

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**Л.М. ЛОБАНОВ** (головний редактор),

**В.О. Троїцький** (заст. гол. ред.)

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

**В.М. Учанін** (заст. гол. ред.)

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

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

**Ю.М. Посипайко,**

**І.Ю. Романова** (відповід. секретар)

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

**К. Драган**

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

**Я. Грум**

Люблянський університет, Словенія;

**М.Л. Казакевич**

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

**О.М. Карпаш, П.М. Райтер**

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

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

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

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

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

**А. Савін**

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

**В.О. Стороженко**

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

**Г.М. Сучков**

НУ «ХПІ», м. Харків;

**М.Г. Чаусов**

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко, Міжнародна

Асоціація «Зварювання», м. Київ

**Засновники**

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

**Адреса редакції**

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

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

МОН України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

**Передплата 2023**

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія/електронна версія: 1120 грн.

за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів

видавець журналу відповідальності не несе.

## ЗМІСТ

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

- УЧАНІН В.М.** Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання як ефективний засіб вирішення проблем неруйнівного контролю ..... 3
- ЮЗЕФОВИЧ Р.М., ЯВОРСЬКИЙ І.М., ЛИЧАК О.В., ТРОХИМ Г.Р., ВАРИВОДА М.З., СЕМЕНОВ П.О.** Діагностика пошкоджень зубчастих пар методами біперіодично корельованих випадкових процесів. Частина 2. Дослідження вібраційних сигналів редуктора вітрогенератора ..... 13
- МІЛЕНІН О.С., ВЕЛИКОІВАНЕНКО О.А., РОЗИНКА Г.П., ПІВТОРАК Н.І.** Чисельна оцінка крихкої міцності монтажних зварних швів магістральних газопроводів при транспортуванні газоводневих сумішей..... 22
- ЛОБАНОВ Л.М., НЕДОСЄКА А.Я., НЕДОСЄКА С.А., ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А., НАЗАРЧУК З.Т., СКАЛЬСЬКИЙ В.Р.** Новий стандарт показників технічної діагностики та його застосування при АЕ моніторингу ..... 28
- NENAD GUCUNSKI, HUNG MANH LA, KIEN DINH, MUSTAFA KHUDHAIR** Вдосконалення оцінки стану залізобетонних елементів мостів шляхом автоматизації, візуалізації та покращення інтерпретації даних за допомогою комплексної технології обстеження неруйнівними методами .... 34

### ІНФОРМАЦІЯ

- М. PIESING** Смертельна небезпека, яку ви не бачите ..... 45
- Історія журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» .... 49
- Програми професійної підготовки на 2023 р. .... 51
- Досягнення адитивних технологій для відбудови української промисловості, науки та інжинірингу ..... 54
- Новини Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики ..... 55

Видання журналу підтримують:

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

**EDITORIAL BOARD**

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

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

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

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

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

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

**I.Yu. Romanova** (execut. secretary)

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

**Krzysztof Dragan**

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland;

**Janez Grum**

University of Ljubljana, Slovenia;

**M.L. Kazakevich**

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of NAS

of Ukraine, Kyiv;

**O.M. Karpash, P.M. Raiter**

Ivano-Frankivsk NTU of Oil and Gas, Ukraine;

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

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

**V.S. Eremenko, Yu.V. Kuts, A.G. Protasov**

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine;

**Adriana Savin**

National Institute of R&D for Technical Physics, Iasi, Romania;

**V.O. Storozhenko**

Kharkiv NU of Radio Electronics, Ukraine;

**H.M. Suchkov**

NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;

**M.G. Chausov**

NU of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv.

Executive Director – O.T. Zelnichenko, International

Association «Welding», Kyiv, Ukraine

**Founders**

National Academy of Sciences of Ukraine,

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

International Association «Welding» (Publisher)

**Address**

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

03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.

Tel./fax: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved

by the Ministry of Education and Science of Ukraine

for the publication of works of applicants for academic

degrees in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration

of KB 4787 dated 09.01.2001

**Subscription 2023**

Subscription index 74475.

4 issues per year (issued quarterly), back issues available.

\$128, subscriptions for the printed (hard copy) version,

air postage and packaging included.

\$104, subscriptions for the electronic version.

Publisher is not responsible for the content of the

promotional material.

**CONTENT**

**SCIENTIFIC AND TECHNICAL**

*UCHANIN V.M.* Surface eddy current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems ..... 3

*YUZEFOVYCH R.M., JAVORSKYJ I.M., LYCHAK O.V., TROKHYM G.R., VARYVODA M.Z., SEMENOV P.O.* Diagnostics of gear pair damage using the methods of biperiodically correlated random processes. Part 2. Investigation of vibration signals of the wind power generator gearbox ..... 13

*MILENIN O.S., VELIKOIVANENKO O.A., ROZYNKA G.P., PIVTORAK N.I.* Numerical assessment of brittle strength of field welds of the main gas pipelines at transportation of gas-hydrogen mixtures ..... 22

*LOBANOV L.M., NEDOSEKA A. YA., NEDOSEKA S.A., YAREMENKO M.A., OVSIENKO M.A., NAZARCHUK Z.T., SKALSKYI V.R.* A new standard of technical diagnostic indices and its application at AE monitoring ..... 28

*NENAD GUCUNSKI, HUNG MANH LA, KIEN DINH, MUSTAFA KHUDHAIR* Advancing condition assessment of reinforced concrete bridge elements through automation, visualization, and improved interpretation of multi-NDE technology data ..... 34

**INFORMATION**

*M. PIESING* The deadly danger you can't see ..... 45

History of the journal «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» ..... 49

Vocational training programs for 2023 ..... 51

The achievement of additive technologies for the reconstruction of Ukrainian of industry, science and engineering ..... 54

News of the Ukrainian society for non-destructive testing ..... 55

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»

# НАКЛАДНІ ВИХРОСТРУМОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОДВІЙНОГО ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ЗАСІБ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В.М. Учанін

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

Представлено принципово новий тип накладних вихрострумів перетворювачів подвійного диференціювання, які характеризуються підвищеною чутливістю до поверхневих і підповерхневих дефектів різного типу. Розроблено сімейство вихрострумів перетворювачів подвійного диференціювання різного діаметру з різною просторовою роздільною здатністю. У роботі проаналізовано основні особливості вихрострумів перетворювачів подвійного диференціювання та наведено нові інноваційні технології контролю, які дозволяють вирішити найскладніші проблеми неруйнівного контролю. Розроблені вихрострумові перетворювачі досліджено та випробувано як ефективний засіб неруйнівного контролю багат шарових авіаційних конструкцій, у яких необхідно виявляти внутрішні дефекти. Вони забезпечують, зокрема, виявлення тріщин у другому шарі багат шарових авіаційних конструкцій або тріщин на зворотній поверхні обшивки авіаційних конструкцій; виявлення підповерхневих дефектів у зоні зварного шва з шорсткою поверхнею; виявлення тріщин через ремонтні латки, виготовлені з алюмінієвого сплаву або вуглецевого композиту; виявлення підповерхневих тріщин біля заклепкових отворів тощо. Ці технології створюють унікальні можливості для своєчасного виявлення небезпечних пошкоджень без розбирання конструкції об'єкта контролю або видалення захисного покриття. Розроблені вихрострумові перетворювачі є ефективними для виявлення тріщин у феромагнітних сталевих виробках, таких як поковки, лопатки та вали газових турбін, рейки, колеса або осі залізничного рухомого складу, литво з грубо обробленою поверхнею тощо. Крім того, висока чутливість до дефектів може бути досягнута навіть під час контролю через повітряний зазор або діелектричний покрив. Це дозволяє успішно використовувати їх у багатьох автоматизованих системах контролю. Бібліогр. 17, рис. 15.

*Ключові слова:* неруйнівний контроль, вихрострумів перетворювач подвійного диференціювання, багат шарова конструкція літака, підповерхневий дефект, ремонтні латки, заклепковий отвір

**Вступ.** Вихрострумів (ВС) метод неруйнівного контролю (НК) є одним із найпоширеніших для виявлення поверхневих і приповерхневих дефектів та визначення характеристик електропровідних матеріалів [1–9]. На початку свого розвитку ВС метод застосовували переважно для виявлення поверхневих дефектів через високі робочі частоти, які використовувалися в перших ВС дефектоскопах, що призводило до концентрації змінного струму у зовнішніх шарах електропровідного матеріалу внаслідок скін-ефекту [10, 11]. Згодом почали використовувати нижчі робочі частоти, що розширило сферу застосування ВС методу та дозволило виявляти приховані підповерхневі дефекти, у тому числі в багат шарових конструкціях літаків. Вихрострумові перетворювачі (ВСП), які зазвичай застосовуються в практиці ВС контролю, поділяють на два основних типи – абсолютні та диференційні [3–5, 8]. Кілька десятиліть тому у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України з метою покращення селективності ВС контролю було створено принципово новий тип накладних ВСП, які названо ВСП подвійного диференціювання [8, 12, 13]. Досвід їх використання показав, що ці ВСП мо-

жуть вирішувати задачі, які складно (а іноді неможливо) вирішити традиційними ВСП абсолютного або диференційного типу. Запропоновані ВСП подвійного диференціювання характеризуються підвищеною чутливістю до поверхневих і підповерхневих дефектів різного типу, що виникають під час виготовлення виробу або ініційовані явищами втоми чи корозії в експлуатованих конструкціях. Розроблено сімейство ВСП подвійного диференціювання різного діаметру з різною просторовою роздільною здатністю, склад якого постійно розширюється [8]. Розроблені ВСП досліджено та випробувано як ефективний засіб НК типових авіаційних багат шарових конструкцій (АК), у яких необхідно виявляти внутрішні дефекти. Вони забезпечують, зокрема, виявлення тріщин у другому шарі багат шарових АК або тріщин на зворотній поверхні обшивки АК зі зменшенням впливу краю підсилювального поясу; виявлення підповерхневих дефектів у зоні зварного шва з шорсткою поверхнею; виявлення тріщин через ремонтні латки, виготовлені з алюмінієвого сплаву або вуглецевого композиту; виявлення підповерхневих тріщин біля заклепкових отворів тощо. Ці технології створюють унікальні можливості

В.М. Учанін – <http://orcid.org/0000-0001-9664-2101>  
© В.М. Учанін, 2022

для своєчасного виявлення небезпечних пошкоджень без розбирання конструкції об'єкта контролю (ОК) або видалення захисного покриття [8, 12, 13]. Крім того, розроблені ВСП є ефективними для виявлення тріщин у феромагнітних сталевих виробках, таких як поковки, лопатки та вали газових турбін, рейки, колеса або осі залізничного рухомого складу, литво з грубо обробленою поверхнею тощо [8]. ВСП подвійного диференціювання, наприклад, використано в механізованій 8-канальній установці для виявлення тріщин у зварних швах із феромагнітних сталей через діелектричний захисний покриття завтовшки 4 мм, розробленій німецькою фірмою Test Maschinen Technik GmbH. При цьому висока чутливість до дефектів може бути досягнута навіть під час контролю через повітряний зазор або діелектричний покриття завтовшки до 10 мм. Через цю особливість ВСП подвійного диференціювання успішно використовуються в багатьох автоматизованих системах НК, наприклад, у 64-канальній системі ВС контролю для виявлення дефектів алюмінієвих смужок, розробленій в Інституті НК Фраунгофера (Саарбрюкен, Німеччина), багатоканальних системах НК колісних пар і залізничних осей, розроблених в Українському інституті неруйнівного контролю (Київ) тощо [8].

У цій статті проаналізовано основні особливості ВСП подвійного диференціювання та наведено нові інноваційні технології ВС НК, які дозволяють вирішити найскладніші проблеми НК.

**Конструкція ВСП подвійного диференціювання та основні особливості формування сигналів від дефектів.** ВСП подвійного диференціювання складаються з двох генераторних обмоток 1 і двох вимірювальних обмоток 2, встановлених на феритових осердях та розташованих по кутах чотирикутника (рис. 1, а) [8]. Дві генераторні обмотки 1 з'єднані послідовно та орієнтовані для створення однакових і протилежних первинних електромагнітних полів. Розроблені ВСП змонтовані в корпус із алюмінієвого сплаву для зменшення електронних завад і забезпечено роз'ємами різного типу для роботи з дефектоскопами провідних виробників засобів ВС контролю (рис. 1, б).

Побудова ВСП подвійного диференціювання (рис. 1, а) створює важливі особливості у розподілі первинного електромагнітного поля та вторинного поля, створеного вихровими струмами, індукованими в ОК (рис. 2). Зокрема, у зоні між обмотками збудження створюється характерна нейтральна площина, у якій вертикальна складова сумарного електромагнітного поля дорівнює нулю (на рис. 2, а показано пунктиром) [8]. Вимірювальні обмотки ВСП встановлено в нейтральній площині та орієнтовано чутливими до вертикальної складової електромагнітного поля, яка дорівнює нулю для ізотропних і бездефектних матеріалів ОК. Важливо, що вихрові струми, створювані обома обмотками збудження, мають однаковий напрямок і таким чином у нейтральній площині додаються (рис. 2, б), що сприяє збільшенню чутливо-

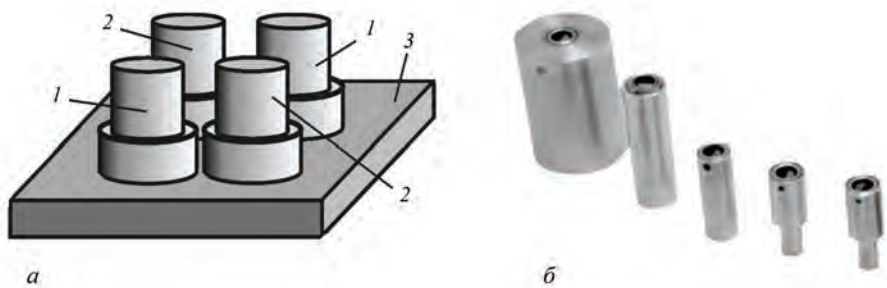


Рис. 1. Побудова ВСП подвійного диференціювання (а): 1 – обмотки збудження; 2 – вимірювальні обмотки; 3 – ОК; ВСП подвійного диференціювання різного розміру і роздільної здатності (б)

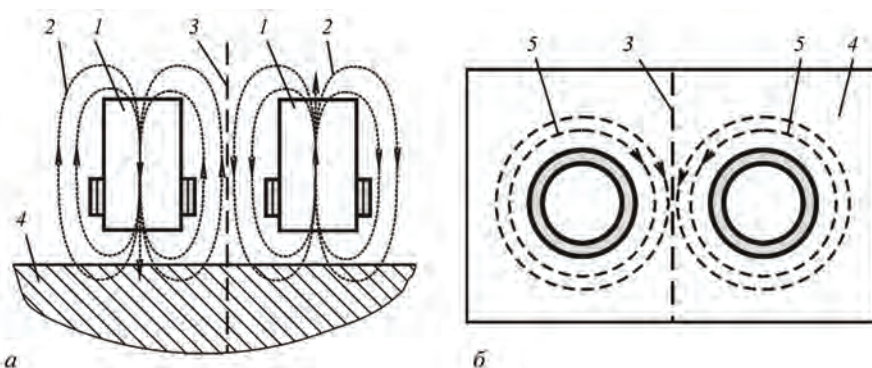


Рис. 2. Первинне електромагнітне поле, створене обмотками збудження (а) і відповідні вихрові струми (б): 1 – феритові осердя; 2 – первинне електромагнітне поле; 3 – нейтральна площина; 4 – ОК; 5 – вихрові струми



сті ВС контролю. За рахунок зустрічного з'єднання вимірювальних обмоток реалізується подвійно диференціальний відгук вихідного сигналу ВСП.

Конструкція ВСП подвійного диференціювання забезпечує глибоке проникнення вихрових струмів вглиб матеріалу ОК, оскільки загасання вихрових струмів можна зменшити або шляхом вибору великого діаметра обмоток ВСП коаксіального типу, або використанням обмоток збудження та вимірювальних обмоток малого діаметра, розташованих на певній відстані одна від одної (рис. 1). Через відносно невеликий діаметр обмоток отримано також високу просторову роздільну здатність, що важливо для виявлення локальних дефектів. Характерною особливістю таких ВСП порівняно зі звичайними є: висока чутливість до подовжених (типу тріщина) та до локальних (таких як коротка тріщина, корозійний пітинг або пора) дефектів; висока чутливість до поверхневих і підповерхневих дефектів, у тому числі під час контролю через немагнітну обшивку, шар захисного покриття або проміжок між ВСП і поверхнею ОК; велика глибина контролю для низькочастотних ВСП; низький рівень завад, у тому числі обумовлених впливом зміни зазору. Розроблено низку ВСП подвійного диференціювання діаметром 4...33 мм, що характеризуються різним розміром обмоток, діапазоном робочих частот і просторовою роздільною здатністю (рис. 1, б). ВСП подвійного диференціювання адаптовано до сучасних універсальних ВС дефектоскопів. Вони забезпечують контроль на різних робочих частотах у діапазоні 50 Гц...12 МГц.

Особливістю ВСП подвійного диференціювання є залежність їх чутливості від орієнтації тріщини. Оптимальну орієнтацію цих ВСП відносно напрямку тріщини показано на рис. 3, а, де лінія, що з'єднує центри обмоток збудження, орієнтована під кутом 45° відносно напрямку тріщини. Спеціальна позначка на корпусі ВСП допомагає вибрати оптимальну орієнтацію. При цьому сигнал від тріщини має «квазіабсолютний» характер (рис. 3, б), подібний до сигналу абсолютного ВСП, який характеризується максимальною амплітудою під час знаходження ВСП безпосередньо над тріщиною.

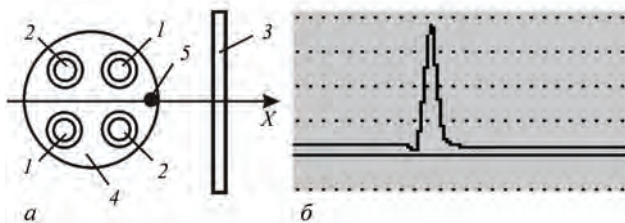


Рис. 3. Оптимальна орієнтація ВСП подвійного диференціювання відносно напрямку тріщини (а): 1 і 2 – обмотки збудження та вимірювальні обмотки відповідно; 3 – тріщина; 4 – корпус; 5 – спеціальна позначка; «квазіабсолютний» сигнал від тріщини (б)

Реальні сигнали низькочастотного ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201, створювані підповерхневим дефектом у комплексній площині імпедансу ВС дефектоскопа типу ELOTTEST В1 німецької фірми Rohmann GmbH, представлені на рис. 4. Для виявлення підповерхневих дефектів типу тріщин, що залягають на глибині 1 та 3 мм, використовували низьку робочу частоту 2 кГц. Чутливість ВС дефектоскопа до дефекту, що залягає на глибині 3 мм, вибрано на 10 дБ більшою, ніж для дефекту з глибиною залягання 1 мм. Тут глибина залягання дефекту відповідає відстані між верхнім краєм підповерхневого дефекту та поверхнею ОК. Також для порівняння наведено сигнал від зазору («lift-off») на рис. 4) як основного джерела завад. Сигнали від зазору орієнтовано в комплексній площині горизонтально відповідно до стандартної процедури ВС контролю.

Наведені результати показують досить високу чутливість до підповерхневих дефектів із високим ступенем заглушення впливу зміни зазору. Навіть для дефекту, що лежить на глибині 3 мм, відношення амплітуди сигналу від дефекту до амплітуди сигналу відриву суттєво перевищує 6 дБ. Крім того, сигнали відрізняються за фазою (напрямок сигналів у комплексній площині), що надає додаткові можливості для розділення корисних сигналів, створених дефектами та впливом зазору.

Для локальних дефектів, таких як пори або корозійні виразки, ВСП подвійного диференціювання створюють специфічний просторовий чотириточковий розподіл сигналу з двома позитивними та двома негативними піками. На рис. 5 подано характерні експериментальні розподіли чутливості, отримані за допомогою ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201 під час порядкового сканування зони локального дефекту, імітованого свердлінням діаметром 1 мм [8].

**Виявлення втомних тріщин у другому шарі двошарових АК в зоні заклепок.** Розглянемо проблему виявлення втомних тріщин, що виникли під час експлуатації АК між заклепками у другому шарі двошарових з'єднань стрингер–обшивки. Такі з'єднання характерні для більшості АК.

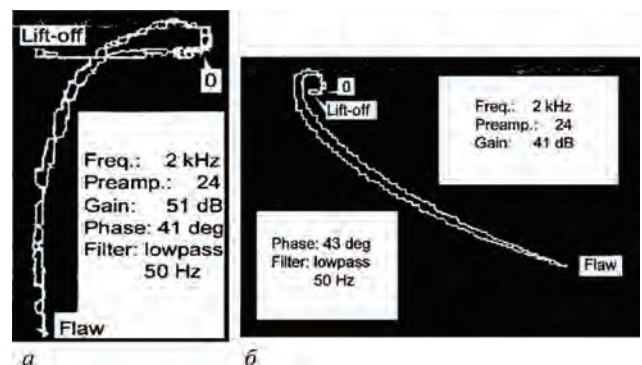


Рис. 4. Сигнали ВСП подвійного диференціювання від підповерхневих тріщин з глибинами залягання 1 (а) і 3 мм (б)

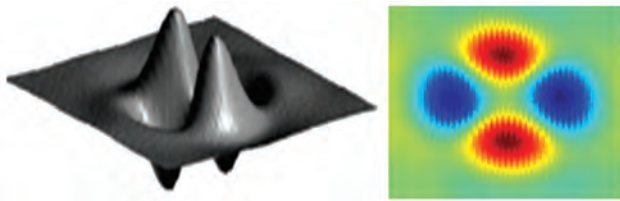


Рис. 5. Чотириточковий просторовий розподіл сигналу з двома позитивними та двома негативними піками для локальних дефектів

У досліджуваному зразку необхідно було виявити тріщини між заклепками через верхню обшивку завтовшки 1,4 мм. Відстань між краями заклепок із потайною головкою становила лише 8 мм. Таким чином, під час сканування зони між заклепками спостерігався помилковий сигнал за відсутності дефекту, пов'язаний із впливом заклепкового отвору. Зразок для налаштування ВС дефектоскопа наведено на рис. 6. Під час випробувань використовували дві траєкторії сканування: траєкторія 5 дозволяє спостерігати сигнали за відсутності дефекту, а траєкторія 6 імітує сканування через тріщину, розташовану в другому шарі АК [12].

