади   | ДСТУ EN 12668-1:2015<br>(EN 12668-1:2010, IDT)                             | en |
| ДСТУ EN ISO 22232-2:2022<br>(EN ISO 22232-2:2020, IDT; ISO 22232-2:2020, IDT) | Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 2. Перетворювачі   | ДСТУ EN 12668-2:2015<br>(EN 12668-2:2010, IDT)                             | en |
| ДСТУ EN ISO 22232-3:2022<br>(EN ISO 22232-3:2020, IDT; ISO 22232-3:2020, IDT) | Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 3. Комбіноване обладнання                                    | ДСТУ EN 12668-3:2015<br>(EN 12668-3:2013, IDT)                             | en |
| ДСТУ EN ISO 23243:2022<br>(EN ISO 23243:2020, IDT; ISO 23243:2020, IDT)       | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль із застосуванням решіток. Словник термінів   | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 2400:2016<br>(EN ISO 2400:2012, IDT, ISO 2400:2012, IDT)          | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Технічні умови на калібрувальний зразок № 1   | ДСТУ 4001-2000 (ISO 2400:1972)   | en |
| ДСТУ EN ISO 5577:2018<br>(EN ISO 5577:2017, IDT; ISO 5577:2017, IDT)          | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Словник термінів  | ДСТУ EN 1330-4:2016 (EN 1330-4:2010, IDT)                                  | en |
| ДСТУ EN ISO 7963:2016<br>(EN ISO 7963:2010, IDT, ISO 7963:2006, IDT)          | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Технічні умови на калібрувальний зразок № 2   | ДСТУ 4002-2000 (ISO 7963:1985)   | en |
| ДСТУ ISO 16831:2017<br>(ISO 16831:2012, IDT)                                  | Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик і верифікація ультразвукового обладнання для вимірювання товщини                         | –  | en |
| <b>Радіаційний контроль (RT)</b>  |  |  |    |
| ДСТУ EN 13068-1:2007  | Неруйнівний контроль. Радіоскопічний контроль. Частина 1. Кількісне вимірювання властивостей зображення  | –  | ua |
| ДСТУ EN 13068-2:2008  | Неруйнівний контроль. Контроль радіоскопічний. Частина 2. Контролювання довгострокової стабільності пристроїв і формування зображення                            | –  | ua |
| ДСТУ EN 13068-3:2016<br>(EN 13068-3:2001, IDT)                                | Неруйнівний контроль. Радіоскопічний контроль. Частина 3. Загальні принципи радіоскопічного контролю металевих матеріалів рентгенівським і гамма-випромінюванням | –  | en |