Основною проблемою під час ВС контролю таких конструкцій є високий рівень завад, пов'язаних із впливом заклепки. Тому методика контролю повинна відокремлювати сигнали від дефекту у другому шарі від сигналу завад, створюваних заклепками. Селективну інтерпретацію сигналів можна забезпечити шляхом аналізу характерних для дефекту ознак у комплексній площині на екрані дефектоскопа. Розроблена методика передбачає використання ВСП типу МДФ 0602 діаметром 6 мм, яким сканують зону між заклепками (пунктирні лінії на рис. 6, а). Попередньо компенсували сигнал небалансу після встановлення ВСП у точці 4, яка розташована на відстані 10...12 мм

від лінії, що з'єднує заклепки 2. Сигнали реєстрували за допомогою ВС плати типу EDDYMAX на робочій частоті 6 кГц. Сигнали від тріщини у другому шарі наведено на рис. 6, б, а сигнал під час сканування бездефектної зони між заклепками – на рис. 6, в.

З отриманих результатів видно, що сигнали ВСП під час сканування бездефектної зони (рис. 6, в) рухаються від точки балансу («0» на рис. 6) у напрямку нижньої частини комплексної площини. І навпаки, сигнал від дефекту має інший висхідний напрямок у другий квадрант комплексної площини (рис. 6, б). Ці результати вказують на можливість селективного ВС контролю, за якого корисні сигнали від дефектів легко розрізняють від сигналів, створених заклепковими отворами за відсутності дефектів.

**Виявлення втомних тріщин, що зародилася на зворотній поверхні АК в зоні краю підсилювального поясу.** Інший характерний приклад ефективного ВС контролю АК стосується проблеми виявлення внутрішніх втомних тріщин в обшивці фюзеляжу літака Boeing 737 в місцях з'єднань внапуск з додатковим підсилювальним поясом (ПП) (рис. 7, а). ПП 3 завтовшки 0,9 мм розташований між обшивками 1 і 2 з алюмінієвого сплаву завтовшки 0,9 мм (рис. 7, а). Запропонована методика ВС контролю спрямована на виявлення втомних тріщин завглибшки 0,45 мм (50 % товщини обшивки), які зароджуються на внутрішній поверхні верхньої обшивки 1 вздовж краю ПП 3 з доступом тільки з зовнішньої сторони фюзеляжу (рис. 7, в). Проблема полягає у необхідності відокремлення сигналів від тріщин, розташованих на внутрішній поверхні верхньої обшивки, від достатньо сильних помилкових сигналів, обумовлені

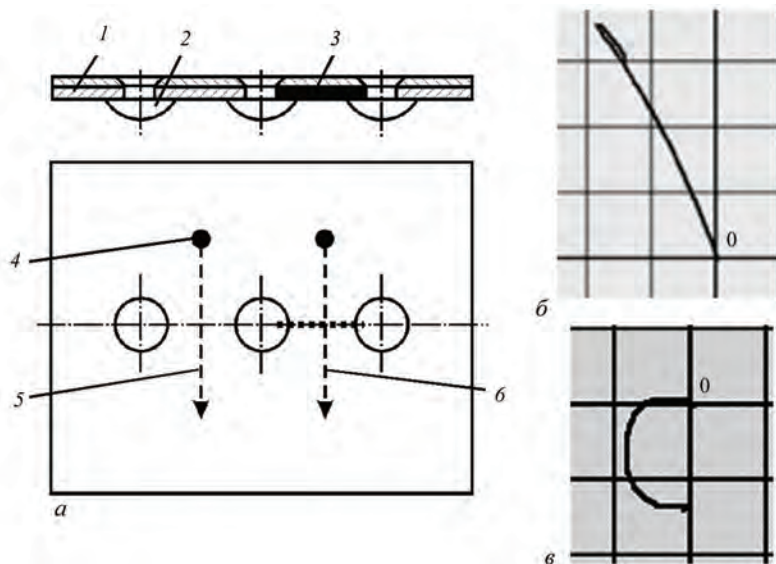


Рис. 6. Зразок для моделювання двошарової АК з заклепками (а): 1 – двошарова конструкція; 2 – заклепки; 3 – тріщина; 4 – точка балансування; 5 та 6 – траєкторії сканування в бездефектній та дефектній зонах відповідно; сигнал ВСП у комплексній площині від тріщини у другому шарі (б); сигнал, обумовлений впливом отворів бездефектних заклепок (в)

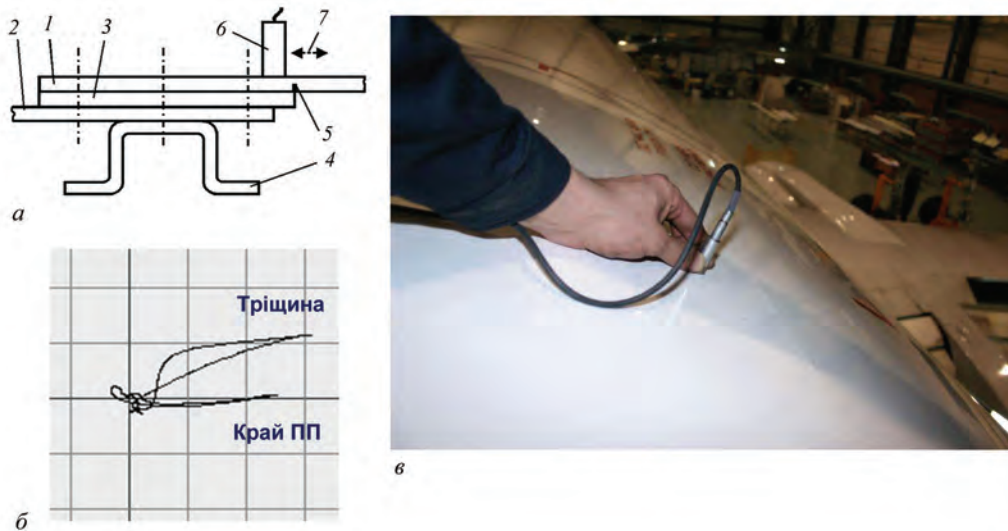


Рис. 7. Багатошарова конструкція літака Боїнг 737 з підсилювальним поясом (а); 1, 2 – обшивки; 3 – ПП; 4 – стрингер; 5 – тріщина; 6 – ВСП; 7 – траєкторія сканування; сигнал від тріщини (б); проведення контролю обшивки літака Боїнг 737 за допомогою ВСП типу МДФ 1201 (в)

них впливом краю ПП, які утворюються через використання низьких робочих частот.

Запропонована методика НК базується на використанні низькочастотного ВСП типу МДФ 1201 на робочій частоті 26 кГц. Сигнали ВСП реєстрували у комплексній площині, яку обертали таким чином, щоб сигнал від краю ПП скерувати горизонтально (рис. 7, б) [12]. Видно (рис. 7, б), що сигнал від тріщини, що залягає на глибині 0,45 мм, відхиляється від горизонталі на кут  $\sim 30^\circ$ . Цієї різниці достатньо для повного розділення сигналів від тріщини і краю ПП. Тим більше, кут між цими сигналами можна легко збільшити вибором більшого (наприклад на 12 дБ) підсилення по вертикальній осі порівняно з підсиленням по горизонтальній осі. Дану методику впроваджено для експлуатаційного НК літака Boeing 737 в компанії «Міжнародні Авіалінії України» (рис. 7, в).

**Виявлення втомних тріщин АК через ремонтні латки.** Ремонтні латки, наклеєні на пошкоджені конструкції літака, широко застосовуються як економічно ефективний метод збільшення терміну служби. Методи ремонту з метою посилення пошкодженої АК передбачають використання різних матеріалів, таких як алюмінієвий сплав або пластик, армований вуглецевим волокном, тощо. Такі конструкції підлягають додатковому НК з метою виявлення втомних тріщин, які можуть виникнути у відремонтованій АК під латкою. ВСП подвійного диференціювання успішно використано для виявлення тріщин через латку з алюмінієвого сплаву, наклеєну на пошкоджене крило літака Ту-154. Після усунення тріщини було сформовано закруглене заглиблення для зниження концентрації механічних напружень. Очікувалося, що тріщина може виникнути у нижній частині заглиблення через послаблення

обшивки. Через такі очікування передбачався демонтаж латки через кожні 300 посадок літака для виявлення можливих тріщин на дні заглиблення методами традиційного ВС контролю. Методика ВС контролю, побудована на використанні низькочастотних ВСП подвійного диференціювання, забезпечила виявлення тріщин в обшивці крила через латку з алюмінієвого сплаву завтовшки 2 мм без її демонтажу.

Сучасні технології ремонту АК використовують латки із композиційних вуглецевих матеріалів [14, 15]. Найчастіше ремонтні латки з вуглепластику наклеюють на пошкоджений елемент АК з алюмінієвого сплаву. Для дослідження чутливості ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201 виготовили зразок із алюмінієвого сплаву з двома електроерозійними прорізами завглибшки 0,5 і 1 мм, який накривали листом вуглепластику завтовшки 4,5 мм. Будь-які звичайні ВСП не мають достатньої чутливості для виявлення таких дефектів через шар вуглепластику. Сигнали, створені дефектами під латками, реєстрували на робочій частоті 30 кГц за допомогою ВС плати типу EDDYMAX у комплексній площині та в режимі часової розгортки (рис. 8) [12].

Наведені на рис. 8 результати демонструють достатньо високий рівень сигналів від тріщини завглибшки 0,5 мм під час контролю через латку з вуглепластику завтовшки 4,5 мм, що достатньо для ефективного експлуатаційного НК. При цьому амплітуда сигналу корелює з глибиною виявлених дефектів, що можна використати для їх кількісного оцінювання.

**Обертова методика виявлення втомних тріщин багатошарових АК під головою заклепки.** Раніше було показано, що найвищу чутливість до тріщин, що починаються від заклепкових



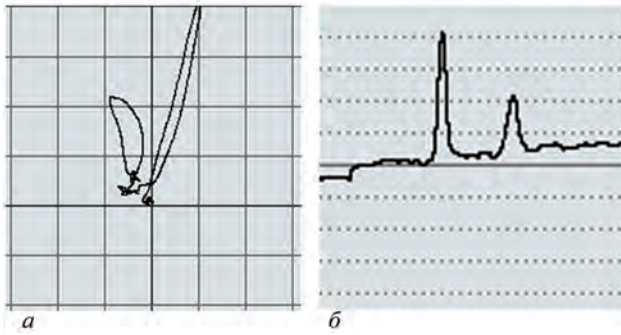


Рис. 8. Сигнали від тріщин завглибшки 0,5 і 1 мм під час контролю через латку із вуглепластика завтовшки 4,5 мм у комплексній площині (а) та в режимі часової розгортки (б)

отворів, має обертовий спосіб, за якого ВСП встановлюють на головку заклепки та обертають навколо її осі [8]. Схему реалізації такої методики за допомогою ВСП подвійного диференціювання наведено на рис. 9. Для встановлення і центрування ВСП в його корпусі виконано спеціальний отвір. Для потайних заклепок для центрування використовують діелектричну накладку. Точність центрування ВСП відносно заклепки під час його обертання важлива, так як впливає на рівень завад.

Обертовий ВСП випробували на робочій частоті 2 кГц. Для дослідження використали зразки з отвором діаметром 6 мм, на бічній поверхні яких нанесено електроерозійні прорізи завширшки 0,1 мм та завдовжки 1...6 мм. Зразок накривали бездефектною обшивкою завтовшки 2 мм з отвором діаметром 6 мм і з'єднували заклепкою для імітації реальної АК (рис. 9, а, б). Сигнали ВСП від

дефектів досліджували у комплексній площині ВС плати типу EDDYMAX. ВСП спочатку встановлювали на бездефектний зразок, що імітує АК без дефекту, і проводили компенсацію небалансу [13]. Після цього проводили реєстрацію сигналів від дефектів шляхом обертання ВСП. Усі дефекти були виявлені з високим співвідношенням сигнал/завада. На рис. 9, в для прикладу наведено сигнал у комплексній площині, отриманий від найменшого дефекту завдовжки 1 мм. Сигнали завад, створені під час обертання ВСП навколо заклепки у бездефектному зразку, наведено на рис. 9, з. Ці результати показують, що сигнал від найкоротшої тріщини завдовжки 1 мм більш ніж на 6 дБ перевищує рівень сигналу від можливих завад. Це переконливо показує, що запропонований обертовий ВСП може виявляти тріщини завдовжки лише 1 мм під заклепкою та верхньою обшивкою завтовшки 2 мм. Для багатьох АК це означає, що втомні тріщини будуть виявлені до того, як вони вийдуть за межі головки заклепки, коли втомна тріщина досягне критичного розміру і станеться лавиноподібне руйнування АК.

**Методика ковзного контролю для виявлення втомних тріщин у багатопарових АК.** Нова високопродуктивна методика виявлення поперечних (відносно ряду заклепок) тріщин, що виникли в зоні заклепок АК під час експлуатації, також базується на застосуванні ВСП подвійного диференціювання (Учанін В. Вихрострумний спосіб виявлення дефектів в зоні заклепок у внутрішніх шарах нероз'ємних авіаційних вузлів. Пат. Украї-

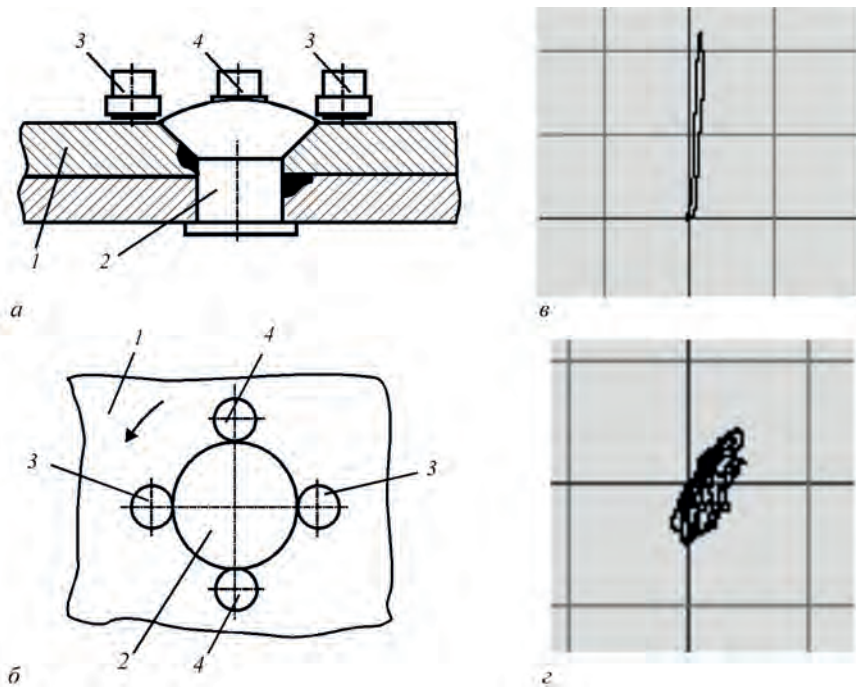


Рис. 9. Обертовий ВСП подвійного диференціювання, встановлений на заклепку двохпарової АК: поперечний переріз (а) і вид зверху (б): 1 – ОК; 2 – заклепка; 3 і 4 – генераторна і вимірювальна обмотки відповідно; сигнали ВСП у комплексній площині від тріщини завдовжки 1 мм, розташованою під головою заклепки і обшивкою завтовшки 2 мм (в); сигнали завад під час обертання ВСП навколо бездефектної заклепки (г)



ни 122624 України, Опубл. 10.12.20, Бюл. № 23). Для реалізації методики розроблено низькочастотний ВСП типу МДФ 1502 діаметром 15 мм. Згідно з запропонованою методикою ВСП сканує АК вздовж лінії, паралельної ряду заклепок, на деякій відстані, як показано на рис. 10.

Можливість використання ВСП подвійного диференціювання для виявлення поперечних тріщин, розташованих у другому шарі завтовшки 3 мм поблизу заклепок (рис. 10), досліджено за допомогою ВС плати EDDYMAX. ВСП подвійного диференціювання дають можливість підвищити достовірність контролю, пов'язану з повним розділенням ВС сигналів від поперечних тріщин і бездефектних заклепок за різними напрямками сигналу у комплексній площині. Цю особливість ілюструє рис. 10, де наведено сигнали для тріщини завдовжки 6 мм у другому шарі у комплексній площині (рис. 10, б) та в режимі часової розгортки (рис. 10, в). Для порівняння на рис. 10, г і рис. 10, д наведено сигнали, отримані від бездефектних заклепкових отворів у комплексній площині та в режимі часової розгортки відповідно. Видно, що сигнали від бездефектних отворів мають досить велику амплітуду, так як знаходяться у верхній обшивці. Але ці результати показують можливість надійного розрізнення

сигналів, створених тріщинами у другому шарі АК та бездефектними отворами, за напрямком у комплексній площині або за знаком сигналів у режимі часової розгортки. Ця методика має нижчу чутливість до тріщин порівняно з обертовим способом. Через це вона може використовуватись у випадках менших вимог щодо граничної чутливості. Тим не менше, суттєво вища продуктивність ковзного ВС контролю порівняно з обертовим способом дає певні переваги для оперативного контролю в умовах експлуатації АК.

**Виявлення тріщин в гальтельній зоні лопаток газових турбін.** Для відпрацювання нової технології НК в гальтельній зоні лопатки було електроерозійним способом нанесено щілину (розкриття 0,2 мм) завдовжки 4 мм і завглибшки 0,2 мм.

Між робочою поверхнею ВСП і поверхнею лопатки через її кривизну завжди є проміжок  $\sim 1$  мм (рис. 11, а), який обмежує можливості ВС контролю звичайними ВСП. Крім того, під час зигзагоподібного сканування цієї зони ВСП змінює положення відносно контрольованої поверхні, через що традиційні ВСП створюють високий рівень завад, які унеможливають проведення ВС контролю. Ці обмеження можна усунути використанням ВСП подвійного диференціювання типу МДФ

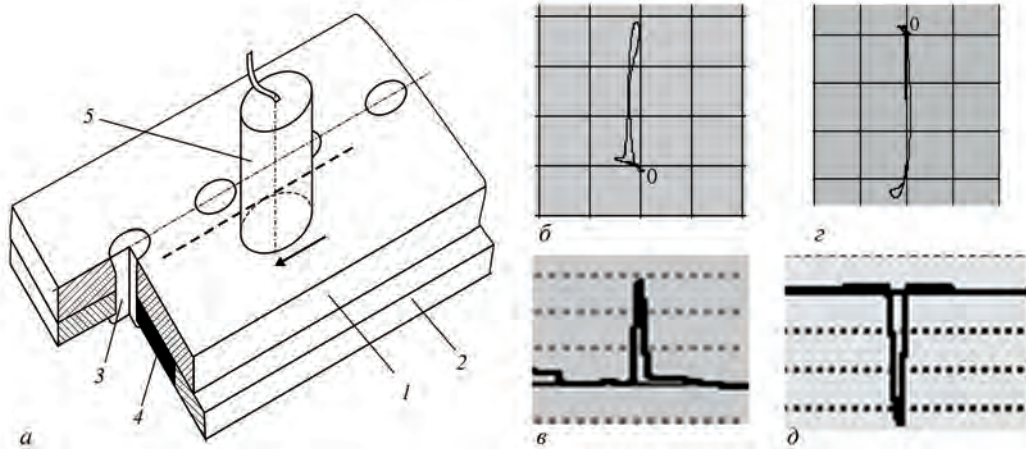


Рис. 10. Схема реалізації ковзної методики виявлення поперечних тріщин у зоні заклепок у другому шарі АК (а): 1 і 2 – перший і другий шари ОК відповідно; 3 – заклепка; 4 – поперечна тріщина; 5 – ВСП; сигнали ВС контролю у комплексній площині (б, г); режимі часової розгортки (в, д) від тріщини у другому шарі (б, в) та від бездефектних заклепкових отворів (г, д)

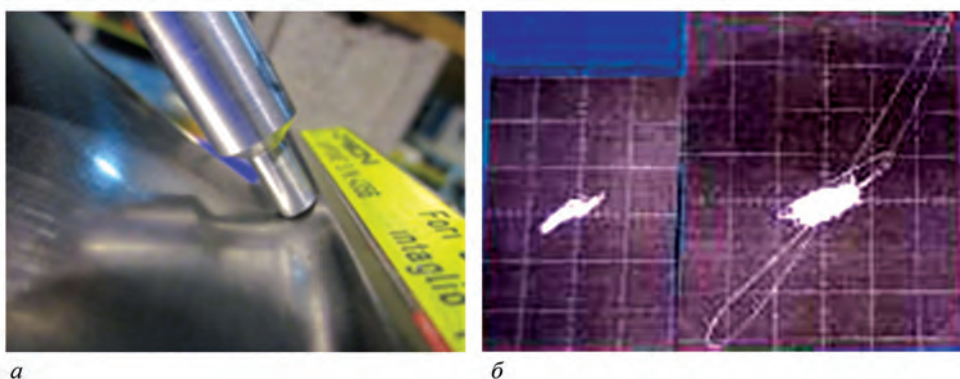


Рис. 11. ВСП, розташований у зоні гальтелі лопатки (а) та сигнали (б) зміни зазору під час сканування бездефектної зони для різної орієнтації ВСП (ліворуч) і сигнал від дефекту (праворуч)



Рис. 12. Експлуатаційний контроль лопаток газової турбіни за допомогою ВСП типу МДФ 0501

0501 на робочій частоті 800 кГц. Сигнали ВСП реєстрували за допомогою ВС дефектоскопа типу ELOTEST 300 (фірма Rohmann GmbH, Німеччина). Наведені на рис. 11, б результати також показують достатньо високий рівень сигналу ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 0501 порівняно з сигналами завад. Спеціальний ВСП подвійного диференціювання з робочим діаметром 5 мм і довгою рукояткою був розроблений для виявлення тріщин у зоні галтелей лопаток газових турбін під час періодичного експлуатаційного ВС контролю (рис. 12).

**Виявлення тріщин в отворах газових турбін.**

Для виявлення дефектів на бічній стінці отворів газової турбіни було розроблено спеціальну обертову головку з ВСП подвійного диференціювання на основі ротора ELOTEST SR-1 фірми Rohmann GmbH (рис. 13, а). Для відпрацювання методики контролю виготовлено стандартний зразок з отвором діаметром 39 мм, на бічну стінку якого нанесено чотири штучні дефекти типу тріщина завглибшки 0,2; 0,3; 0,5 та 1,0 мм.

На рис. 13, б, в наведено результати, отримані в обертовому режимі на робочій частоті 400 кГц,

із застосуванням стандартного зразка з дефектами без обробки сигналу та з використанням фільтра верхніх частот із частотою зрізу 20 Гц. В обох випадках досягнуто високу чутливість з заглушенням характерних завад, пов'язаних з неоднорідністю магнітних властивостей матеріалу ОК і зміною положення ВСП відносно поверхні під час сканування.

**Багатоелементний ВСП для підвищення продуктивності контролю.** Контроль великогабаритних конструкцій займає багато часу через малий розмір ВСП, необхідного для чутливої та надійної перевірки. У деяких випадках для підвищення продуктивності контролю використовують ВСП з видовженими зонами чутливості. Але такі ВСП не відповідають вимогам щодо чутливості, що обмежує їх використання. Найкращою продуктивністю можна досягти застосуванням мультиплексних систем контролю на основі матричних ВСП [16, 17]. Але такі системи мають високу вартість і необхідність налаштування для вузлів різних розмірів і форм. Нашою основною метою було створення нового ВСП, що характеризується високою чутливістю та просторовою

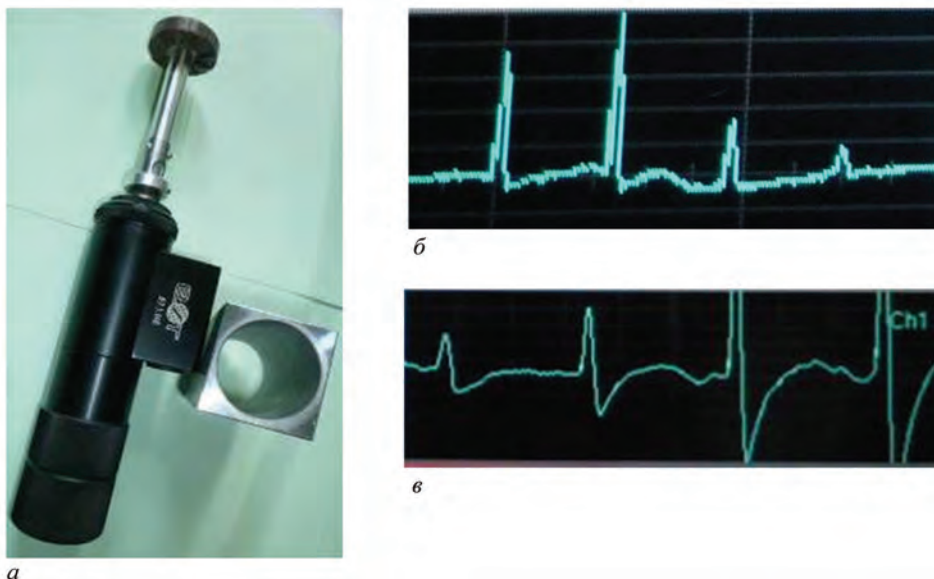


Рис. 13. Ротор ELOTEST SR-1 з ВСП подвійного диференціювання і стандартним зразком (а) та чотири сигнали від дефектів на бічній стінці отвору без обробки сигналу (б) і з використанням фільтру нижніх частот з частотою зрізу 20 Гц (в)



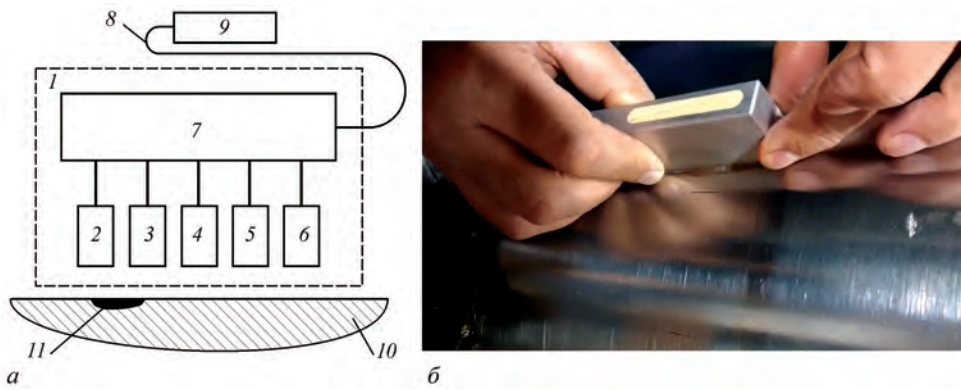


Рис. 14. Схема побудови багатоеlementного ВСП для роботи з одноканальними дефектоскопами: 1 – ВСП типу EDDYLINE; 2–6 – комплект окремих ВСП; 7 – вузол комутації; 8 – з’єднувальний кабель; 9 – дефектоскоп; 10 – ОК; 11 – тріщина; п’ятиelementний ВСП типу EDDYLINE 5/12 під час контролю сталевих поковок (б)

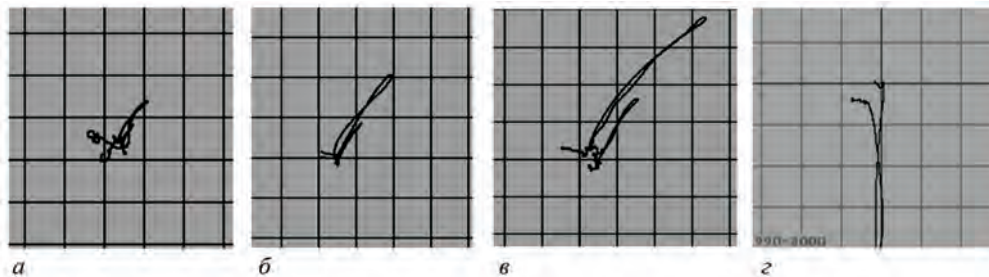


Рис. 15. Сигнали ВСП типу EDDYLINE 5/12 у комплексній площині для одного (а), двох (б) і трьох (в) окремих ВСП від тріщиноподібних дефектів завглибшки 0,1 і 0,2 мм; сигнал від зміни зазору (г)

роздільною здатністю в поєднанні з розширеною зоною контролю та можливістю роботи з порівняно недорогими одноканальними ВС дефектоскопами. Для підвищення продуктивності контролю розроблено п’ятиelementний ВСП типу EDDYLINE 5/12 (Учанін В., Іващенко К. Багатоеlementний вихрострумний перетворювач трансформаторного типу для одноканальних дефектоскопів. Позитивне рішення по заявці на винахід України № 202101949 від 13.04.21). Багатоеlementний ВСП складається з п’яти окремих розташованих у ряд ВСП, з’єднаних за допомогою спеціального блоку комутації для підсумовування сигналів окремих ВСП (рис. 14). Усі окремі ВСП реалізовано за схемою подвійного диференціювання для кращого заглушення завад. Завдяки такому з’єднанню досягнуто зону високої чутливості завдовжки ~60 мм. У той же час забезпечено високу локальність контролю, оскільки кожен окремих ВСП працює з тією ж чутливістю, що й до їх включення за запропонованою схемою.

Чутливість розробленого ВСП типу EDDYLINE 5/12 досліджували на зразку, виготовленому з феромагнітної сталі Ст 45, із штучними дефектами типу тріщина завширшки 0,1 мм і завдовжки 30 мм, виконаними електроерозійним методом. Виготовлені дефекти мають різну глибину в діапазоні 0,1...2 мм. На рис. 15, а наведено сигнали ВСП типу EDDYLINE 5/12 від найдрібніших щілин завглибшки 0,1 і 0,2 мм, коли зону дефекту сканували лише одним окремих ВСП, на робо-

чій частоті 200 кГц. У цей час інші чотири ВСП були розташовані поза зразком (у «повітрі»). На рис. 15, а наведено сигнали для тих самих дефектів, коли зону дефекту сканували двома окремих ВСП одночасно. На рис. 15, в показано сигнали дефектів, коли три окремі ВСП сканували зону видовженого дефекту одночасно. Видно (рис. 15, а–в), що сигнали кожного із додаткових окремих ВСП, які проходять над видовженою тріщиною, додаються, збільшуючи амплітуду сигналу відповідно до кількості таких ВСП, тобто ефект можливої взаємної компенсації їх сигналів відсутній. На рис. 15, г для порівняння показано сигнал зазору у комплексній площині, з якого видно, що сигнал зазору і сигнали від дефектів мають протилежний напрямок. Це демонструє можливість надійного розрізнення корисних сигналів, створених дефектами, і завад, створених змінами зазору ВСП під час сканування поверхні ОК.

Багатоеlementний ВСП типу EDDYLINE 5/12 успішно використовують в комплекті з одноканальним дефектоскопом типу ELOTEST B300 для контролю поковок із феромагнітної і аустенітної сталі в умовах їх виробництва (рис. 14, б). Проведено також успішні випробування багатоеlementних ВСП для ручного контролю валів газових турбін та штоків амортизаторів літаків.

**Висновки**

Представлено конструкцію запропонованих у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпен-



ка НАН України накладних вихрострумових перетворювачів подвійного диференціювання та проаналізовано особливості їх сигналів, створених дефектами різного типу. Наведено характерні приклади інноваційних методик ВС контролю, заснованих на використанні ВСП подвійного диференціювання, які дозволяють продемонструвати високу чутливість і селективність ВСП подвійного диференціювання до поверхневих і підповерхневих дефектів різного типу та велику глибину контролю, що особливо важливо для виявлення захованих дефектів у внутрішніх шарах багатшарових авіаційних конструкцій. Представлені ВСП можуть бути застосовані в промисловості для ефективного вирішення найскладніших проблем НК.

### Список літератури/References

1. Libby, H.L. (1971) *Introduction to Electromagnetic Non-destructive Test Methods*. New-York, etc. Wiley-Interscience.
2. McMaster R.C., VcIntire P. (1986) *Nondestructive Testing Handbook*. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, Flux leakage and Microwave Nondestructive Testing). Second edition. USA, American Society for NDT.
3. Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic flaw detection*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. (1967) *Накладные и экранные датчики*. Новосибирск, Наука, Сибирское отд-ние. Sobolev, V.S., Shkarlet, Yu.M. (1967) *Put-on and screen sensors*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
5. Дякин В.В., Сандовский В.А. (1981) *Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей*. Москва, Наука. Dyakin, V.V., Sandovsky, V.A. (1981) *Theory and calculation of put-on eddy-current transducers*. Moscow, Nauka [in Russian].
6. Sophian, A., Tian, G., Taylor, D., Rudlin, J. (2001) Electromagnetic and eddy current NDT: a review. *Insight*, 43(5), 1–5.
7. Kriezis, E.E., Tsiboukis, T.D., Panas, S.M., Tegopoulos, J. (1992) Eddy Currents: Theory and Applications. *Proc. of the IEEE*, 80(10), 1559–1589.
8. Учанін В.М. (2013) *Вихрострумові накладні перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, Сполум. Uchanin, V.M. (2013) *Eddy-current put-on double differentiation transducers*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
9. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11, 2525–2565. DOI: <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
10. Hagemaijer, D.K. (1985) Eddy-current standard depth of penetration. *Materials Evaluation*, 43(10), 1438–1454.
11. Mottl, Z. (1990) The Quantitative Relations Between True and Standard Depth of Penetration for Air-cored Probe Coils in Eddy-current Testing. *NDT International*, 23(1), 11–18.
12. Uchanin, V. (2022) Eddy current techniques for detecting hidden subsurface defects in multilayer aircraft structures. *Transactions on aerospace research*, 267(2), 69–79. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2022-0011>.
13. Uchanin, V. (2020) Detection of the fatigue cracks initiated near the rivet holes by eddy current inspection techniques. *Transactions on Aerospace Research*, 258(1), 47–58. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2020-0010>.
14. Bachir Bouiadjra, B., Benyahia, F., Albedah, A. et al. (2015) Comparison between composite and metallic patches for repairing aircraft structures of aluminum alloy 7075 T6. *Intern. Journ. of Fatigue*, 80, 128–135.
15. Bona, A. (2019) Theoretical and experimental review of applied mechanical tests for carbon composites with thermoplastic polymer matrix. *Transactions on aerospace research*, 4(257), 55–65. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2019-0023>.
16. Mook, G., Michel, F., Simonin, J. (2008) Electromagnetic imaging using probe arrays. *Proc. of 17th World Conf. on Nondestructive Testing, Shanghai*. www.ndt.net. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.173>.
17. Bureau, J.-F., Ward, R.C., Julien, A. (2012) Application of eddy current array technology to surface inspection. *Proc. of 18th World Conf. on Nondestructive Testing, Durban, South Africa*. www.ndt.net.

## SURFACE EDDY CURRENT PROBES OF DOUBLE DIFFERENTIAL TYPE AS AN EFFECTIVE TOOL TO SOLVE NON-DESTRUCTIVE INSPECTION PROBLEMS

V.M. Uchanin

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

A new type of surface eddy current probes of double differential type, which are characterized by increased sensitivity to surface and subsurface defects of various types, is presented. A family of double-differentiation eddy current probes of different diameters with different spatial resolutions has been developed. The paper analyzes the main features of double-differentiation eddy current probes and presents new innovative inspection techniques which allow solving the most complex problems of non-destructive testing. In particular, the developed eddy current probes have been researched and tested as an effective tool of inspection of multi-layered aircraft structures, in which it is necessary to detect internal defects. They provide, in particular, the detection of cracks in the second layer of stratified aircraft structures or cracks on the back surface of the aircraft structures skin; detection of subsurface defects in the weld zone with a rough surface; detection of cracks through repair patches made of aluminum alloy or carbon composite; detection of subsurface cracks near rivet holes, etc. These techniques create unique opportunities for timely detection of dangerous damage without disassembling the inspected object or removing the protective coating. The developed eddy current probes are effective for detecting cracks in ferromagnetic steel products such as forgings, gas turbine blades and shafts, rails, wheels or axles of railway rolling stock, rough-surfaced castings, etc. In addition, high sensitivity to defects can be achieved even during the inspection through an air gap or dielectric coating. This allows them to be successfully used in many automated inspection systems. 17 Ref., 15 Fig.

*Keywords: nondestructive testing, eddy current probe of double-differential type, stratified aircraft structure, subsurface defect, repair patches, rivet hole*

Надійшла до редакції 23.12.2022

# ДІАГНОСТИКА ПОШКОДЖЕНЬ ЗУБЧАСТИХ ПАР МЕТОДАМИ БІПЕРІОДИЧНО КОРЕЛЬОВАНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ

## Частина 2. Дослідження вібраційних сигналів редуктора вітрогенератора

Р.М. Юзефович<sup>1,2</sup>, І.М. Яворський<sup>1,3</sup>, О.В. Личак<sup>1</sup>, Г.Р. Трохим<sup>1</sup>, М.З. Варивода<sup>1</sup>, П.О. Семенов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.  
E-mail: [roman.yuzefovych@gmail.com](mailto:roman.yuzefovych@gmail.com)

<sup>2</sup>Бидгощська Політехніка. 85796, Польща, м. Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

<sup>3</sup>Національний університет «Львівська політехніка». 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

<sup>4</sup>Одеський національний морський університет. 65029, м. Одеса, вул. І. Мечнікова, 34

Наведено результати обробки вібраційних сигналів редуктора вітроенергетичної установки. Розглянуто модель вібрації у вигляді біперіодично корельованих випадкових процесів, що описує її стохастичну повторюваність з двома різними періодами. Отримано оцінки найменших квадратів періодів детермінованої частини вібраційного сигналу та потужності часових змін його стохастичної частини, а також проаналізовано амплітудні спектри детермінованих коливань і дисперсії стохастичних коливань для різних ступенів пошкодження. Запропоновано найефективніші для практичного застосування індикатори розвитку дефекту, що формуються на основі амплітудних спектрів. Проаналізовано кореляційну структуру стохастичної складової вібрації редуктора вітроенергетичної установки. Бібліогр. 20, табл. 1, рис. 16.

*Ключові слова:* редуктор вітроенергетичної установки, вібрація, періодична нестационарність, детерміновані коливання, кореляційна функція, індикатор розвитку дефекту

**Вступ.** Для вирішення задач технічної діагностики ефективними є методи статистичного аналізу вібраційних сигналів, що ґрунтуються на теорії та методах періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) [1] та на їх взаємному аналізі [2]. Однією з таких задач є оцінювання та контроль роботи елементів складних механічних систем, виявлення дефектів механізмів, що зароджуються, пошук індикаторів, які реагують на незначні відхилення параметрів технічного стану від норми. У [3] запропоновано модель у вигляді біперіодично корельованих випадкових процесів (БПКВП) для аналізу вібрацій пошкодженої зубчастої пари редуктора вітроенергетичної установки (ВЕУ), де модуляційна взаємодія детермінованих коливань двох коліс характеризується математичним сподіванням БПКВП, а взаємодія стохастичних коливань – кореляційною функцією БПКВП. Ряди Фур'є математичного сподівання та кореляційної функції складаються з гармонік частот обертання коліс, їх кратних і комбінацій. Гармоніки частот зчеплення є окремими гармоніками БПКВП представлення сигналу. Конкретний склад гармонік детермінованих і стохастичних коливань залежить від ступеня розвитку дефекту та місця його розташування.

Застосовано запропонований у [3] підхід для аналізу сигналів вібрації редуктора ВЕУ з використанням ПКВП для діагностики дефектів. У процесі

аналізу вібраційних сигналів визначено амплітудні спектри детермінованої складової коливань, а потужність часових змін стохастичної складової використано як характерні ознаки для оцінки ступеня розвитку дефекту. На основі результатів обробки вібраційних сигналів запропоновано найчутливіший індикатор для виявлення дефектів редуктора ВЕУ.

**Аналіз реальних даних.** Наведено результати аналізу піврічного моніторингу сигналів вібрацій редуктора ВЕУ з наступними характеристиками: кількість зубів шестерні – 25, кількість зубів колеса – 94. Тривалість отриманих вібраційних сигналів – 3,35 с (8192 точки). Фрагменти вібраційних сигналів, що відповідають різним стадіям розвитку дефекту зуба шестерні, наведено на рис. 1. Швидкості обертання високошвидкісного валу вимірювалися за допомогою тахометра та становили відповідно 1451,55, 1442,85 і 1404,75 об/хв для кожної зі стадій руйнування. З рис. 1 видно, що вібраційні сигнали для другої (рис. 1, б) та третьої (рис. 1, в) стадій руйнування містять чіткі удари, спричинені наявністю дефекту, що розвивається, а інтервали часу між ударами близькі до періоду обертання валу.

Обчислимо оцінки спектральних густин стаціонарного наближення сигналів для кожної зі стадій з використанням вікна Хеммінга:

Юзефович Р.М. – <https://orcid.org/0000-0001-5546-453X>, Яворський І.М. – <https://orcid.org/0000-0003-0243-6652>,

Личак О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5559-1969>, Трохим Г.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-2472-1676>

© Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, О.В. Личак, Г.Р. Трохим, М.З. Варивода, П.О. Семенов

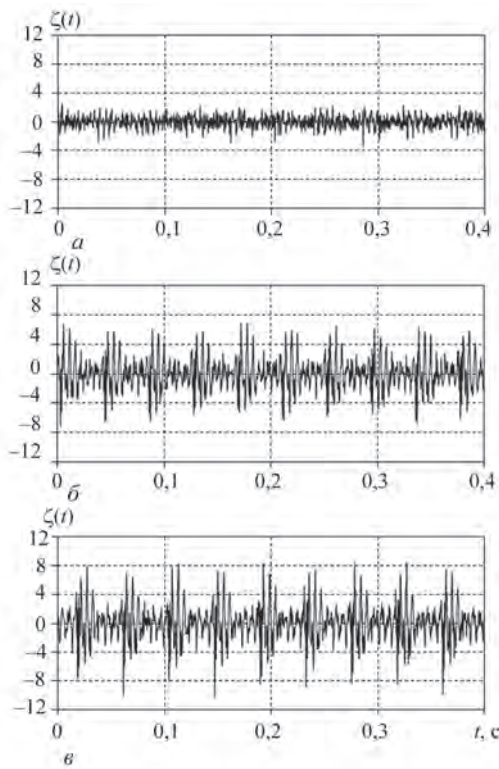


Рис. 1. Фрагменти реалізацій вібраційних сигналів для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

$$k(\tau) = \begin{cases} 0,54 + 0,46 \cos \frac{\pi\tau}{\tau_r}, & |\tau| \leq \tau_r, \\ 0, & |\tau| > \tau_r, \end{cases}$$

де  $\tau_r$  – точка усічення корелограми. З отриманих результатів (рис. 2) випливає, що спектр потужності коливань знаходиться в діапазоні частот 0...10 кГц (рис. 2, а), а основна складова спектру потужності лежить у смузі, обмеженій 3 кГц (рис. 2, б).