|   |   |  |    |
|---|---|--|----|
| ДСТУ EN 1330-3:2008   | Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 3. Терміни стосовно промислового радіаційного контролю  | –  | ua |
| ДСТУ EN 14784-1:2008  | Неруйнівний контроль. Радіографія промислова комп'ютерна із зображенням на фосфорних пластинах. Частина 1. Класифікація систем  | –  | ua |
| ДСТУ EN ISO 11699-1:2016 (EN ISO 11699-1:2011, IDT, ISO 11699-1:2008, IDT)                            | Неруйнівний контроль. Рентгенівські плівки для промислової радіографії. Частина 1. Класифікація плівкових систем для промислової радіографії  | ДСТУ EN 584-1-2001   | en |
| ДСТУ EN ISO 11699-2:2019 (EN ISO 11699-2:2018, IDT; ISO 11699-2:2018, IDT)                            | Неруйнівний контроль. Рентгенографічні плівки технічної призначеності. Частина 2. Контролювання оброблення плівки у відповідності до еталонних значень  | ДСТУ EN ISO 11699-2:2016 (EN ISO 11699-2:2011, IDT, ISO 11699-2:1998, IDT) | en |
| ДСТУ EN ISO 15708-1:2019 (EN ISO 15708-1:2019, IDT; ISO 15708-1:2017, IDT)                            | Неруйнівний контроль. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 1. Термінологія  | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 15708-2:2019 (EN ISO 15708-2:2019, IDT; ISO 15708-2:2017, IDT)                            | Неруйнівний контроль. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 2. Принципи, обладнання та зразки  | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 15708-3:2019 (EN ISO 15708-3:2019, IDT; ISO 15708-3:2017, IDT)                            | Неруйнівний контроль. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 3. Порядок роботи та інтерпретація результатів   | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 15708-4:2019 (EN ISO 15708-4:2019, IDT; ISO 15708-4:2017, IDT)                            | Неруйнівний контроль. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 4. Кваліфікація роботи системи   | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 16371-2:2019 (EN ISO 16371-2:2017, IDT; ISO 16371-2:2017, Corrected version 2018–05, IDT) | Неруйнівний контроль. Промислова комп'ютерна радіографія із застосуванням запам'ятовуючих фосфорних радіографічних пластин. Частина 2. Загальні принципи контролювання металевих матеріалів з використанням рентгенівського та гамма випромінювання | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 19232-1:2016 (EN ISO 19232-1:2013, IDT, ISO 19232-1:2013, IDT)                            | Неруйнівний контроль. Якість зображення радіографічних знімків. Частина 1. Визначення показника якості зображення за допомогою індикатора якості зображення дротового типу  | ДСТУ EN 462-1-2001   | en |
| ДСТУ EN ISO 19232-2:2016 (EN ISO 19232-2:2013, IDT, ISO 19232-2:2013, IDT)                            | Неруйнівний контроль. Якість зображення радіографічних знімків. Частина 2. Визначення показника якості зображення за допомогою індикатора якості зображення типу ступінь—отвір  | ДСТУ EN 462-2-2001   | en |
| ДСТУ EN ISO 19232-3:2015 (EN ISO 19232-3:2013, IDT; ISO 19232-3:2013, IDT)                            | Контроль неруйнівний. Якість зображення на рентгенівських знімках. Частина 3. Класи якості зображення   | –  | en |
| ДСТУ EN ISO 19232-4:2016 (EN ISO 19232-4:2013, IDT, ISO 19232-4:2013, IDT)                            | Контроль неруйнівний. Якість зображення на рентгенівських знімках. Частина 4. Експериментальне оцінювання значень і таблиць якості зображення   | ДСТУ EN 462-4-2001   | en |
| ДСТУ EN ISO 19232-5:2019 (EN ISO 19232-5:2018, IDT; ISO 19232-5:2018, IDT)                            | Неруйнівний контроль. Якість зображення на рентгенівських знімках. Частина 5. Визначення нерізкості зображення з використанням індикаторів дуплексного типу   | ДСТУ EN ISO 19232-5:2016 (EN ISO 19232-5:2013, IDT, ISO 19232-5:2013, IDT) | en |
| ДСТУ EN ISO 5579:2014   | Неруйнівний контроль. Радіографічний контроль металевих матеріалів із застосуванням плівки та рентген- і гамма-випромінювання. Основні правила  | ДСТУ EN 444:2005   | en |
| ДСТУ ISO 5576:2016 (ISO 5576:1997, IDT)   | Контроль неруйнівний. Промислова радіологія з використанням рентгенівського і гамма-випромінювання. Словник термінів  | –  | en |
| <b>Вихрострумний контроль (ЕТ)</b>  |   |  |    |
| ДСТУ EN 12084:2005  | Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумний. Загальні вимоги і рекомендації  | –  | ua |
| ДСТУ EN ISO 12718:2022 (EN ISO 12718:2019, IDT; ISO 12718:2019, IDT)                                  | Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумний. Словник термінів  | ДСТУ EN ISO 12718:2016 (EN ISO 12718:2008, IDT, ISO 12718:2008, IDT)       | en |
| ДСТУ EN ISO 15549:2022 (EN ISO 15549:2019, IDT; ISO 15549:2019, IDT)                                  | Неруйнівний контроль. Вихрострумний контроль. Загальні вимоги   | ДСТУ ISO 15549:2015 (ISO 15549:2008, IDT)                                  | en |
| ДСТУ ISO 20669:2018 (ISO 20669:2017, IDT)   | Неруйнівний контроль. Імпульсний вихрострумний контроль деталей з феромагнітних металів   | –  | en |
| <b>Контроль герметичності (ЛТ)</b>  |   |  |    |
| ДСТУ EN 13184:2015 (EN 13184:2001, IDT)   | Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Манометричний метод   | –  | en |
| ДСТУ EN 13625:2015 (EN 13625:2001, IDT)   | Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Настава щодо вибору контрольно-вимірювального обладнання для вимірювання витоку газу  | –  | en |