Графіки на рис. 2 мають форму гребінки з різними амплітудами та смугами пропускання. Значення оцінки приймає пікові значення в точках, що співпадають за частотою зчеплення та кратним їй частотам, частотою обертання шестерні, кратними їй та їх взаємними комбінаціями. Від-

значимо смуги частот, які відповідають потужним резонансам, тобто  $[f_r; 1,8f_r]$  і  $[2,2f_r; 3f_r]$ , де  $f_r$  – частота зчеплення. Потужності спектральних складових, які відповідають частотам обертання колеса (приблизно 6,4 Гц) і кратними їй, є незначними. Отже можна припустити, що детермінована та стохастична модуляції, викликані коливаннями ПКВП періоду обертання валу, також є незначними, і формально можна проаналізувати поточні дані як реалізації ПКВП.

Проведемо аналіз властивостей сигналу на частотах менше  $1,8f_r$ . Оцінки кореляційної функції та спектральної густини для стаціонарного наближення відфільтрованих сигналів, що відповідають трьом стадіям руйнування зуба шестерні, наведено на рис. 3, 4.

Наявність незаникаючого «хвоста» є характерною рисою оцінок кореляційної функції ПКВП. З формули для кореляційної функції ПКВП стаціонарного наближення [3]:

$$R(\tau) = R_0(\tau) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{L_1} |m_k|^2 \cos k \frac{2\pi}{P} \tau \quad (1)$$

впливає, що незаникаючий «хвіст» містить косинусні коливання з амплітудами, які відповідають потужності кожної детермінованої складової гармоніки. У точці  $\tau = 0$  вираз (1) визначає сумарну потужність детермінованих і стохастичних коливань. У точці  $\tau_r = rP$ , де  $r$  – натуральне число, для якого  $R_0(rP) \approx 0$ , отримуємо значення потужності детермінованих коливань. Для трьох розглянутих стадій деградації зуба шестерні сумарна потужність вібраційного сигналу дорівнює  $0,95G^2$ ,  $5,84G^2$  і  $7,73G^2$ , а потужність детермінованої складової вібраційного сигналу коливань – відповідно  $0,72G^2$ ,  $5,12G^2$  та  $6,73G^2$ . Отже частка потужності стохастичних коливань зменшується із розвитком дефекту. Якщо на початковій стадії розвитку дефекту ця частка приблизно дорівнює 30 %, то для останньої стадії вона дорівнює лише 14 %. Значимо, що незаникаючий «хвіст» кореляцій-

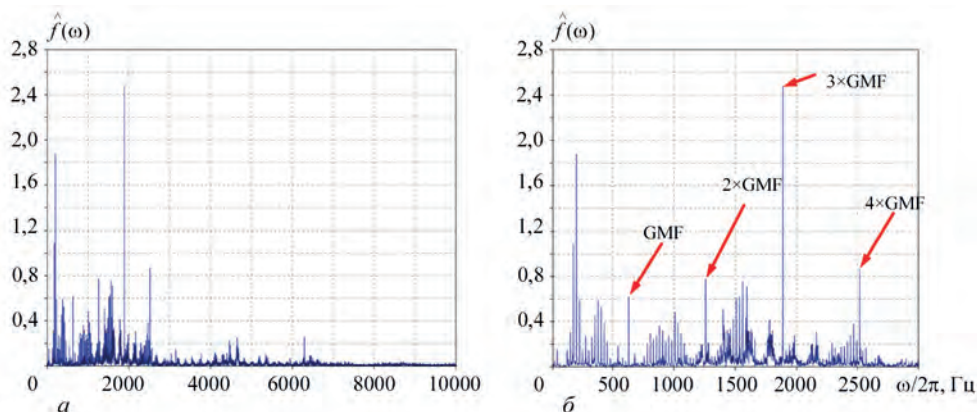


Рис. 2. Оцінка спектральної густини потужності вібраційного сигналу у стаціонарному наближення для першої стадії: а – повний спектр; б – НЧ фрагмент спектру



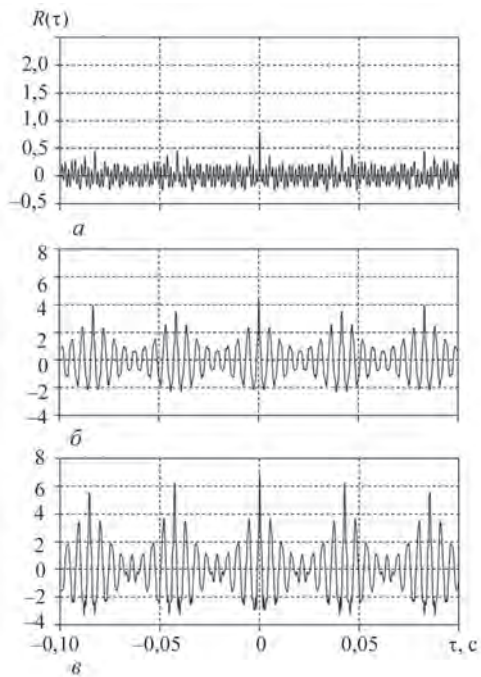


Рис. 3. Оцінки кореляційної функції відфільтрованих сигналів для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

ної функції має групову структуру, інтервал часу між окремими групами близький до періоду обертання валу. Наявність незаникаючого «хвоста» в оцінці кореляційної функції призводить до появи дискретних компонентів в оцінці спектральної густини, які представлено піками на певних частотах (рис. 4). Виявлені піки також можуть бути результатом вузькосмуговості стохастичних компонентів. Отже отримані спектри вібраційного

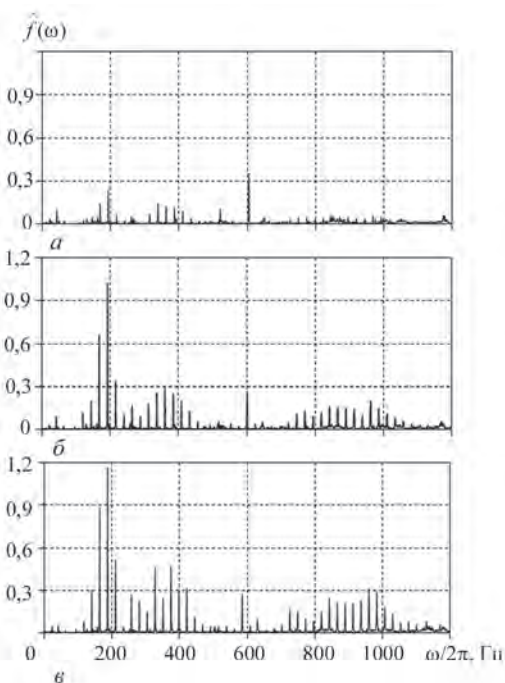


Рис. 4. Оцінки спектральної густини потужності відфільтрованих сигналів для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

сигналу ускладнюють інтерпретацію результатів спектральної оцінки та їх кількісний аналіз. Для дискретної оцінки спектру маємо [3]:

$$\hat{f}_d(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_d(\omega_1) \lambda(\omega - \omega_1) d\omega_1,$$

$$\text{де } f_d(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{L_1} |m_k|^2 f(\omega - k\omega_0) i$$

$$\lambda(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} k(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau.$$

Таким чином:

$$\hat{f}_d(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{L_1} |m_k|^2 \lambda(\omega - k\omega_0).$$

Оскільки  $\lambda(0) \leq \tau_r$ , то пікові значення не дорівнюють потужності окремої гармоніки і змінюються, якщо змінюється значення  $\tau_r$ . Тому необхідно проводити розділення неперервних і дискретних компонентів спектру та їх окремий аналіз за допомогою відповідних методів. Зокрема це важливо для моніторингу механізмів, тому що дискретні та безперервні компоненти можуть бути викликані різними типами дефектів.

Оцінка періоду є початковим етапом виділення та аналізу детермінованої складової коливаний вібрації. Слід звернути увагу, що точність оцінки періоду повинна бути досить високою, щоб досягти мінімального зміщення початкової точки усереднення. Для оцінки періоду застосовано метод найменших квадратів, оскільки в цьому випадку ми можемо враховувати сукупну потужність вибраних гармонік детермінованої складової, що підвищує ефективність оцінки. Відзначимо, що систематична похибка оцінок методу найменших квадратів періоду має порядок  $O(T^2)$ , а середньоквадратичне значення випадкової похибки –  $O\left(T^{\frac{3}{2}}\right)$  [4].

Залежності квадратичного функціонала, обчислені за [3], від пробної частоти для трьох стадій руйнування зубчастої передачі зображено на рис. 5. Точки максимуму функціоналу для кожної з трьох стадій з точністю до трьох знаків після коми відповідають базовій оцінці частоти та дорівнюють  $f_0 = 24,206$  Гц (рис. 5, а),  $f_0 = 24,055$  Гц (рис. 5, б) та  $f_0 = 23,423$  Гц (рис. 5, в) відповідно. Розраховані значення основної частоти детермінованих коливаний близькі до значень, отриманих шляхом вимірювання тахометром, а саме 24,192; 24,047 і 23,412 Гц.

Виходячи з розрахункових значень базової частоти розраховано амплітуди гармонік детермінованої складової вібрації, що представлені на рис. 6.

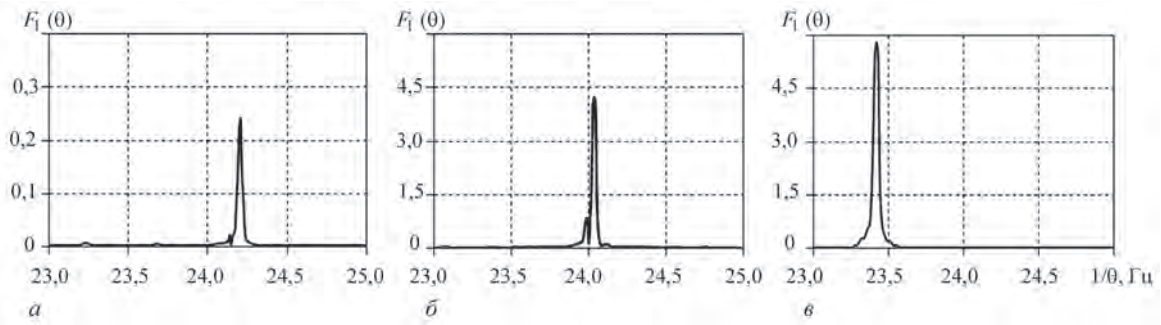


Рис. 5. Залежність квадратичного функціоналу першого порядку від пробної частоти для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

Перші гармоніки спектрів детермінованої складової можна інтерпретувати як порядки гармоніки частоти обертання валу. Двадцять п'ята гармоніка відповідає першій гармоніці частоти зчеплення, а частоти вищих гармонік є лінійними комбінаціями частот зчеплення та частоти обертання. На першій стадії розвитку дефекту амплітуда гармоніки частоти зчеплення є найбільшою. Зі зростанням пошкодження гармоніки 6–9-го порядків стають домінуючими, хоча загальний вигляд амплітудних спектрів залишається подібним. Сума амплітуд гармонік для ступенів розвитку дефекту дорівнює 3,47, 7,44 і 10,50 відповідно, тоді як сумарні потужності гармонік дорівнюють 0,36, 3,52 і 4,63. Обчислені відповідно до [3] значення індикатора  $I_1$  змінюється з 2,14 до 3,03, а індикатора  $I_2$  – з 9,87 до 12,8. На основі синусних та косинусних коефіцієнтів Фур'є [1] можна розрахувати оцінку математичного сподівання ПКВП для всіх моментів часу  $t \in [0, \hat{P}_1]$  (рис. 7).

Виходячи з [1, 17] і враховуючи розраховані значення кореляційної функції, можна зробити висновок, що для заданої довжини реалізації стандартне відхилення  $\sigma[\hat{m}(t)]$  оцінки математичного сподівання менше ніж 0,01. Детерміновані коливання мають групову структуру, а інтервали часу між групами близькі до періоду обертання валу і кожна група складається приблизно з восьми коливань.

Подальший аналіз стану редуктора проводився на основі центрованих вібраційних сигналів, отриманих шляхом віднімання від сигналу оцінки математичного сподівання ПКВП, тобто  $\xi(t) = \xi(t) - \hat{m}(t)$ . Оцінки кореляційної функції центрованих сигналів (рис. 8) мають форму повільно зникаючих груп, які слідують одна за одною з періодом обертання. Ці групи стають чітко помітними для другої (рис. 8, б) і третьої (рис. 8, в) стадій розвитку дефекту. У міру зростання значення зсуву  $\tau$  значення оцінки зменшується до флуктуацій малої потужності, отже детерміновані коливання повністю виділені з вібраційного сигналу.

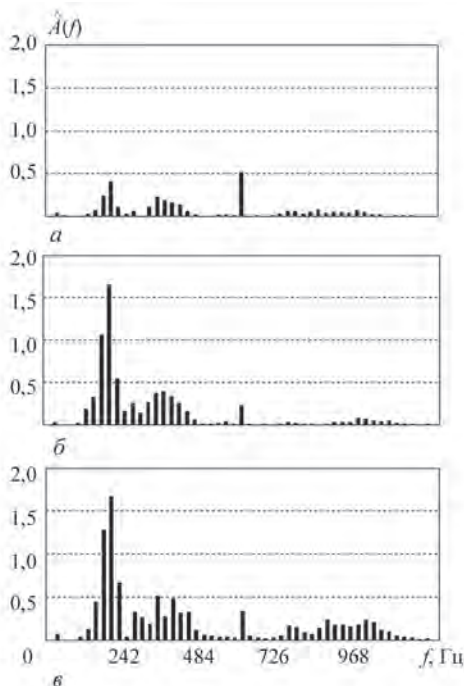


Рис. 6. Амплітудні спектри детермінованої складової коливань для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

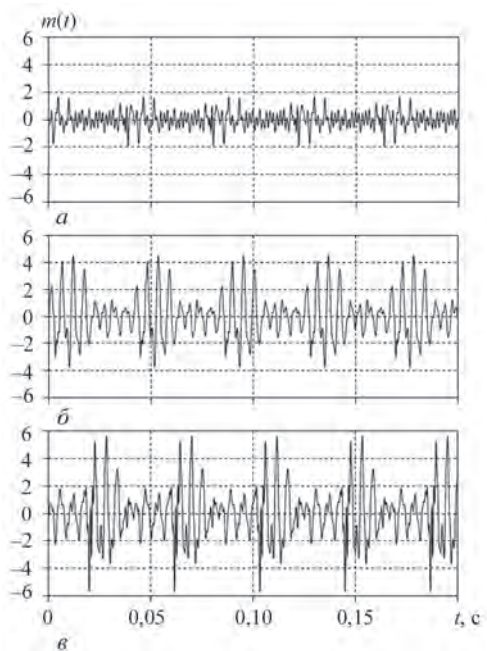


Рис. 7. Оцінки математичного сподівання вібраційного сигналу для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

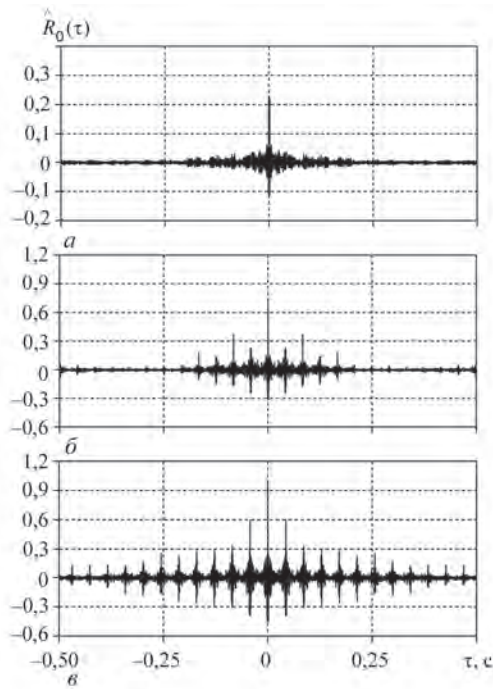


Рис. 8. Оцінки кореляційної функції стохастичної складової вібрації для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

Спектральні густини стохастичної складової вібраційних сигналів містять лише неперервну компоненту сигналу (рис. 9, 10). Гребінчаста форма оцінок спектральних густин вказує на вузькосмугову модуляцію несучих гармонік ПКВП низько- та високочастотного діапазону. Це означає, що модулюючі процеси можна представити у вигляді суми низькочастотної та високочастотної вузькосмугових складових, які можна моделювати

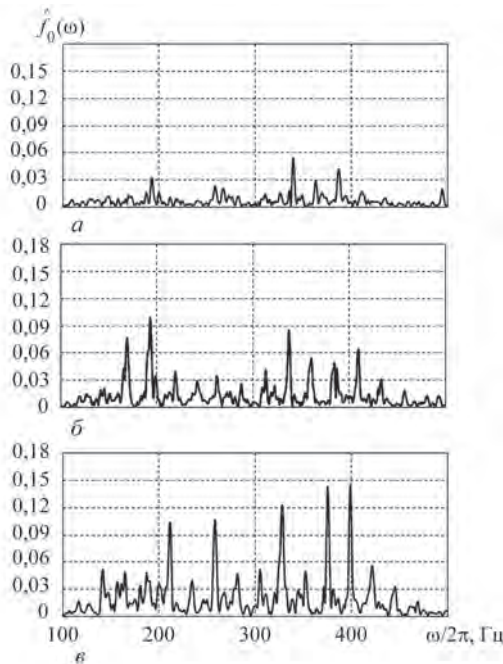


Рис. 9. Оцінки спектральних густин стохастичних складових вібрації в області низьких частот для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

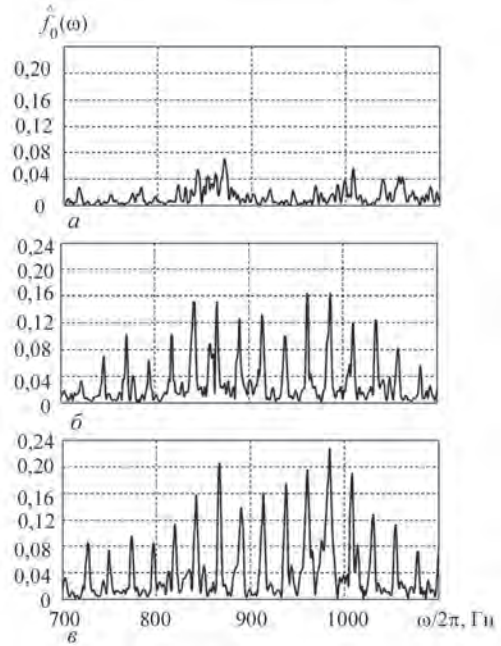


Рис. 10. Оцінки спектральних густин стохастичних складових вібрації у високочастотній області для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

за допомогою представлення Райса [5]. Висновки про кореляції або відсутність кореляцій між цими компонентами в межах низько- та високочастотних областей можна зробити лише на основі результатів ПКВП-аналізу.

Залежності функціонала МНК [3] від пробної частоти для кожної стадії руйнування зуба шестерні містить чітко визначений пік (рис. 11) у точці, яка розглядається як оцінка періоду дисперсії

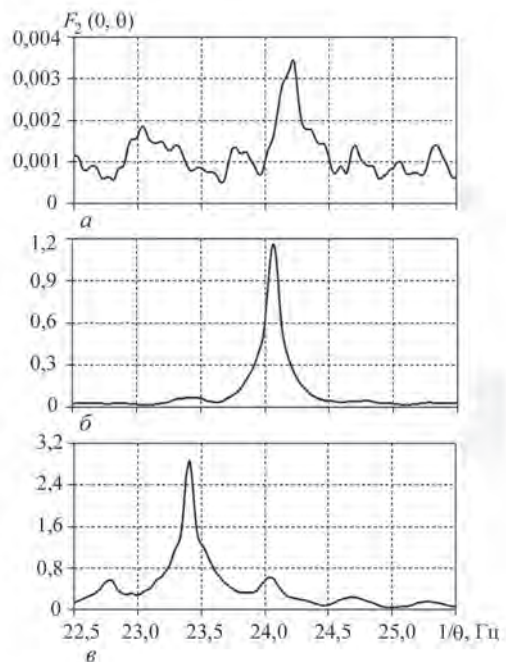


Рис. 11. Залежності квадратичного функціонала другого порядку від пробного періоду для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні



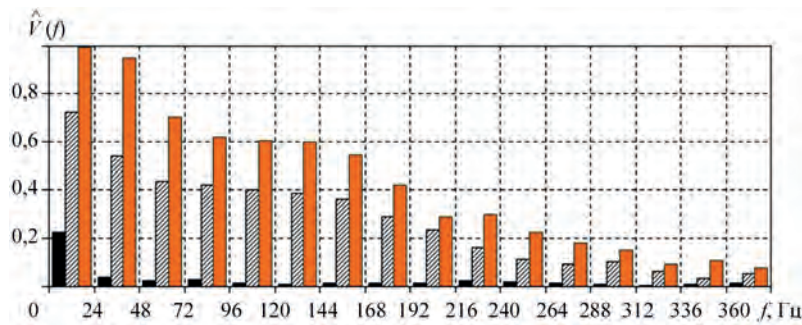


Рис. 12. Амплітудний спектр періодичних змін дисперсії для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

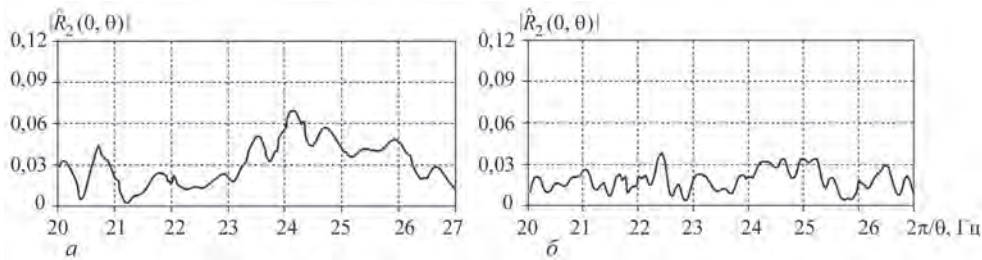


Рис. 13. Дисперсія компонентів першого (а) і другого (б) функціоналу для першої стадії розвитку дефекту

або основної частоти. Оцінені значення основної частоти  $f_0$  дорівнюють: 24,196, 24,075 і 23,423 Гц.

Ці значення також несуттєво відрізняються від основних частотних оцінок математичного сподівання вібросигналів. Чітко визначений пік на графіку на рис. 11, а відповідає ранній стадії виникнення дефекту. Враховуючи потужності піків на рис. 11, б, в, робимо висновок про наявність розвинутого дефекту. Знаючи значення  $f_0$ , розраховано амплітудний спектр зміни дисперсії в часі (рис. 12).

На рис. 13 представлено графіки статистик:

$$|\hat{R}_k(0, \theta)| = \left[ [R_k^c(0, \theta)]^2 + [R_k^s(0, \theta)]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Як бачимо з рис. 13, на графіках відсутні домінуючі екстремуми, з чого важко зробити будь-які висновки щодо розвитку дефекту.

Амплітудні спектри дисперсії  $\hat{V}(kf_0)$  (рис. 12) повільно спадають зі зростанням частоти, що особливо характерно для двох останніх стадій розвитку дефекту. Спектральні складові, рознесені по частоті більше ніж на 280 Гц, є слабокорельованими. Отже, низькочастотна і високочастотна модуляції є некорельованими. Для врахування цієї особливості формуємо індикатор:

$$I_4 = \frac{\Delta \hat{R}_0(0) + \sum_{k=1}^{L_2} \hat{V}(kf_0)}{\hat{R}_0^{(i)}(0)}, \quad (2)$$

де  $\Delta \hat{R}_0(0) = \hat{R}_0^c(0) - \hat{R}_0^{(i)}(0)$ . Індикатор  $I_4$  має наступні значення: 1,29, 13,82 і 30,72 відповідно для кожної зі стадій розвитку дефекту. Суттєве збільшення індикатора  $I_4$  свідчить про його високу чутливість до зміни стану зубчастої пари.

Зазначимо, що використані в роботі індикатори відрізняються від індикаторів циклостационарності. Стан зубчастої передачі описується відношенням потужності зміни в часі математичного сподівання або дисперсії до початкових значень цих величин, але не до усередненої за часом дисперсії для кожного стану. Остання істотно змінюється в міру розвитку дефекту. Саме тому доцільно враховувати ці зміни, як це було показано вище.

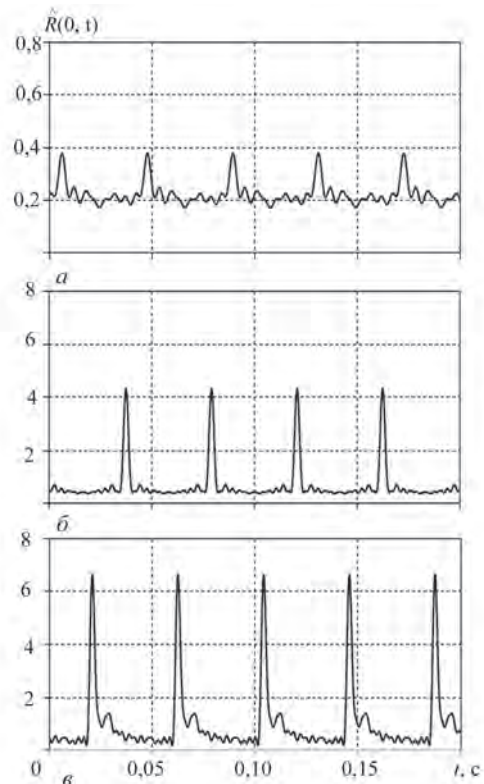


Рис. 14. Оцінки функцій дисперсії стохастичних складових коливань для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

Графіки зміни дисперсії в часі наведено на рис. 14. На інтервалі часу, що дорівнює періоду нестационарності, ці зміни містять значний викид, спричинений дефектом зубчастої передачі. Ці викиди є особливо сильними для двох останніх стадій, коли дефект зуба добре розвинений і близький до поломки.

Поломку зуба шестерні було підтверджено після проведення чергової перевірки редуктора групою обслуговуючого персоналу (рис. 15). Відносно стандартне відхилення оцінки кореляційної функції  $\sigma_r[\hat{R}(t,0)]$ , обчислене за [1, 4], для заданої довжини реалізації, менше за 0,04.

Специфічні особливості пошкодження також можна встановити на основі аналізу кореляційних функцій стохастичної складової вібраційного сигналу (рис. 16).

У цьому випадку кореляційні коливання є суперпозицією зникаючих хвиль з близькими частотами  $\mu_0 \pm k\omega_0$ , де  $\mu_0$  – резонансна частота зубчастої пари.

Методи ПКВП аналізу вібрацій, запропоновані в [1, 4] для раннього виявлення дефектів, відрізняються від методів так званого циклостационарного аналізу, які традиційно використовуються в літературі [5–10].

Циклостационарний аналіз включає розрахунок циклічної автокореляційної функції залежно від часу та зсуву та її двовимірне перетворення Фур'є, пошук корельованих гармонік, розрахунок функцій когерентності та їх інтегрування, визначення так званої інформативної смуги частот та різні розвинуті процедури кінцевого розгляду тощо [11–18].



Рис. 15. Фото зуба ведучої шестерні редуктора

**Стадії розвитку дефекту**

Індикатор	Стадія				
	Початкова	Мала	Середня	Висока	Небезпечна
$I_2$	$I_2 < 0,5$	$0,5 \leq I_2 < 2,0$	$2,0 \leq I_2 < 4,0$	$4,0 \leq I_2 < 10,0$	$I_2 \geq 10,0$
$I_4$	$I_4 < 2,0$	$2,0 \leq I_4 < 10,0$	$10,0 \leq I_4 < 20,0$	$20,0 \leq I_4 < 25,0$	$I_4 \geq 25,0$

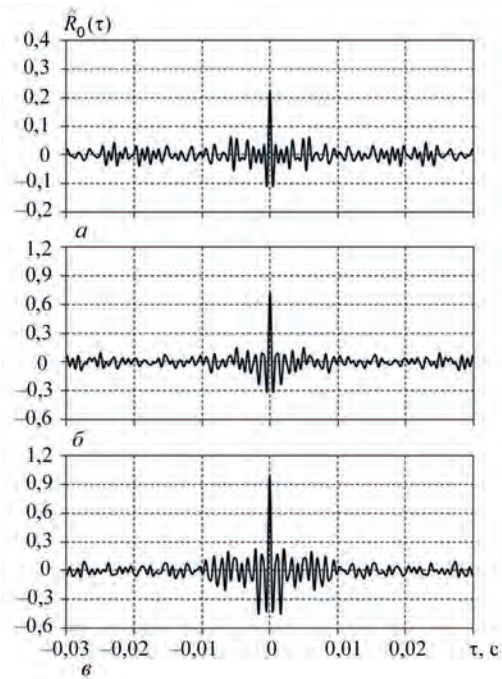


Рис. 16. Залежності кореляційних функцій стохастичної складової вібраційного сигналу для трьох стадій розвитку дефекту зуба шестерні

ПКВП аналіз проводиться в частотно-часовій області без переходу в двочастотну область. Часова структура вібраційного сигналу досліджувалася на основі розкладання моментних функцій першого та другого порядку в ряди Фур'є. Амплітудні спектри детермінованої складової вібрацій та часових змін потужності для стохастичної частини використовуються для опису стану машин. Аналіз у стаціонарному наближенні проводиться для з'ясування загальних властивостей спектрального складу коливань та визначення частотного інтервалу для виявлення прихованих періодичностей.

Ефективні методи виявлення прихованих періодичностей першого та другого порядку, розроблені в [1, 4], забезпечують визначення періоду детермінованих коливань та періоду часових змін моментних функцій другого порядку для кожної окремої реалізації з необхідною точністю. Це дає змогу отримати оцінки відповідних амплітудних спектрів, які можуть бути використані як базис для оцінки технічного стану машини. Амплітудний спектр дисперсії визначається модулем кореляційних компонентів (циклічних функцій) у точці зі зсувом  $\tau = 0$ :

$$|R_k(0)| = \int_{-\infty}^{\infty} f_k(\omega) d\omega \quad k = \overline{1, L_2}$$

Амплітуда окремих гармонік порядку  $k$  є сумарною характеристикою кореляцій спектральних гармонік, частоти яких зміщені на  $k\omega_0$ . Підсумовуючи амплітуди всіх порядків, отримуємо сумарну характеристику для всіх можливих кореляцій спектральних гармонік стохастичної складової коливань, хоча цей аналіз виконується лише в циклічній частотній області в рамках гармонійного аналізу рядів Фур'є.

Усереднена за часом потужність стохастичних коливань, яка визначається  $R_0(0)$ , зростає із розвитком дефекту, що обумовлює включення значення приросту  $\Delta R_0(0)$  у (2) для індикатора виявлення дефектів. Таким чином, можна очікувати, що індикатор  $I_4$ , сформований на основі всіх коефіцієнтів Фур'є дисперсії, буде максимально чутливим до змін стану зубчастой пари.

Часові зміни дисперсії в загальному випадку не локалізовані в частотній області. Максимальна різниця частот між корельованими гармоніками визначається найбільшим номером гармоніки дисперсії.

Слід зазначити, що дисперсія циклічної статистики, яка використовується в аналізі «квадрату обвідної» [12, 14, 19, 20], має порядок  $O(T^1)$ , тоді як дисперсія оцінки базової частини має порядок  $O(T^3)$ , а МНК оцінка забезпечує істотно більше відношення сигнал/шум. Оскільки амплітуда кожної окремої гармоніки дисперсії  $|R_k(0)|$  завжди менша ніж  $R_0(0)$ , тобто  $|R_k(0)| \leq R_0(0), \forall k = 1, L_2$ , то МНК оцінка має очевидну перевагу при пошуку прихованих періодичностей.

Для відомої базової частоти циклічну (компонентну) оцінку можна вважати фільтрацією сигналу з передаточною функцією у вигляді гребінки, що досягає піків у точках  $f = kf_0, \forall k = 1, L_2$ . Ці піки стають гострішими (вужчими) зі збільшенням довжини реалізації. Такий підхід дозволяє підвищити точність обробки та уникнути трудомістких процедур, які зазвичай використовуються для вдосконалення традиційних методів на основі дискретного перетворення Фур'є [10, 11]. Амплітудний спектр детермінованої складової коливань і, насамперед, амплітудний спектр часових змін потужності стохастичної складової коливань характеризує особливості дефекту. Сформовані на основі цих спектрів індикатори можуть бути ефективно використані для аналізу стану машин та механізмів. Виходячи з чисельних результатів обробки часових рядів сигналів вібрації редуктора ВЕУ, можна виділити стадії розвитку дефекту (таблиця).

Слід зазначити, що аварійна стадія розвитку дефекту характеризується швидким зростанням обох показників. Рекомендуємо застосовувати обидва ці показники на практиці. Зазначимо, що

числові значення показників отримано на основі аналізу сигналу в діапазоні частот до 1 кГц.

## Висновки

Показано, що параметри першого та другого порядку ПКВП вібрації у смузі частот  $[0; 1,8f_r]$  є достатньо чутливими до зміни стану механізму та повною мірою забезпечують успішне виявлення дефектів і моніторингу їх розвитку.

Для виявлення прихованих періодичностей другого порядку використовувався МНК функціонал. Його залежності від пробного періоду мають різкі піки в точках, які прийняті за періоди часових змін дисперсії. Наявність таких піків зростання свідчить про те, що зародилося і розвивається локальне пошкодження. Для порівняння різних стадій розвитку дефекту було обрано сумарну амплітуду гармонік дисперсії. При цьому значення амплітуд для гармонік, порядок яких більше дванадцяти, були несуттєвими. Це означає, що спектральні компоненти, частотні інтервали між якими більші за 280 Гц, є слабкорельованими, а тому низькочастотна і високочастотна модуляції є некорельованими.

За відсутності дефекту дисперсія не містить часових змін, тому для кількісної характеристики зміни стану механізму доцільно вибрати початкове значення нульової кореляційної компоненти  $R_0(0)$ , що визначає середню потужність стохастичної складової вібраційних коливань. Середня потужність зростає в процесі розвитку дефекту, тому це зростання було враховане у формулі для стохастичного індикатора стану механізму. Показано, що зміна цього індикатора значно перевищує зміну «детерміністичного» індикатора, який визначається потужністю детермінованих складових коливань, при цьому потужність останніх значно перевищує потужність стохастичних складових. Отримані результати дають підстави рекомендувати запропонований стохастичний індикатор для моніторингу редуктора ВЕУ.

## Список літератури/References

1. Яворський І. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів.  
Javorskyj, I.M. (2013) *Mathematical models and analysis of stochastic oscillations*. PMI, Lviv [in Ukrainian].
2. Jaworskyj, I., Matsko, I., Yuzefovych, R., Zakrzewski, Z. (2016) Coherence function of interrelated Periodically Nonstationary Random Processes. *Radioelectronics and Communication Systems*, **59**(3), 128–140. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0735272716030043>
3. Яворський І., Юзефович Р., Личак О. та ін. (2022) Застосування методів біперіодично корельованих випадкових процесів для дослідження вібраційних сигналів зубчастих передач. Частина 1. Теоретичні аспекти. *Технічна ді-*



- агностика та неруйнівний контроль*, 4, 4–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.01>
- Javorskyj, I.M., Yuzefovych, R.M., Lychak, O.V. et al. (2022) Diagnostics of gear pair damage using the methods of bi-periodically correlated random processes. Part 1. Theoretical aspects of the problem. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 4, 4–11 [in Ukrainian].
4. Javorskyj, I., Kravets, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. (2017) Periodically correlated random processes: application in early diagnostics of mechanical systems. *Mech. Syst. Signal Process.*, 83, 406–438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.022>
  5. Antoni, J., Bonnardot, F., Raad, A., El Badaoui, M. (2004) Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. *Mech. Syst. Signal Process.*, 18(6), 1285–1314. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00088-8)
  6. Antoni, J. (2009) Cyclostationarity by examples. *Mech. Syst. Signal Process.*, 23(4), 987–1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2008.10.010>
  7. Randall, R.B., Antoni, J. (2011) Rolling element bearing diagnostics – A tutorial. *Mech. Syst. Signal Process.*, 25(2), 485–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.07.017>
  8. Randall, R.B., Antoni, J., Chobsaard, S. (2001) The relationship between spectral correlation and envelope analysis. *Mech. Syst. Signal Process.*, 15(5), 945–962. DOI: <https://doi.org/10.1016/mssp.2001.1415>
  9. Antoni, J. (2007) Cyclic spectral analysis in practice. *Mech. Syst. Signal Process.*, 21(2), 597–630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2006.08.007>
  10. Abboud, D., El Badaoui, M., Smith, W., Randall, B. (2019) Advanced bearing diagnostics: A comparative study of two powerful approaches. *Mech. Syst. Signal Process.*, 114, 604–627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.011>
  11. Wang, D., Zhao, X., Kou, L.-L. et al. (2019) A simple and fast guideline for generating enhanced/squared envelope spectra from spectral coherence for bearing fault diagnosis. *Mech. Syst. Signal Process.*, 122, 754–768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.12.055>
  12. Patel, V.N., Tandon, N., Pandey, R.K. (2012) Defect detection in deep groove ball bearing in presence of external vibration using envelope analysis and Duffing oscillator. *Measurement*, 45(5), 960–970. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.047>
  13. Borghesani, P., Pennacchi, P., Randall, R.B. et al. (2013) Application of cepstrum pre-whitening for the diagnosis of bearing faults under variable speed conditions. *Mech. Syst. Signal Process.*, 36(2), 370–384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.11.001>
  14. Betea, B., Dobra, P., Gherman, M.-C., Tomesc, L. (2013) Comparison between envelope detection methods for bearing defects diagnose. *IFAC Proc.*, 46(6), 137–142. DOI: <https://doi.org/10.3182/20130522-3-RO-4035.00010>
  15. Antoni, J. (2006) The spectral kurtosis: a useful tool for characterizing non-stationary signals. *Mech. Syst. Signal Process.*, 20(2), 282–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.09.001>
  16. Antoni, J., Randall, R.B. (2006) The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mech. Syst. Signal Process.*, 20(2), 308–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.09.002>
  17. Wang, D., Tse, P.W., Tsui, K.L. (2013) An enhanced Kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings. *Mech. Syst. Signal Process.*, 35(1–2), 176–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.10.003>
  18. Sawalhi, N., Randall, R.B., Endo, H. (2007) The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearings using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis. *Mech. Syst. Signal Process.*, 31(6), 2616–2633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2006.12.002>
  19. Borghesani, P., Pennacchi, P., Ricci, R., Chatterton, S. (2013) Testing second order cyclostationarity in the squared envelope spectrum of non-white vibration signals. *Mech. Syst. Signal Process.*, 40(1), 38–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.05.012>
  20. Courrech, J., Gaudel, M. (1987) *Envelope analysis the key to rolling-element bearing diagnosis*. Brüel & Kjær, Denmark.

## DIAGNOSTICS OF GEAR PAIR DAMAGE USING THE METHODS OF BIPERIODICALLY CORRELATED RANDOM PROCESSES.

### Part 2. Investigation of vibration signals of the wind power generator gearbox

R.M. Yuzefovych<sup>1,2</sup>, I.M. Javorskyj<sup>1,3</sup>, O.V. Lychak<sup>1</sup>, G.R. Trokhym<sup>1</sup>, M.Z. Varyvoda<sup>1</sup>, P.O. Semenov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

<sup>2</sup>Bydgoszcz University of Sciences and Technology. 7, Prof. S. Kaliskiego al., 85796, Bydgoszcz, Poland.

<sup>3</sup>Lviv Polytechnic National University. 12 S. Bandery str., 79000, Lviv, Ukraine.

<sup>4</sup>Odesa National Maritime University. 34 I. Mechnikova str., 65029, Odesa, Ukraine.

The results of processing the vibration signals of the wind power generator gearbox are given. The model of vibration in the form of bi-periodically correlated random processes (BPCRP), which describes its stochastic repeatability with two different periods, is considered. Least squares (LS) estimates of the periods of the deterministic part of the vibration signal and the temporal changes of power of its stochastic part were obtained. The amplitude spectra of deterministic oscillations and dispersion of stochastic oscillations for different degrees of gearbox damage were analyzed. The most effective indicators of defect development, which are formed on the basis of amplitude spectra, are proposed for practical use. The correlation structure of the stochastic vibration component of the wind turbine gearbox was analyzed. 20 Ref., 1 Tabl., 16 Fig.

*Keywords: wind power generator gearbox, vibration, periodical non-stationarity, deterministic oscillations, correlation function, defect development indicator*

Надійшла до редакції 01.02.2023

# ЧИСЕЛЬНА ОЦІНКА КРИХКОЇ МІЦНОСТІ МОНТАЖНИХ ЗВАРНИХ ШВІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ

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

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

У рамках аналізу можливості використання української газотранспортної системи для транспортування сумішей природного газу та водню розглянуто особливості впливу водневої деградації трубної сталі на крихку міцність кільцевих монтажних зварних з'єднань. Для цього використано методи скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану конструкцій при зварюванні та подальшій експлуатації разом із сучасними критеріями макроскопічного руйнування тіла з тріщиною. Результати прогнозування коефіцієнтів запасу крихкої міцності типової зварної ділянки магістрального газопроводу з постульованими поверхневими тріщинами при транспортуванні газоводневих сумішей різного складу показали, що найбільш схильними до крихкого руйнування є ділянки шва та зони термічного впливу. Але стосовно втомної міцності зварних з'єднань під дією циклічного навантаження внутрішнім тиском чи моментом згину, більші розмахи значень коефіцієнта інтенсивності напружень у зоні термічного впливу зумовлюють суттєвіше зменшення залишкових коефіцієнтів запасу при прогнозуванні довготривалої крихкої міцності. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 7.

*Ключові слова:* газоводнева суміш, магістральний газопровід, воднева деградація, технічний стан, крихка міцність, циклічне навантаження

**Вступ.** Практична перспектива використання української газотранспортної системи для транспортування сумішей вичерпаного природного газу та зеленого водню вимагає відповідного обґрунтування безпеки експлуатації газогонів. Окрім контролю можливих витоків і накопичення газоподібного водню, при аналізі технічного стану газогонів необхідно враховувати різні аспекти водневої деградації трубної сталі. При цьому одним з найуразливіших місць є монтажні кільцеві зварні з'єднання з відповідними залишковими полями напружень і деформацій, викликаними монтажним зварюванням у польових умовах. Це зумовлює більшу схильність до появи різного роду дефектів несучільності металу (непроварів, пітингової корозії, стрес-корозійного розтріскування тощо) та підвищення ризиків зародження неприпустимої пошкодженості конструкції в результаті дії статичного або циклічного експлуатаційного навантаження.

Як показав аналіз фахових літературних джерел [1–4], проблема водневої деградації трубних сталей є достатньо широко висвітленою, проте переважну більшість робіт присвячено розв'язанню матеріалознавчих задач виявлення особливостей взаємодії дифузійного водню з металом у певному стані, у тому числі після зварювання. Кінцевою метою подібних досліджень є визначення закономірностей деградації механічних властивостей типових матеріалів у результаті довготривалої експлуатації в середовищі водню. Але актуальним залишається комплекс задач аналізу впливу водневої деградації матеріалу на знижен-

ня несучої здатності та загальне погіршення технічного стану конкретного газопроводу за проектних умов експлуатації. Зокрема відомо, що одним з негативних ефектів підвищеної концентрації дифузійного водню в типових трубних сталях різного класу міцності є зниження їх крихкої міцності та опірності втомному руйнуванню [5]. Аналогічний негативний вплив має монтажне чи ремонтне зварювання, яке зумовлює формування залишкових розтягувальних напружень в області металу шва та зони термічного впливу (ЗТВ), чим сприяє зародженню та розповсюдженню тріщин. Проте розв'язання комплексної задачі аналізу надійності зварних з'єднань трубопровідних систем при транспортуванні ними газоводневих сумішей (ГВС) висвітлені недостатньо повно.