|  |   |   |    |
|--|---|---|----|
| ДСТУ EN 1518:2015<br>(EN 1518:1998, IDT)                                   | Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Характеристика маспектрометричних детекторів  | –   | en |
| ДСТУ EN 1593:2015<br>(EN 1593:1999, IDT)                                   | Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Пухирковий метод  | –   | en |
| ДСТУ EN 1779:2015<br>(EN 1779:1999, IDT)                                   | Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Критерії вибору методу і способу контролю   | –   | en |
| ДСТУ EN ISO 20485:2019<br>(EN ISO 20485:2018, IDT;<br>ISO 20485:2017, IDT) | Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Метод індикаторного газу  | ДСТУ EN 13185:2015 (EN 13185:2001, IDT)   | en |
| ДСТУ EN ISO 20486:2019<br>(EN ISO 20486:2018, IDT;<br>ISO 20486:2017, IDT) | Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Калібрування контрольних витоків газів  | ДСТУ EN 13192:2015 (EN 13192:2001, IDT)   | en |
| ДСТУ EN ISO 20484:2018<br>(EN ISO 20484:2017, IDT;<br>ISO 20484:2017, IDT) | Неруйнівний контроль. Контроль герметичності. Словник термінів  | –   | en |
| <b>Акустико-емісійний контроль (АТ)</b>                                    |   |   |    |
| ДСТУ EN 1330-9:2022<br>(EN 1330-9:2017, IDT)                               | Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 9. Терміни в акустико-емісійному контролі   | ДСТУ EN 1330-9:2016 (EN 1330-9:2009, IDT) | en |
| ДСТУ EN 13554:2016<br>(EN 13554:2011, IDT)                                 | Неруйнівний контроль. Акустико-емісійний контроль. Загальні вимоги  | –   | en |
| ДСТУ EN 14584:2022<br>(EN 14584:2013, IDT)                                 | Неруйнівний контроль. Випробування на акустичну емісію. Перевірка металевого обладнання, що працює під тиском під час перевірки. Планерне розташування джерел АЕ                          | –   | en |
| ДСТУ EN 15495:2016<br>(EN 15495:2007, IDT)                                 | Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Контролювання металевого устаткування, яке працює під тиском, під час контрольних випробувань. Визначення місцеположення джерел акустичної емісії | –   | en |
| ДСТУ EN 15856:2022<br>(EN 15856:2010, IDT)                                 | Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Загальні принципи АЕ тестування для виявлення корозії в металевому оточенні, заповненому рідиною  | –   | en |
| ДСТУ EN ISO 18081:2019<br>(EN ISO 18081:2016, IDT;<br>ISO 18081:2016, IDT) | Неруйнівний контроль. Акустико-емісійний контроль (АТ). Виявлення витоків за допомогою акустичної емісії  | –   | en |
| <b>Термографічний контроль (ТТ)</b>  |   |   |    |
| ДСТУ EN 16714-1:2018<br>(EN 16714-1:2016, IDT)                             | Неруйнівний контроль. Частина 1. Термографічний контроль. Загальні принципи   | –   | en |
| ДСТУ EN 16714-2:2018<br>(EN 16714-2:2016, IDT)                             | Неруйнівний контроль. Частина 2. Термографічний контроль. Обладнання  | –   | en |
| ДСТУ EN 16714-3:2018<br>(EN 16714-3:2016, IDT)                             | Неруйнівний контроль. Частина 3. Термографічний контроль. Терміни та визначення понять  | –   | en |
| ДСТУ EN 17119:2019<br>(EN 17119:2018, IDT)                                 | Неруйнівний контроль. Термографічний контроль. Активна термографія  | –   | en |
| ДСТУ EN 17501:2022<br>(EN 17501:2022, IDT)                                 | Неруйнівний контроль. Термографічний контроль. Активна термографія з лазерним збудженням  | –   | en |
| ДСТУ ISO 10878:2016<br>(ISO 10878:2013, IDT)                               | Неруйнівний контроль. Інфрачервона термографія. Словник термінів  | –   | en |
| ДСТУ ISO 10880:2018<br>(ISO 10880:2017, IDT)                               | Неруйнівний контроль. Інфрачервоний термографічний контроль. Загальні принципи  | –   | en |

Як можна побачити з наведеного переліку, останні прийняті стандарти з НК датовано 2022 р. Це пов'язано з відсутністю фінансування таких робіт. З початком війни державні кошти у першу чергу виділяються на розробку та гармонізацію стандартів для критичних сфер економіки: енергетика, продовольство, безпека, здоров'я тощо. Навіть на етапі включення стандартів до Програми робіт з національної стандартизації ТК-78 стикається з проблемою відсутності організацій-замовників, які можуть взяти на себе фінансування таких робіт.