У цій роботі розглянуто питання чисельного аналізу крихкої міцності монтажних зварних швів магістральних газопроводів (МГ) при транспортуванні ГВС з метою визначення особливостей впливу водневої деградації металу труб на їх надійність та працездатність.

**Методологія дослідження.** Поєднання технологічного фактору впливу зварювання та деградації опірності матеріалу МГ у результаті надлишкового наводнення ускладнює аналіз несучої здатності трубопроводу в області кільцевого монтажного шва. Тому раціональним є використання методів математичного моделювання та комп'ютерної симуляції процесів зварювання з відповідним чисельним аналізом схильності зварної конструкції до руйнування, що дозволяє врахувати різні аспекти

О.С. Міленін – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак, 2022

зовнішнього експлуатаційного впливу на властивості та граничний стан конструкції. Основою оцінки крихкої міцності зварних з'єднань був принцип «віртуальних» дефектів, тобто за допомогою загальних правил механіки руйнування тіл з тріщинами проводився розрахунок граничного стану зварного з'єднання з постульованою тріщиною. Ідея цього розрахунку полягає в тому, що в процесі дефектоскопії зварних з'єднань невеликі тріщиноподібні дефекти (найнебезпечнішими з яких є поверхневі, рис. 1) можуть бути пропущені або вони можуть сформуватися на перших етапах експлуатації конструкції. Використання такого підходу дозволяє врахувати вплив зварювального процесу на залишковий напружено-деформований стан (НДС) в області нероз'єднаного з'єднання, а також взаємодію післязварювальних та експлуатаційних напружень на надійність зварної конструкції.

Для прогнозування поточного та залишкового НДС у перерізі зварної ділянки МГ використовувався скінченно-елементний аналіз кінетики нестационарного температурного поля в області дії джерела зварювального нагрівання та відповідного розподілу напружень і деформацій металу труби. Так, розподіл температур визначався розв'язанням рівняння теплопровідності із залежними від температури теплофізичними характеристиками матеріалу [6]. Розрахунок кінетики НДС конструкції було реалізовано шляхом послідовного простеження пружно-пластичних деформацій від початку зварювання аж до повного охолодження конструкції та подальшого експлуатаційного навантаження в рамках крайової задачі нестационарної термопластичності [7]. Так, компоненти тензора деформацій  $\epsilon_{ij}$  та напружень  $\sigma_{ij}$  співвідносяться між собою відповідно до узагальненого закону Гука та асоційованого закону пластичної течії [8]:

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

де  $i, j = r, \beta, z$  в циліндричній системі координат;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $K = (1-2\nu)/E$  – модуль об'ємного стиску;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коефіцієнт Пуасона;  $G = 0,5E/(1+\nu)$  – модуль зсуву;  $\epsilon_T$  – температурна деформація, символ «\*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простеження;  $\Psi$  – функція стану матеріалу, яка визначає умову пластичної течії:

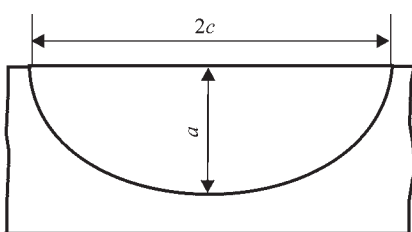


Рис. 1. Схема поверхневої напівеліптичної тріщини

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

стан  $\sigma_i > \sigma_T$  неприпустимий.

де  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень;  $\sigma_T$  – границя текучості.

Визначення функції  $\Psi$  здійснювалось ітеруванням на кожному кроці чисельного простеження за часом або збільшення зовнішнього силового навантаження в рамках розв'язання крайової задачі нестационарної термопластичності [8].

Реалізація методу «віртуальних» дефектів для оцінки крихкої міцності зварних з'єднань МГ з різним ступенем водневої деградації металу полягає в постулюванні тріщини певного розміру та орієнтації в кожному з вузлів скінченно-елементного розбиття поверхні труби, у рамках якого визначався сумарний НДС, зумовлений зварюванням та експлуатаційним навантаженням. Для кожного випадку «віртуального» дефекту проводився розрахунок залишкового коефіцієнта запасу крихкої міцності  $n$  на основі відповідного критерію граничного стану тіла з тріщиною. Одним з найпоширеніших критеріїв є процедура R6 [9], яка базується на двопараметричній діаграмі крихко-в'язкого руйнування тіла з тріщиною (рис. 2) і має наступне математичне описання:

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

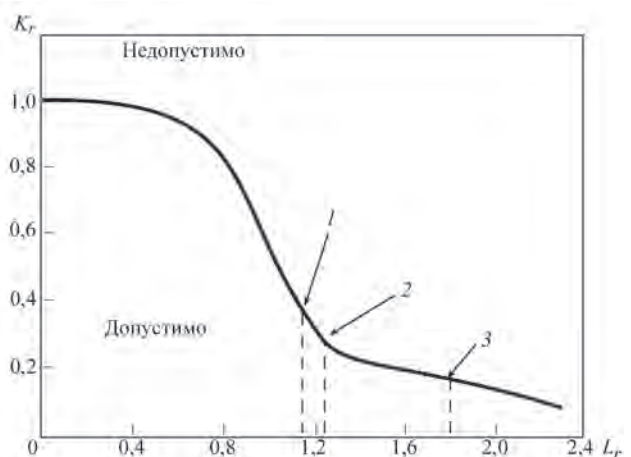


Рис. 2. Двопараметрична діаграма оцінки схильності до крихко-в'язкого руйнування конструкції з тріщиноподібним дефектом [9] 1 – 1,15 (типові низьколеговані сталі та зварні з'єднання); 2 – 1,25 (типові низьковуглецеві сталі та аустенітні зварні з'єднання); 3 – 1,8 (типові аустенітні сталі)



де  $K_r = K/K_{lc}$ ,  $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_T$ ;  $K_I$  – коефіцієнт інтенсивності напружень;  $K_{lc}$  – в’язкість руйнування;  $\sigma_{ref}$  – реферативні напруження.

Розрахунок  $K_p$ ,  $\sigma_{ref}$ , що фігурують у (3), проводиться відповідно до алгоритмів, наведених зокрема в [10].

Аналіз розподілу коефіцієнтів запасу міцності у перерізі конструкції дозволяє оцінити крихку міцність зварного з’єднання залежно від параметрів зварювального процесу, умов зовнішнього силового впливу та водневої деградації матеріалу. Одним з ключових аспектів коректної реалізації даного алгоритму є вибір розміру постульованого дефекту. З одного боку, лінійні розміри тріщини не повинні перевищувати роздільної здатності інструментальних засобів дефектоскопії, з іншого боку, бути досить великими для виявлення схильності зварної конструкції до крихкого руйнування. У якості консервативного підходу можна використати або нормативні вимоги щодо розміру постульованого дефекту, або співвіднести залишковий запас міцності трубопроводу з тріщиною з проектними вимогами [11].

При оцінці працездатності зварного елемента МГ окрім водневої деградації властивостей матеріалу необхідно враховувати можливість втомного руйнування в результаті дії циклічного навантаження. Цей вид руйнування можна розглядати як з точки зору класичних підходів аналізу довготривалої міцності зварних конструкцій з використанням  $S-N$ -діаграм [12], так і на основі оцінки допустимості постульованих тріщин за алгоритмами, наведеними вище. При цьому додатково необхідно враховувати втомне зростання розмірів дефектів за певний період експлуатації. Швидкість зростання втомної тріщини (збільшення її лінійних розмірів) у залежності від кількості циклів навантаження  $N$  з асиметрією циклу  $R$ , розраховується згідно з законом Паріса [13]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot \Delta K^m}{(1-R) - \frac{\Delta K}{K_{lc}}}, \quad (4)$$

де  $C$ ,  $m$  – коефіцієнти Паріса;  $\Delta K$  – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень.

**Практичний приклад.** Особливості впливу водню в складі транспортованої трубопроводом суміші на міцність монтажних зварних з’єднань

**Вплив водню в атмосфері на властивості гладких зразків з трубоної сталі при випробовуваннях на розтяг і швидкість зростання втомної тріщини [14]**

Концентрація водню, об. %	Границя міцності, МПа	Границя текучості, МПа	$C \cdot 10^8$	$m$
0	656,39	523,90	2,25	2,592
5	666,00	518,56	25,7	2,582
10	657,81	525,52	29,8	2,580
20	656,06	524,83	35,1	2,574
50	661,54	523,67	99,3	2,389

було досліджено на характерному прикладі прямолінійної ділянки МГ діаметром  $D = 1420$  мм і товщиною стінки  $t = 20$  мм, матеріал труби – труба сталь 17Г1С. У якості зовнішнього навантаження розглядався внутрішній тиск транспортованої ГВС (максимальне значення  $P = 7,5$  МПа) та додатково момент згину в площині вісі труби  $M$  як для випадку статичного навантаження, так і при циклічному до 10000 циклів. У якості максимального значення величини моменту згину було обрано  $8,4 \cdot 10^9$  Н·мм, що відповідає значенням додаткових аксіальних напружень, зіставних з тими, що зумовлені максимальним внутрішнім тиском. У загальному випадку момент згину подібного типу може бути зумовлений різними факторами в залежності від типу та умов експлуатації конкретної ділянки трубопроводу. Так, для ділянок повітряних переходів через штучні чи природні перешкоди додатковий згин типово формується за вітрових навантажень чи при проходженні снарядів внутрішньотрубної діагностики (особливо за резонансного збільшення амплітуди коливань). Для підводних ділянок МГ подібний додатковий силовий вплив може з’являтися при порушенні цілісності розподіленого баластування та циклічної дії підводних течій.

У загальному випадку механічні властивості металу трубопроводного елемента, що розглядається, залежать від концентрації водню  $v_H$  в транспортованій ГВС і відповідного ступеня водневої деградації. Згідно з наявними даними [14] найбільший негативний вплив водню на трубні сталі спостерігаються на характеристики опору втомному руйнуванню, що кількісно описується змінами коефіцієнтів Паріса  $C$  і  $m$  (див. табл.). При цьому за вказаних концентрацій водню в ГВС до 50 % суттєвого зниження в’язкості руйнування  $K_{lc}$  не спостерігається [15]. Аналогічно приймалося, що для низьколегованих трубних сталей превалюючим фактором, що впливає на опірність розвитку втомних тріщин в області металу шва та ЗТВ, є значні залишкові напруження (що досягають границі текучості металу) та високі  $\Delta K$ , тоді як неоднорідність коефіцієнтів Паріса в перерізі зварної конструкції не є суттєвою.

Як зазначалося вище, важливим параметром при розрахунку крихкої міцності зварного елемента МГ є величина постульованої поверхневої трі-

щини  $2c \times a$  (див. рис. 1). Для випадку, що розглядається, попереднім розрахунком було визначено, що при  $2c \times a = 3,0 \times 0,5$  мм запас крихкої міцності труби на периферії зварного з'єднання складає близько 1,81 і, таким чином, консервативно відповідає проектним вимогам до трубопроводу (1,79). Для коректного врахування тривимірного НДС при розрахунку крихкої міцності розглядалися тріщини різної орієнтації відносно осі труби (повздожні, окружні) та обирався мінімальний коефіцієнт запасу  $n$ .

**Результати та обговорення.** Скінченно-елементний аналіз залишкового НДС в області зварювання кільцевих з'єднань дозволив врахувати технологічний аспект монтажу на надійність і працездатність трубопроводу. Взаємодія експлуатаційних напружень з післязварювальними має суттєво нелінійний характер в обох характерних напрямках відносно осі трубопроводу, а саме окружному та аксіальному (рис. 3, 4). Неоднорідність поля напружень на різних етапах циклічного навантаження зварної ділянки МГ викликає відповідний просторовий розподіл розмахів коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$  (рис. 5) і, як

результат, зміну схильності різних ділянок конструкції до крихкого руйнування в процесі довготривалої експлуатації. Найбільш схильними до крихкого руйнування за статичного навантаження є ділянки шва і ЗТВ, які характеризуються високими розтягувальними сумарними напруженнями, зумовленими взаємодією експлуатаційного та післязварювального НДС (рис. 6).

Стосовно втомної міцності зварних з'єднань під дією циклічно змінного внутрішнього тиску чи моменту згину, більші розмахи значень коефіцієнту інтенсивності напружень в ЗТВ зумовлюють суттєве зменшення залишкових коефіцієнтів запасу  $n$  при прогнозуванні довготривалої крихкої міцності. Як видно з результатів досліджень (рис. 6), воднева деградація має максимальний вплив на залишковий коефіцієнт запасу крихкої міцності металу ЗТВ в умовах циклічного навантаження внутрішнім тиском: загальне зниження значень  $n$  перевищує 25 % у порівнянні з випадком транспортування чистого природного газу. При цьому вплив циклічного моменту згину не настільки суттєво впливає на надійність трубопроводу.

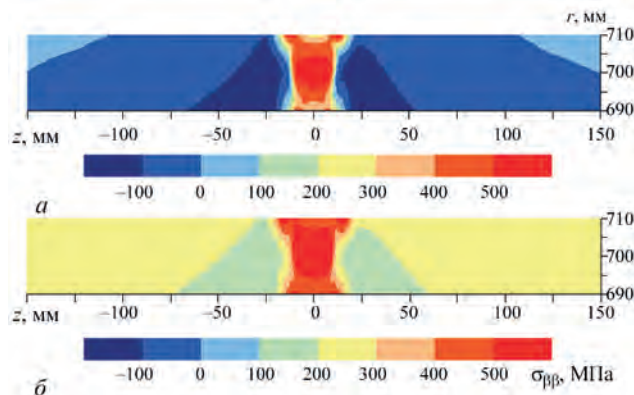


Рис. 3. Розрахункове поле окружних напружень  $\sigma_{\phi\phi}$  у повздожньому перерізі труби: *a* – залишковий післязварювальний стан; *b* – за умови навантаження внутрішнім тиском 7,5 МПа

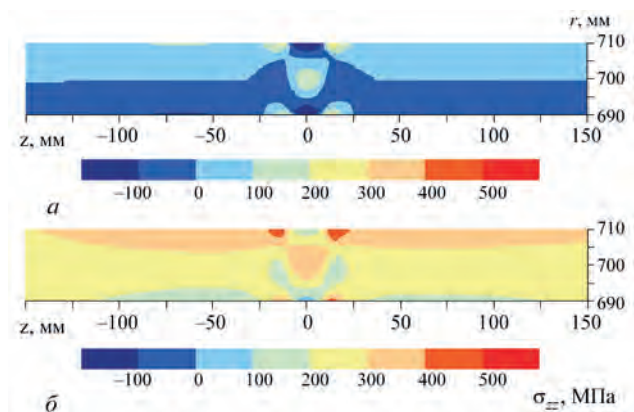


Рис. 4. Розрахункове поле аксіальних напружень  $\sigma_{zz}$  у повздожньому перерізі труби: *a* – залишковий післязварювальний стан; *b* – за умови навантаження внутрішнім тиском 7,5 МПа та моментом згину  $8,4 \cdot 10^9$  Н·мм

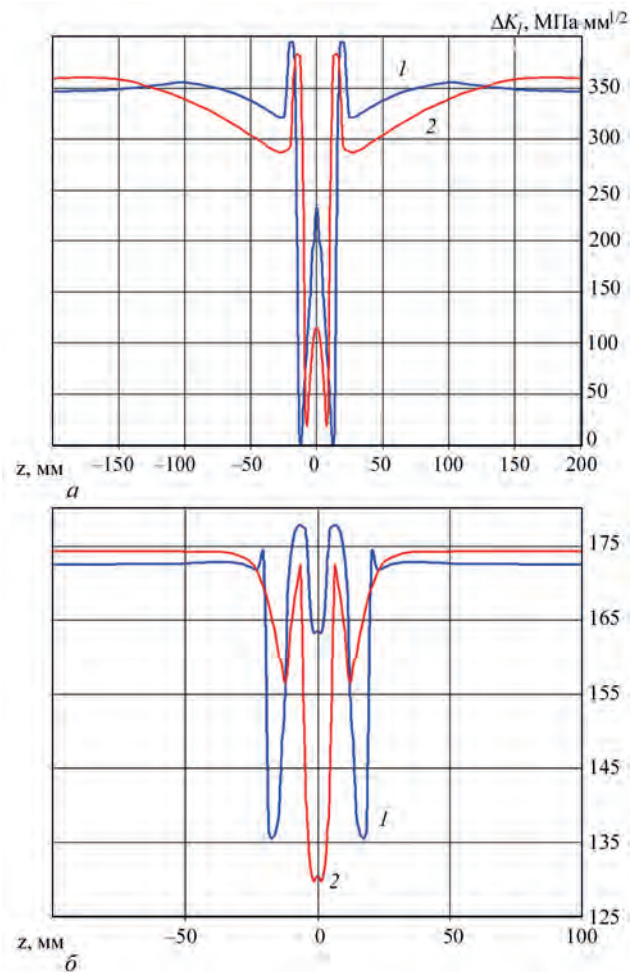


Рис. 5. Розподіл значень розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$  вздовж зовнішньої (1) та внутрішньої (2) поверхонь труби після 10000 циклів навантаження внутрішнім тиском (а) і моментом згину (б)

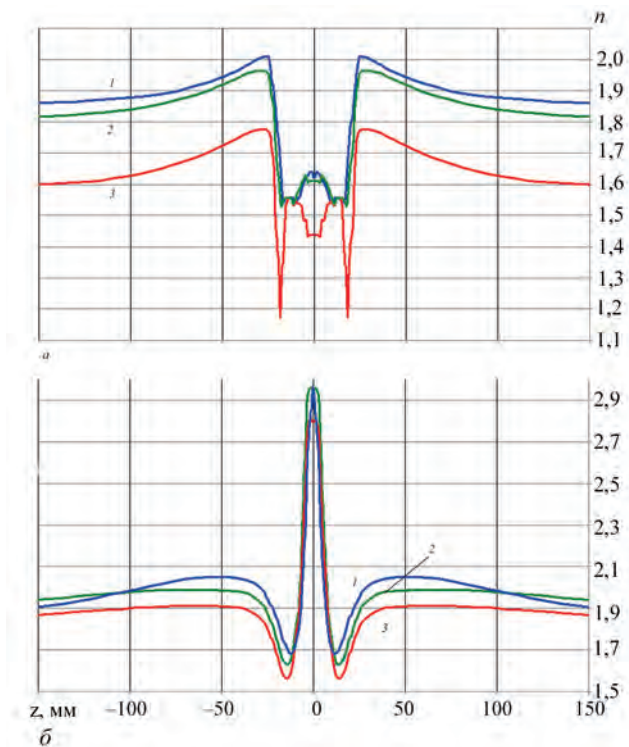


Рис. 6. Розподіл значень коефіцієнта запасу крихкої міцності  $n$  вздовж зовнішньої поверхні труби за умов статичного та циклічного навантаження внутрішнім тиском (а) і моментом згину (б): 1 – статичне навантаження ( $v_H = 0,5$ ); 2 – циклічне навантаження ( $v_H = 0, 0, 10000$  циклів); 3 – циклічне навантаження ( $v_H = 0, 5, 10000$  циклів)

Залежності мінімального коефіцієнта запасу крихкої міцності зварного елемента МГ від об'ємної концентрації водню  $v_H$  в транспортованій ГВС в основному металі та в ЗТВ за умов циклічного навантаження внутрішнім тиском і моментом згину квазілінійні, мають різний кут нахилу (рис. 7), що відповідає різній схильності металу до крихкого руйнування при розвиненій водневій деградації та циклічному навантаженні. Цей ефект можна також чисельно характеризувати величиною втомного зростання розмірів тріщини. Так, для випадку циклічної зміни внутрішнього тиску в залежності від концентрації водню в суміші максимальний приріст лінійних розмірів дефекту за 10000 циклів навантаження знаходиться в діапазоні від 0,13 мм (при  $v_H = 0\%$ ) до 4,7 мм ( $v_H = 50\%$ ), для випадку циклічного навантаження моментом згину – від 0,013 до 0,31 мм відповідно.

Слід зазначити, що в рамках цього дослідження розглядається саме крихка міцність металу зварної ділянки МГ, але в області зварного з'єднання, де величина напружень досягає границі текучості матеріалу, граничний стан і макроскопічне руйнування може визначатися в'язким або крихко-в'язким руйнуванням. Але ці види руйнування не є характерними в разі водневого окрихчування металу при довгостроковій експлуатації

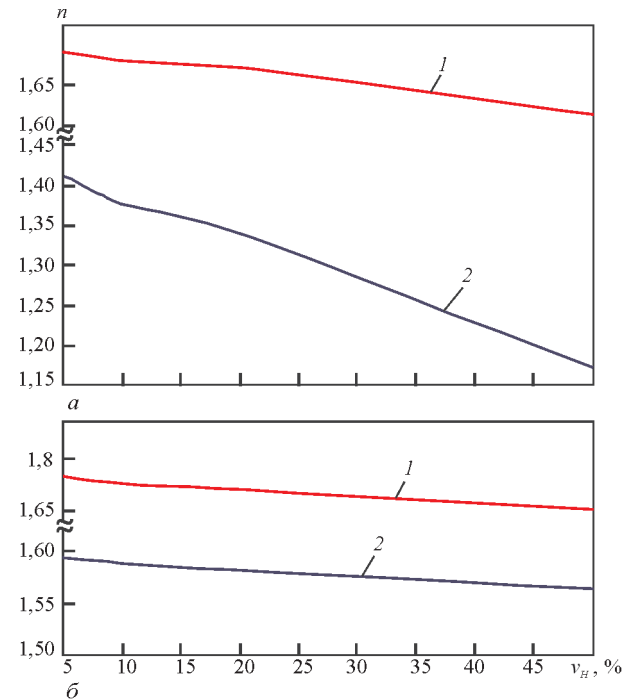


Рис. 7. Залежності мінімального коефіцієнта запасу крихкої міцності зварного елемента МГ від об'ємної концентрації водню  $v_H$  у транспортованій суміші в основному металі (1) та в ЗТВ (2) за умов циклічного навантаження (10000 циклів) внутрішнім тиском 0...7,5 МПа (а) і моментом згину 0...8,4·10<sup>9</sup> Н·мм (б)

трубопроводу в умовах безперервного контакту з наводненим середовищем.

### Висновки

1. Розроблено чисельну методику аналізу крихкої міцності зварних ділянок МГ при транспортуванні ними сумішей природного газу та водню. Основою запропонованої методики є скінченно-елементний аналіз НДС конструкції при зварюванні та подальшому експлуатаційному навантаженні, а також розрахунок залишкового запасу міцності в припущенні наявності постульованої поверхневої тріщини певного розміру. При цьому враховувалась можливість прогнозування крихкої міцності як за статичного, так і циклічного навантаження, для чого розраховувалась швидкість втомного зростання розміру дефекту за законом Паріса.

2. На характерному прикладі прямолінійної ділянки МГ ( $D \times t = 1420 \times 20$  мм, 17Г1С) було досліджено особливості впливу водневої деградації металу на надійність трубопроводу. У якості зовнішнього навантаження розглядався внутрішній тиск (до  $P = 7,5$  МПа) та згинальний момент у площині вісі (до  $8,4 \cdot 10^9$  Н·мм). Показано, що найбільш схильними до крихкого руйнування є ділянки шва і ЗТВ, які характеризуються високими розтягувальними сумарними напруженнями, зумовленими взаємодією експлуатаційного та післязварювального НДС. Але стосовно втом-



ної міцності зварних з'єднань під дією циклічного навантаження внутрішнім тиском чи моментом згину, більші розмахи значень коефіцієнта інтенсивності напружень у ЗТВ зумовлюють суттєвіше зменшення залишкових коефіцієнтів запасу при прогнозуванні довготривалої крихкої міцності.

3. Показано, що воднева деградація має максимальний вплив на крихку міцність зварного трубопроводу в умовах циклічного навантаження внутрішнім тиском: 10000 циклів навантаження викликають загальне зниження залишкового коефіцієнта запасу в ЗТВ більш ніж на 25 % у порівнянні з випадком транспортування чистого природного газу. При цьому циклічний момент згину не суттєво впливає на надійність трубопроводу.

### Список літератури/References

1. Нецаев Ю.С. (2008) Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных трубопроводов. *Успехи физических наук*, 178, 7, 709–726.
2. Nechaev, Yu.S. (2008) Physical complex problems of aging, embrittlement and fracture of metallic materials in hydrogen power engineering and main pipelines. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, Vol. 178(7), 709–726 [in Russian].
3. Esaklul, K.A. (2017) *Hydrogen damage. Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies Production and Transmission*. UK: Woodhead Publishing, 315–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00013-9>
4. Dmytrakh, I., Syrotyuk, A., Leshchak, R. (2022) Specific mechanism of hydrogen influence on deformability and fracture of low-alloyed pipeline steel. *Procedia Structural Integrity*, 36, 298–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.038>
5. Nykyforchyn, H., Lunarska, E., Tsyrlunyk, O.T. et al. (2010) Environmentally assisted «in-bulk» steel degradation of long term service gas trunkline. *Engineering Failure Analysis*, 17, 3, 624–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.007>
6. Milenin, O.S., Velykoivanenko, O.A., Rozyuka, G.P., Pivtorak, N.I. (2022) Features of analysis of the technical state and support of reliability of the main gas pipelines at transportation of gas-hydrogen mixtures (Review). *The Paton Welding J.*, 6, 49–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.06.07>
7. Karkhin, V.A. (2019) *Thermal Processes in Welding*. Singapore, Springer Singapore.
8. Makhnenko, V. (2013) Problems of examination of modern critical welded structures. *The Paton Welding J.*, 5, 21–28.
9. Milenin, A., Velykoivanenko, E., Rozyuka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 171C, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
10. (2015) BS 7910:2013+A1:2015 *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. The British Standards Institution.
11. (2007) *Fitness-For-Service. API 579-1/ASME FFS-1. Recommended Practice 579*. Second edition. Washington, API Publishing Services.
12. (1997) СНиП 2.05.06-85 *Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила*. Москва, ВНИИСТ Миннефтегазстроя.
13. Hobbacher, A. (2008) *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. International Institute of Welding. Doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07. Paris, France, October 2008.
14. Furrer, D.U., Semiati, S.L. (2009) *ASM Handbook. Volume 22A. Fundamentals of Modeling for Metals Processing*. Edit. Ohio, ASM International.
15. Meng, B., Gu, C.H., Zhang, L. et al. (2017) Hydrogen effects on X80 pipeline steel in high-pressure natural gas/hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 11, 7404–7412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.145>
16. Stalheim, D., Boggess, T., SanMarchi, C. et al. (2010) Microstructure and mechanical property performance of commercial grade API pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen. In: *Proceedings of IPC 2010 8th International Pipeline Conference Calgary, Canada*.

## NUMERICAL ASSESSMENT OF BRITTLE STRENGTH OF FIELD WELDS OF THE MAIN GAS PIPELINES AT TRANSPORTATION OF GAS-HYDROGEN MIXTURES

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

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

Features of the influence of hydrogen degradation of pipe steel on brittle strength of circumferential field welded joints were considered within the framework of analysis of the possibility of using the Ukrainian gas-transportation system for transportation of mixtures of natural gas and hydrogen. Applied for these purposes were the methods of finite-element modeling of the structure stress-strain state during welding and further service together with modern criteria of macroscopic fracture of a cracked body. Results of prediction of brittle strength margin of a typical welded section of the main gas pipeline with postulated surface cracks at transportation of gas-hydrogen mixtures of different composition showed that the areas of the weld and heat-affected zone are the most prone to brittle fracture. However, as regards fatigue strength of welded joints, greater ranges of stress intensity factors in the heat-affected zone under the impact of cyclic loading by inner pressure or bending moment, result in an essential reduction of the residual strength margins at prediction of long-term brittle strength. 15 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

*Keywords:* gas-hydrogen mixture, main gas pipeline, hydrogen degradation, technical condition, brittle strength, cyclic loading

Надійшла до редакції 06.10.2022

### НОВА КНИГА



#### Corrosion of Aluminium

Christian Vargel

Hardcover ISBN: 9780080999258

eBook ISBN: 9780080999272

Corrosion of Aluminium, Second Edition, highlights the practical and general aspects of the corrosion of aluminium alloys. Chapters help readers new to the topic understand the metallurgical, chemical and physical features of aluminium alloys. Author Christian Vargel adopts a practitioner styled approach that is based on the expertise he has gained during a 40-year career in aluminium corrosion. The book assesses the corrosion resistance of aluminium, a key metric recognized as one of the main conditions for the development of many uses of aluminium in transport, construction, power transmission, and more.

# НОВИЙ СТАНДАРТ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ ПРИ АЕ МОНІТОРИНГУ

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, А.Я. Недоссека<sup>1</sup>, С.А. Недоссека<sup>1</sup>, М.А. Яременко<sup>1</sup>, М.А. Овсієнко<sup>1</sup>, З.Т. Назарчук<sup>2</sup>, В.Р. Скальський<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [st\\_private@hotmail.com](mailto:st_private@hotmail.com)

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5.

E-mail: [pminasu@ipm.lviv.ua](mailto:pminasu@ipm.lviv.ua)

У статті розглядаються основні положення нового ДСТУ 9118:2022 «Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій. Загальні вимоги». Стандарт поширюється на промислові об'єкти: трубопроводи, трубопровідні системи та технологічне обладнання (котли, вмістища, резервуари тощо) енергетичних, нафтопереробних, нафтохімічних і хімічних виробництв, вантажопідійомних засобів і споруд та інших зварних конструкцій підвищеної безпеки. Стандарт встановлює основні положення з технічного діагностування, його показники та характеристики, вимоги до діагностичного забезпечення об'єкту. Стандарт призначений для персоналу, фахівців та посадових осіб, які займаються оцінюванням технічного стану об'єктів. Розглянуто використання методу АЕ у режимі безперервного моніторингу для забезпечення виконання положень стандарту. Бібліогр. 5, табл. 2, рис. 3.

*Ключові слова:* стандарт, діагностика, вимоги, конструкції, обладнання, об'єкти

**Вступ.** Вимоги до підвищення якості робіт з оцінки стану конструкцій викликали необхідність розробки нового, точнішого стандарту [1]. Це необхідно ще й тому, що в Україні передбачається великий обсяг робіт із відновлення зруйнованих війною об'єктів інфраструктури та будівництва нових, досконаліших. Слід відзначити, що об'єкти, які відновлюються та знову будуються, повинні бути перевірені інтегрально і по всьому силовому обсягу на можливість подальшої безаварійної експлуатації з необхідними гарантіями і точністю прогнозування їх безаварійної експлуатації. Такий стандарт розроблено зусиллями співробітників Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона [2] та Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка [3] з урахуванням багаторічного досвіду обох установ у даній галузі. Основний наголос зроблено на кількісні показники діагностування та точність оцінки стану матеріалу конструкцій, що діагностуються [4]. Стандарт набрав чинності з 1 липня 2022 р. Нижче наведено вибіркового змісту цього документу з акцентом на найсуттєвіших положеннях. Відзначимо, що розроблений стандарт з технічної діагностики на даний час є першим та єдиним документом, що регламентує необхідність кількісної оцінки стану конструкцій.

**Основні положення ДСТУ 9118:2022 «Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій. Загальні вимоги».** Згідно з термінологією стандарту:

Діагностичне забезпечення об'єкту – комплекс взаємопов'язаних діагностичних параметрів, ме-

тодів, правил, засобів технічної діагностики, зазначених у технічній документації, необхідних для здійснення діагностування об'єкту.

Діагностична модель об'єкту – формальний опис об'єкту, що піддається діагностуванню, необхідний для вирішення завдань діагностування (в аналітичній, табличній, векторній, графічній та ін. формі).

Розділ «Загальні положення» стандарту регламентує завдання та передумови виконання процедури з технічного діагностування конструкцій.

Технічне діагностування стану матеріалів конструкцій повинно проводитися в процесі: а) виробництва (за потреби); б) експлуатації та ремонту. Об'єктом діагностування є матеріал конструкцій. Метою технічного діагностування матеріалів і конструкцій є підтримка встановленого рівня надійності, забезпечення вимог безпеки та ефективності їх використання.

Технічне діагностування виробів повинно бути спрямоване на вирішення таких взаємопов'язаних завдань: а) визначення поточного технічного стану; б) визначення місць, що можуть являти загрозу для безпечного функціонування об'єктів діагностування; в) прогнозування технічного стану.

Для здійснення технічного діагностування об'єкту необхідно: а) встановити показники та характеристики діагностування; б) забезпечити пристосованість об'єкту до технічного діагностування; в) розробити діагностичне забезпечення об'єкту.

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Недоссека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Недоссека 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>, Назарчук З.Т. – <https://orcid.org/0000-0003-0402-0570>, Скальський В.Р. <https://orcid.org/0000-0001-5713-872X>

© Л.М. Лобанов, А.Я. Недоссека, С.А. Недоссека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський, 2023

Забезпечення пристосованості об'єкту до технічного діагностування повинно проводитися відповідно до вимог нормативної документації. Показники і характеристики діагностування, вимоги щодо пристосованості об'єкту до діагностування та діагностичного забезпечення об'єкту повинні включатися до технічних завдань та в нормативно-технічну документацію, що розробляється в процесі проведення дослідно-конструкторських робіт. Контроль виконання вимог щодо показників та характеристик діагностування здійснюється при проведенні попередніх, приймальних і періодичних випробувань за програмами та методиками випробувань на об'єкт.

**Розділ «Показники і характеристики діагностування»** регламентує вимоги до переліку показників оцінки та прогнозування стану конструкцій, що діагностуються. Встановлюються такі показники діагностування: а) показники достовірності і точності діагностування; б) показники техніко-економічні.

Показники достовірності і точності діагностування наведено в табл. 1. Техніко-економічні показники містять: а) питомі витрати на діагностування; б) середню оперативну трудомісткість діагностування; в) середню оперативну тривалість діагностування; г) періодичність діагностування.

Встановлюються такі характеристики діагностування: а) при визначенні технічного стану об'єкту діагностування – перелік конструкційних та експлуатаційних параметрів об'єкту, що дозволяють визначити його технічний стан; б) при прогнозуванні технічного стану об'єкту діагностування – перелік конструкційних та експлуатаційних параметрів об'єкту, що дозволяють прогнозувати його технічний стан.

**Розділ «Вимоги до діагностичного забезпечення об'єкту»** регламентує вимоги до діагностичного забезпечення, параметрів, методів, засобів та правил діагностування конструкцій.

Діагностичне забезпечення об'єкту повинно містити: а) перелік діагностичних параметрів та їх характеристик; б) методи діагностування; в) засоби технічного діагностування; г) правила діагностування.

Перелік діагностичних параметрів повинен задовольняти вимогам повноти, інформативності та доступності вимірювання при найменших витратах часу і вартості реалізації.

Методи діагностування повинні визначатися виходячи з встановлених завдань і повинні містити: а) діагностичну модель об'єкту; б) алгоритм діагностування та програмне забезпечення; в) правила вимірювання діагностичних параметрів; г) правила аналізу та обробки діагностичної інформації і прийняття рішення.

Засоби технічного діагностування (ЗТД) повинні забезпечувати визначення (вимірювання) або контроль діагностичних параметрів у режимах роботи об'єкту, зазначених в експлуатаційних документах.

Правила діагностування повинні містити: а) послідовність виконання операцій діагностування; б) технічні вимоги щодо виконання операцій діагностування; в) вказівки щодо ЗТД, що застосовуються, і вимоги до їх метрологічного забезпечення; г) вказівки щодо режиму роботи об'єкту при діагностуванні; д) вказівки щодо реєстрації і обробки результатів діагностування та надання технічного висновку відповідно до завдань, що вирішуються; ж) вимоги безпеки процесів діагностування та інші вимоги відповідно до специфіки експлуатації об'єкту. Форми реєстрації та збері-

**Таблиця 1. Показники достовірності і точності діагностування**

Завдання діагностування	Результат діагностування	Показники достовірності і точності
Визначення місць у матеріалі конструкції, що можуть являти загрозу для функціонування об'єктів діагностування	Координати небезпечних місць у матеріалі	Середньоквадратична похибка визначення координат місць імовірної небезпеки
Прогнозування технічного стану	Числове значення прогнозу параметру (параметрів) технічного стану на період часу, що задається, у тому числі (за необхідності) і на даний момент часу	Задана вірогідність прогнозу Розрахункова похибка прогнозу Середньоквадратичне відхилення прогнозованого параметру (параметрів) після виконання прогнозу
	Числове значення прогнозованого залишкового ресурсу (безпечного напрацювання) на період часу, що задається, в тому числі (при необхідності) і на даний момент часу	Задана вірогідність прогнозу Розрахункова похибка прогнозу Середньоквадратичне відхилення прогнозованого залишкового ресурсу Вірогідність прогнозованого часу безвідомної роботи, показники зміни прогнозованого діагностичного параметра (параметрів)
	Нижня межа ймовірності безвідомної роботи за заданими параметрами безпеки на встановлений період часу	Довірча ймовірність



гання діагностичної інформації встановлюються в галузевих нормативно-технічних документах.

Таким чином, розроблений стандарт регламентує не саму процедуру діагностики, не засоби та методи діагностування, а вимоги до їх використання, які забезпечують отримання достовірних діагностичних показників. Дотримання вимог стандарту при створенні конкретних методів і засобів діагностування та їх використанні забезпечує вищу надійність оцінки стану конструкцій, що діагностуються, оскільки забезпечується отримання конкретних кількісних показників діагностування.

**Застосування положень ДСТУ 9118:2022 при АЕ моніторингу.** Дані з табл. 1 доводять, що системи акустико-емісійного (АЕ) моніторингу при необхідному рівні автоматизації отриманих результатів забезпечують виконання запропонованого стандарту. АЕ виникає в матеріалах при критичному поєднанні деяких факторів впливу, що призводить до появи або розвитку дефектів. Особливістю методу є можливість контролювати стан матеріалу на великих відстанях від місць розміщення датчиків, виконувати малою кількістю датчиків контроль великих промислових об'єктів, у тому числі складної геометрії та на ділянках, доступ до яких ускладнений (підземних, покритих ізоляцією). Автоматизація дозволяє в режимі реального часу відстежувати координати небезпечних ділянок, формуючи кластери певного рівня небезпеки з заданою вірогідністю, прогнозувати руйнівне навантаження та залишковий ресурс.

Розглянемо, як можна застосувати і як отримати результати з використанням методу АЕ при безперервному контролі високотемпературних вузлів теплових станцій. На рис. 1 показано загальну схему трьох ліній гарячого промперегріву київської ТЕЦ-6. Дані акустичної емісії отримано при першому контролі. Квадратами вказано місця, у яких раніше підприємство проводило плановий неруйнівний контроль і дефекти виявлено не було. Еліпсами та колами показано ділянки підвищеної акустичної активності, для яких системою моніторингу згенеровано попередження 1-го та 2-го рівня відповідно до табл. 2.

Найбільш інтенсивна зафарбованість еліпсів нитки 3 вказує на вищий ступінь небезпеки (попередження 2-го рівня).

Випробування матеріалів із застосуванням методу АЕ показало, що виникнення та злиття порожнин у процесі руйнування матеріалу при високих температурах відбувається так само дискретно, як і при нормальних. Отже, методика АЕ контролю може бути використана і при оцінці стану матеріалів, що працюють при високих температурах. Контроль (як безперервний, так і періодичний) виконується, зокрема, на робочих режимах трубопроводу при тиску пари в трубі, що дорівнює 22 ат, температура пари 542 °С. У процесі випробувань системою моніторингу автоматично визначалися місця підвищеної небезпеки та виконувался прогноз руйнівного навантаження. Розрахунок залишкового ресурсу виконується згідно з [1–5].

Таким чином, пункти 1 і 2 табл. 1 виконуються, а точність розрахунків базується на встановленні довірчого інтервалу і похибки прогнозу  $\pm 15\%$  при вірогідності 95 %. Відзначимо, що точність вказаних показників підтверджена випробуваннями великої кількості зразків та декількох конструкцій, доведених до руйнування.

Відповідно до технічних вимог і представлених у технічному завданні схем виконано монтаж системи безперервного моніторингу, її підключення до енергопостачання та комп'ютерної мережі підприємства. Виконано необхідні підготовчі заходи для запуску в експлуатацію – підключення апаратного і керуючого блоків у загальну мережу контролю.

Основними завданнями при проходженні системою безперервного моніторингу періоду дослідної експлуатації є встановлення оптимальних параметрів налаштування, режимів експлуатації системи, особливостей, пов'язаних з роботою системи на даному об'єкті, а також усунення виявлених несправностей. Контроль у період дослідної експлуатації є періодично-безперервним. Це означає, що система періодично повинна запускатися в режимі безперервного моніторингу та періодично повинні проводитися разові випробування об'єктів контролю. Контроль у режимі штатної експлуатації є постійно безперервним. Сформовано

**Таблиця 2. Критичні значення АЕ активності протягом нормованого часу контролю**

Номер з/п	Кількість подій АЕ в одному кластері	Характер джерела АЕ	Стан контрольованої області	Дії оператора
1	<3	–	Розвитку дефектів не виявлено	Продовжити експлуатацію
2	3...10	Малоактивне джерело	Дефект розвивається не активно	Звернути увагу. Продовжити експлуатацію
3	10...100	Активне джерело	Прискорений розвиток дефекту	Підвищена увага. Знизити рівень навантаження
4	>100	Критично активне джерело	Дефект розвивається критично швидко	Небезпека. Знизити рівень навантаження до мінімуму

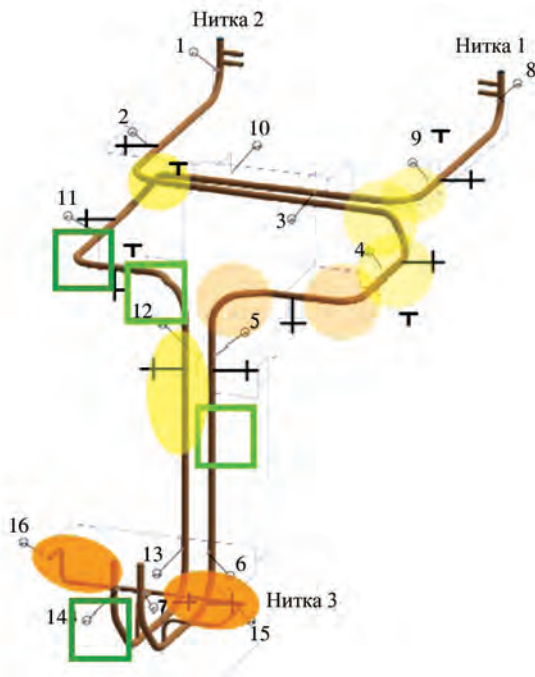


Рис. 1. Схема трубопроводу гарячого промперегріву з місцями підвищеної АЕ активності. Цифрами вказано номери АЕ датчиків, хрестиками – технологічні позначки

три акустичні антени, у які входять наступні датчики (номера каналів за схемою підключення до АЕ приладу): антена 1: номери з 1 по 7; антена 2: номери з 8 по 14; антена 3: номери 15 і 16.

З огляду на конфігурацію розташування датчиків, для всіх трьох антен обрано лінійний режим локації. Для інформації, що надходить, ідентифікованої як події АЕ, передбачено кластерний аналіз, що дозволяє об'єднувати події за координатним та низкою інших ознак. Застосування такого підходу для реальних конструкцій, особливо при складній геометрії об'єктів і в умовах наявності перешкод, є дуже ефективним. При наявності істотного розкиду в певних координатах події з високою ймовірністю належать до того ж процесу в матеріалі, об'єднання їх у кластер дозволяє найточніше вказати місце виникнення їх джерела. Особливо це важливо для тих ділянок трубопроводу, доступ до яких з технічних причин неможливий.