Тому, якщо організація або підприємство зацікавлені в прийнятті певного європейського або міжнародного стандарту (нової редакції стандарту) з неруйнівного контролю, потрібно направити на e-mail: [usndt@ukr.net](mailto:usndt@ukr.net) гарантійний лист-заявку довільної форми, в якому вказати шифр і назву відповідного європейського (міжнародного стандарту), а також джерело фінансування.

*А.Л. Шекеро, ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України*

## Про засідання Генеральної Асамблеї EFNDT

23 вересня у м. Верона (Італія) відбулося засідання Генеральної Асамблеї Європейської федерації з неруйнівного контролю, яка є головним розпорядчим органом EFNDT. За дорученням Голови Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики професора В.О. Троїцького у засіданні в дистанційному форматі взяв участь заступник голови УТ НКТД М.Л. Казакевич.

У ході наради було заслухано інформацію про діяльність Федерації. Відкрив зустріч і привітав учасників Президент EFNDT Fermin Gomez, Іспанія. Після представлення делегатів від національних товариств (15 осіб) було затверджено порядок денний Асамблеї. Обговорено результати роботи за рік та організація міжнародної діяльності Європейської федерації з НК. Доведено результати фінансового звіту, які було затверджено одногосно.

З інформацією про результати засідання Ради директорів EFNDT виступив Віце-президент Федерації Ezio Tuberosa, Італія. Потім було заслухано звіти комітетів та робочих груп EFNDT, у т.ч. Виконавчого комітету з сертифікації (СЕС), а також представників Національного товариства неруйнівного контролю Греції та представника компанії «TECH INSPECT» (м. Тірана, Албанія) – провідного албанського постачальника інспекційних послуг, що спеціалізується на розробці та застосуванні засобів технічної інспекції й неруйнівного контролю промислового обладнання.

Заступник голови УТ НКТД поінформував про роботи Українського товариства з НК у галузі сер-

тифікації персоналу, що виконуються згідно з Європейським стандартом EN ISO 9712, підготовку до чергової акредитації в Національному агентстві акредитації України, а також про досягнення щодо впровадження нешкідливих технологій та матеріалів для виконання неруйнівного контролю.

До уваги учасників Генеральної асамблеї Ezio Tuberosa представив інформацію про підготовку Європейської конференції з НК, яка відбудеться у м. Верона (Італія) 15 – 19 червня 2026 р. за наступними напрямками впровадження неруйнівного контролю, зокрема:

- промислові технології та процеси
- енергетика та довкілля
- транспорт
- цивільна та культурна спадщина
- агропродовольча галузь
- втрати води
- дрони
- біомедичні технології.

Наступне засідання Генеральної асамблеї заплановано провести під час Європейської конференції EFNDT-2026 у м. Верона.

На завершення Президент EFNDT подякував усім учасникам засідання, у тому числі, окремо відзначив внесок України у розвиток напрямку НК.

*Михайло Казакевич, к.хім.н., с.н.с.,  
заступник Голови УТ НКТД,  
доцент Інституту аерокосмічних технологій НТУУ  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського»,  
науковий консультант ТОВ «НДТ Україна»*

November 2026

**NDT**online

Free • Online • On-demand

Organized by



**International Online Conference on  
Nondestructive Testing 2026**

**Новини одним рядком**

✓ 26 листопада 2025 р. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона відбулася нарада за участі членів бюро Правління УТ НКТД В.О. Троїцького, М.Л. Казакевича, Ю.М. Посипайка, А.Л. Шекеро, члена Правління І.Я. Шевченка та працівників Секретаріату УТ НКТД, на якій було заслухано коротку доповідь Голови Товариства про роботи для потреб воєнного часу. Розглянуто поточні питання роботи Секретаріату Товариства, зокрема, організації стенду УТ НКТД на 14-й Європейській конференції з НК у Вероні і укладання угоди про співробітництво з Італійським товариством з НК, відновлення робіт з організації в Україні відділення Американського товариства з НК, наповнення інформаційними матеріалами відповідного розділу журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», інтернет-сайту Товариства та ін.

✓ У випуску за листопад американського журналу «Materials Evaluation» опубліковано статтю М.Л. Казакевича, В.М. Казакевича і О.В. Денищенка «Інновації у безпечному капілярному контролі». У статті автори розглядають розробку нешкідливих пенетрантів, призначених для підтримки надійної експлуатації аерокосмічних та енергетичних об'єктів. Виконані дослідження спрямовані на розширення можливостей виявлення несучільностей за рахунок поєднання капілярного контролю з терагерцовим випромінюванням і використання магнітної рідини для підвищення загальної чутливості.

✓ Від Національного органу інтелектуальної власності (УкрНОІВІ) Головою УТ НКТД проф. В.О. Троїцьким отримано патент України на корисну модель «Безпілотний авіаційний комплекс»









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

**пропонує такі послуги:**

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

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





## КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ ТА ВИСТАВОК

|                      |                         |   |  |
|----------------------|-------------------------|---|--|
| 10–13 лютого 2026    | Лінц, Австрія           | 15 <sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2026 (15-а Конференція з промислової комп'ютерної томографії)         | University of Applied Sciences Upper Austria |
| 26–27 лютого 2026    | Мюнстер, Німеччина      | Fachtagung Bauwerksdiagnose (Конференція з діагностики будівель)  | German Society for NDT                       |
| 17–19 лютого 2026    | Ерфурт, Німеччина       | Technical conference on NDT in the railway industry (Технічна конференція з НК на залізниці)  | German Society for NDT                       |
| 11–14 травня 2026    | Гаваї, США              | 17 <sup>th</sup> Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (17-а Азіатсько-Тихоокеанська конференція з НК)        | American Society for NDT                     |
| 19–21 травня 2026    | Ліон, Франція           | COFREND Days 2026 (Щорічна конференція Французького товариства з НК)  | France Society of NDT                        |
| 15–19 червня 2026    | Верона, Італія          | 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                      |
| 07–10 липня 2026     | Тулуза, Франція         | 12 <sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring (12-й Європейський семінар з моніторингу технічного стану конструкцій) | France Society of NDT                        |
| 12–15 жовтня 2026    | Коламбус, США           | ASNT 2026 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)  | American Society for NDT                     |
| 02–22 листопада 2026 | in Online, Germany      | International Online Conference on Nondestructive Testing 2026 (NDTonline 2026)   | NDT.net                                      |
| 15–19 травня 2028    | Буенос-Айрес, Аргентина | 21 <sup>st</sup> World Conference on Non-Destructive Testing 2028 (21-а Всесвітня конференція з НК)                                       | Argentine Society for NDT                    |



а)



б)



в)

### КОМБІНОВАНИЙ РАДІАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ СОТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ЕЛЕМЕНТІВ ТОЧКОВИХ ЗВАРНИХ ШВІВ



**Виконується з використанням портативної повноформатної цифрової рентген-телевізійної камери РТВ-03 і твердотільного рентгеновського міні-перетворювача**

Технічні характеристики системи РТВ-3:

- розмір робочого поля: 120x160 мм
- дискретні розміри цифрового рентгеновського зображення: 1100x1440 точок
- максимальна напруга рентгеновського випромінювання: 200 кВ

**ІЕЗ ім. Є.О. Патона, відділ №4**  
e-mail: [ndt@paton.kiev.ua](mailto:ndt@paton.kiev.ua)  
т. (044) 205-22-15





а)



б)



в)

а) зразок з подвійним точковим зварними швами  
б) рентген-телевізійне зображення локальної ділянки зразка  
в) збільшене зображення отримане з використанням мініатюрного R-перетворювача

а) фрагмент крила літака  
б) рентген-телевізійне зображення локальної ділянки з дефектом  
в) збільшене зображення ділянки з дефектом отримане з використанням мініатюрного R-перетворювача