З огляду на дані первинних випробувань та високий рівень шумів самого об'єкта контролю, встановлено, що оптимальними настройками порогів амплітуди є плаваючі, тобто поріг автоматично змінюється слідом за загальним рівнем шуму, зафіксованим конкретним датчиком. Оптимальний плаваючий поріг повинен незначно перевищувати поточний рівень шуму на датчику. Корекція величини порога відбувається кожні 30 с. При таких налаштуваннях було забезпечено необхідну чутливість вимірювань, але потік інформації з урахуванням значних шумів надходив занадто високий. Тому постало питання додаткової фільтра-

ції даних, яке було вирішено на основі додаткових тестів на об'єкті та аналізу даних випробувань зразків з матеріалів-аналогів в умовах високих температур [1–5]. Зокрема розглянуто ефективність фільтрації за такими параметрами сигналів АЕ, як амплітуда та час наростання («Rise Time»).

Результатами фільтрації є:

1. Застосування фільтрації за амплітудою призводить до зниження кількості подій АЕ, які потрапляють у сформовані кластери. Відповідно рівні попереджень знижуються.

2. При застосуванні фільтрації за амплітудою відбраковують частину подій АЕ, що відповідають істинним джерелам АЕ в матеріалі трубопроводів.

3. При підйомі нижньої межі фільтра за амплітудою вище за 60...65 дБ події АЕ відбраковуються майже повністю, при установці її нижче за 55 дБ фільтр не є ефективним.

4. У налаштуваннях моніторингу ефективно може бути використаний фільтр за параметром «Rise Time».

5. Фільтрація за цим параметром призводить до зниження рівня попереджень. При цьому активні джерела АЕ формують кластери та можуть бути чітко виділені із загального шумового фону.

6. Аналогічним чином було проаналізовано можливість і ефективність фільтрації за тривалістю, частотою, швидкістю сигналів АЕ та обрано оптимальні смуги фільтрації, що забезпечують достатність інформації для пошуку небезпечних місць і генерування відповідних попереджень.

При цьому прогноз і попередження про небезпеку відбувається згідно з табл. 2. Розрахунок прогнозного руйнівного навантаження виконується автоматично. Розрахунок залишкового ресурсу виконується згідно з [1–5].

На рис. 2 наведено деякі стандартні елементи вікна програми, яка виконує моніторинг, після 1 год контролю трубопроводу в робочому стані при початкових стандартних налаштуваннях системи. Представлені на схемі стовпчики відображають місця концентрації АЕ подій в кожному контрольованому кластері. Цифри на прапорцях показують кількість АЕ подій в кластері, колір прапорців вказує на ступінь небезпеки процесу руйнування, що протікає у кластері. Над схемою кластерів у вікні прогнозування в спеціальній таблиці для трьох антен, контролюючих всю систему трубопроводів, наведено кольором небезпеки ситуації на певній ділянці трубопроводу в даний момент часу, зокрема прогноз руйнування та (опційно) поточна пошкодженість.

У нижній частині екранів наведено миттєві значення безперервної емісії, що реєструється кожним контролюючим АЕ датчиком. Інтенсивність емісії ранжовано висотою стовпчика і кольором.

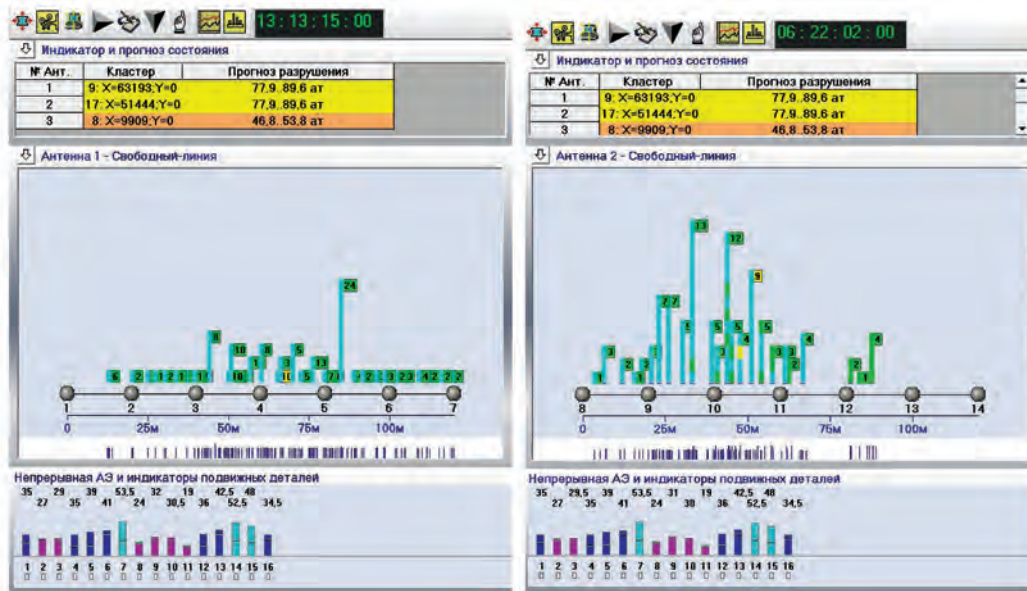


Рис. 2. Стан АЕ активності двох ниток трубопроводу в робочому стані через 13 год 13 хв (антена 1) і 6 год 22 хв (антена 2) з моменту початку контролю. Зверху в таблиці наведено величини прогнозованого граничного навантаження

Показано координати найнебезпечніших ділянок на всьому трубопроводі загальною довжиною 240 м (з антен 1, 2) і прогнозований руйнівний тиск у цих місцях трубопроводу. Антена 3 контролює ділянку трубопроводу зі сталі 12Х1МФ завдовжки 20 м діаметром 377 мм з товщиною стінки 17 мм.

Отримані результати є важливими з-за наявності АЕ даних і принципової можливості забезпечити індикацію небезпеки, прогноз руйнування, щоб потім на цій основі виконати автоматичну корекцію налаштувань системи таким чином, щоб результати відповідали фізичному стану контролюваного матеріалу.

Для наочності всієї картини акустичної активності на трубопроводі гарячого промперегріву

(ГПП) розроблено спеціальний інтерфейс, який показує сформовані кластери на всіх нитках трубопроводу, поточний рівень небезпеки, прогноз руйнівного навантаження для кожної з ниток (рис. 3). Тут кластери показано колами, а їх колір відповідає ступеню небезпеки на вказаній ними ділянці відповідно до табл. 2.

Автоматичний розрахунок поточної пошкодженості матеріалу забезпечує можливість визначення його ресурсу. Для цього потрібно знати лише власне пошкодженість і строк експлуатації об'єкта контролю. Таким чином, автоматизований безперервний моніторинг забезпечує виконання запропонованого стандарту. Подібним чином можуть бути застосовані й інші методи технічної діагностики.

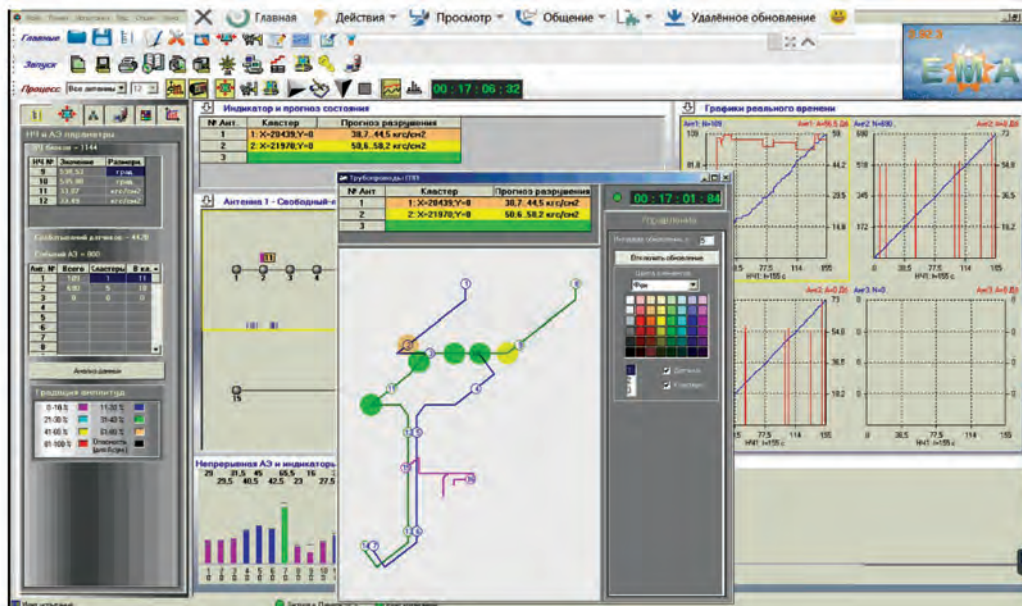


Рис. 3. Вікно спеціалізованого інтерфейсу для відображення стану труб ГПП, показане поверх основного вікна програми моніторингу. Попередження та прогноз руйнування сформовано для антен 1 і 2



**Висновки**

Створено принципово новий стандарт, що регламентує основні завдання та вимоги до процедури технічної діагностики конструкцій, виходячи з сучасного рівня та перспектив розвитку засобів і методів діагностування.

Результати діагностування повинні містити кількісні показники стану конструкції, що діагностується, отримані з заданою точністю та ймовірністю.

Запропонований стандарт може бути достатньо ефективно використаний при доробці конкретних існуючих та розробці нових нормативних документів і методів діагностування стану матеріалів конструкцій.

Використання методу АЕ у режимі безперервного моніторингу забезпечує виконання положень запропонованого стандарту.

**Список літератури**

1. ДСТУ 9118:2022 *Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій. Загальні вимоги.*
2. Лобанов Л.М., Недосека А.Я., Недосека С.А. та ін. (2022) Проблеми технічної діагностики та підходи до їх вирі-

шення. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 3–10. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.01.

3. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. Науково-Технічний посібник. У 3-х томах.* Київ, Наукова думка.
4. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: Учебное пособие.* 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
5. *Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Технические условия.* ТУ 14-3-460:2009/ТУ 27.2-05757883-207:2009.

**References**

1. DSTU 9118:2022. *Technical diagnostics. Diagnostics of technical state of materials of structures. General requirements* [in Ukrainian].
2. Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. et al. (2022) Problems of technical diagnostics and approaches to their solution. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol.*, 2, 3–10 [in Ukrainian]. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.01.
3. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) *Acoustic emission diagnostics of elements of structures.* Sci.-Tech. Manual. In: 3 Vol. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
4. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Principles of design and diagnostics of welded structures.* In: Manual, 5<sup>th</sup> Ed., Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
5. TU 14-3-460:2009/TU 27.2-05757883-207:2009. *Seamless steel pipes for steam boilers and pipelines. Specifications* [in Russian].

**A NEW STANDARD OF TECHNICAL DIAGNOSTIC INDICES AND ITS APPLICATION AT AE MONITORING**

L.M. Lobanov<sup>1</sup>, A.Ya. Nedoseka<sup>1</sup>, S.A. Nedoseka<sup>1</sup>, M.A. Yaremenko<sup>1</sup>, M.A. Ovsienko<sup>1</sup>, Z.T. Nazarchuk<sup>2</sup>, V.R. Skalskyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymir Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: st\_private@hotmail.com

<sup>2</sup>G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

The paper deals with the main provisions of the new standard DSTU 9118:2022 «Technical diagnostics. Diagnosing the technical condition of structure materials. General requirements». The standard covers industrial facilities: pipelines, pipeline systems, and technological equipment (boilers, containers, tanks, etc.) of power, oil processing, petrochemical and chemical productions, lifting equipment and facilities and other high-risk welded structures. The standard defines the main provisions on technical diagnostics, its indices and characteristics, and requirements to diagnostic support of the facility. The standard is designed for personnel, specialists, and executives, involved in assessment of the technical conditions of the facilities. Application of AE method in the mode of continuous monitoring to ensure fulfillment of the Standard provisions is considered. 5 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

*Keywords: standard, diagnostics, structures, equipment, facilities*

Надійшла до редакції 12.12.2022

# XXI МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2023

## МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

МЕТАЛОБРОБКА
 УКРВАРЮВАННЯ
 ГІДРАВЛІКА ПНЕВМАТИКА
 ПІДШИЙНИКИ
 УКРБОРТЕК
 УКРИТВО
 АВТОМАТИЗАЦІЯ І РОБОТОТЕХНІКА
 ЗВ'ЯЗКИ, СТАНДАРТИ І ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ
 ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ
 БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА





30 – 01

ТРАВНЯ ЧЕРВНЯ

Генеральний інформаційний партнер:  


---



**МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**

м. Київ, Броварський пр-т, 15  
станція метро «Лівобережна»

☎ +38 (095) 268-05-87, (84)

✉ is@iec-expo.com.ua,  
helen@iec-expo.com.ua

🌐 www.iec-expo.com.ua

# ADVANCING CONDITION ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE ELEMENTS THROUGH AUTOMATION, VISUALIZATION, AND IMPROVED INTERPRETATION OF MULTI-NDE TECHNOLOGY DATA

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ОЦІНКИ СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ ШЛЯХОМ АВТОМАТИЗАЦІЇ, ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ТА ПОКРАЩЕННЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБСТЕЖЕННЯ НЕРУЙНІВНИМИ МЕТОДАМИ

Nenad Gucunski\*, Hung Manh La†, Kien Dinh‡, and Mustafa Khudhair§

\*Rutgers University, Department of Civil and Environmental Engineering; gucunski@soe.rutgers.edu

†University of Nevada-Reno, Department of Computer Science and Engineering

‡NDT Concrete LLC

§Rutgers University, Department of Civil and Environmental Engineering

Economic bridge management requires accurate information about the condition of bridges in the network. Nondestructive evaluation (NDE) has shown high potential in providing accurate condition assessment and, through periodic surveys, development of accurate deterioration, predictive, and life-cycle cost models. To achieve wide adoption by transportation agencies, further advances should be made that would lead to the accuracy of NDE-based condition assessment, reduced costs and traffic interruptions, and minimized risk to transportation workers. The paper discusses the following areas of improvement: increased speed and safety of data collection through the use of robotic systems, and improved data interpretation through visualization and joint analysis of data collected by multiple NDE technologies.

Ефективне з економічної точки зору управління процесом експлуатації мостів вимагає точної інформації про їх стан. Обстеження неруйнівними методами (NDE) продемонструвало високий потенціал у забезпеченні точності оцінки технічного стану та прогнозування фінансових витрат протягом життєвого циклу завдяки розробці точних моделей деградації, створених на базі результатів періодичних обстежень. Для широкого впровадження цих методів транспортними агентствами слід досягти подальших успіхів, які призведуть до підвищення точності оцінок технічного стану на основі NDE, зменшать витрати та перебої в русі, а також зведуть до мінімуму ризик для працівників транспорту. У статті обговорюються наступні напрямки вдосконалення: підвищення швидкості та безпеки збору даних завдяки використанню роботизованих систем, а також покращення інтерпретації даних шляхом візуалізації та спільного аналізу даних, зібраних із використанням кількох технологій NDE.

*Keywords: reinforced concrete, bridges, GPR, impact echo, ultrasonic surface waves, ultrasonic tomography, electrical resistivity, half-cell potential, visualization*

*Ключові слова: залізобетон, мости, георадар, ударний ехо-метод, ультразвукові поверхневі хвилі, ультразвукова томографія, електричний опір, гальванічний потенціал, візуалізація*

### Introduction

Deterioration in reinforced concrete (RC) bridge components is a result of a multitude of actions. Some of the physical factors include repeated application of heavy traffic loading, thermal effects, shrinkage, and freeze-thaw cycles. However, and more often, chemical factors like reinforcement corrosion, alkali-silica reaction, or carbonation have a dominant influence on the deterioration processes. As a result of all these described actions, multiple deterioration and defects will be generated in bridge elements. According to the ASCE 2021 Infrastructure Report (ASCE 2021), nearly 231 000 bridges in the United States need repair and preservation work, and about 5.5% of the bridge deck area is designated as structurally deficient or poor. To improve bridge conditions in the next dec-

ade, it is estimated that an increase in annual spending on bridge rehabilitation from US\$14.4B to US\$22.7B will be needed. Improving the accuracy in the detection and characterization of deterioration and defects of reinforced concrete bridge elements using nondestructive evaluation (NDE) methods is essential for an accurate assessment of best rehabilitation and repair procedures. The condition assessment, paired with an improved speed of NDE data collection and interpretation, will allow economical periodical evaluation of bridges. Such periodical assessments will enable the capture of deterioration processes and defect formation, leading to the development of more accurate deterioration, predictive, and life-cycle cost models (Gucunski et al. 2016; Kim et al. 2019). Ultimately, these will lead to better bridge management.

This paper provides an overview of the current practice of bridge evaluation by NDE methods, recent efforts to improve the speed of NDE data collection through automation and robotics, and improved condition interpretation through advanced visualization and combined analysis of results of multiple NDE technologies. Automation of NDE data collection for bridges in the past 10 years concentrated on the assessment of bridge decks, because they deteriorate faster than other bridge components and the deployment of NDE technologies is simpler. Several automated and robotic systems deploying single or multiple NDE technologies have been developed. Most of the systems enable data collection with high spatial resolution through the use of large sensor arrays or multiple probes. On the other hand, the development of robotic systems for other bridge elements with vertical surfaces is far more challenging. Climbing robots for vertical elements have been designed and developed with different locomotion and adhesion methods.

The characteristics, challenges, and applications of these systems are presented. On the condition interpretation side, the results of NDE surveys of bridge elements are most commonly presented in terms of condition maps based on the data collected by particular NDE technologies. While those are essential to describe the surface projection of the location and the severity of deterioration and defects, both elements can be improved through 3D data visualization and joint analysis of data from multiple NDE technologies. The paper specifically discusses recent developments in 3D visualization of ground penetrating radar (GPR) and ultrasonic shear wave data for concrete structures. The combination of these two technologies enables the mapping of reinforce-

ment and clear visualization of the most common defects in concrete such as delamination, rebar debonding, corrosion, honeycombing, and such. Finally, while the use of multiple NDE technologies enables comprehensive evaluation, each NDE technology has limitations due to different parameters affecting the measured values and, thus, the interpretation of their results. To improve the interpretation, a joint analysis of data collected by multiple NDE techniques using machine-learning algorithms that incorporate various influencing parameters or other approaches can be implemented. These are discussed and examples are presented.

Current Practice of Condition Assessment of RC Bridges by Manual NDE Technologies

Deterioration processes in bridge components are often complex and are, thus, manifested through multiple deterioration indicators which can be detected and characterized by different NDE technologies. Some of the technologies can detect and evaluate only a single deterioration indicator, while some can evaluate multiple ones. In addition to defect and deterioration detectability, the methods significantly differ in the speed of data collection and interpretation, ease of use, cost, and level of expertise needed in both data collection and analysis. The following sections describe condition assessment by manual NDE technologies on concrete bridge decks and other superstructure and substructure RC components.

Condition assessment of concrete bridge decks by NDE most commonly concentrates on the evaluation of the state of corrosion, delamination, and concrete quality. It is commonly done on a test grid, for example, 60 × 60 cm (2 × 2 ft), as shown in Figure 1. A comprehensive condition assessment re-



Figure 1. Manual NDE data collection on a bridge deck (a) using the following NDE technologies: (b) impact echo; (IE); (c) ground penetrating radar (GPR); (d) ultrasonic surface waves (USW) and electrical resistivity (ER); (e) half-cell potential (HCP)  
 Рис. 1. Ручний збір даних NDE на настилі мосту (а) з використанням наступних технологій NDE: (б) ударний ехо-метод (ІЕ); (с) георадар (GPR); (д) ультразвукові поверхневі хвилі (USW) і вимірювання електричного опору (ER); (е) гальванічного потенціалу (HCP)



quires the use of multiple technologies. As shown in the figure, five NDE technologies are simultaneously deployed to evaluate the three states. The corrosion evaluation primarily relies on the electrical resistivity (ER) and half-cell potential (HCP) methods, and GPR as a secondary method. The delamination assessment primarily relies on the impact echo (IE) method, with ultrasonic surface waves (USW) and GPR as secondary methods. Finally, USW is a method that provides a quantitative assessment of concrete quality, while GPR is considered a qualitative tool. The results of evaluations are typically presented in terms of condition maps, as shown in the following section in Figure 4.

ER evaluates the corrosive environment of concrete by measuring the resistivity of concrete, which is significantly influenced by the moisture content (Nguyen et al. 2017), chloride concentration (Rupnow and Icenogle 2012), and the presence of cracks. The resistance can be related to the normally observed corrosion rates (Gowers and Millard 1999; Hornbostel et al. 2013). The most commonly used probe for field evaluation is a four-point Wenner probe, shown in Figure 1, which conforms with AASHTO TP 95-11 specifications. On the other hand, HCP provides information about the probability of active corrosion of reinforcement (ASTM C876-15). The method can be used at any time during the life of a concrete structure provided the temperature is above 20C (Elsener et al. 2003). HCP has a maximum penetration depth of around 200 mm (Bien et al. 2007). There are different types of HCP probes, also called reference electrodes. A rolling HCP probe is shown in Figures 1 and 2. Because the probe needs to be connected to the steel reinforcement, and the reinforcement needs to be connected to provide continuity throughout the survey area, the method is not

appropriate for inclusion in automated or robotic systems.

Delamination detection and characterization are primarily done using acoustic methods. Among acoustic methods, impact echo is the most commonly used. IE examines the transient response of a plate-like structure subjected to an acoustic pulse. The objective of the IE test is to detect resonant modes (Sansalone and Carino 1989). The peaks in the response spectrum represent either the thickness stretch Lamb wave modes (Gibson and Popovics 2005) or flexural modes (Kee and Gucunski 2016). The delamination depth can be obtained from the resonant frequency. In the case of shallow delamination (shallower than about 50 mm), where the resonant frequency is high, a more reliable approach is using a constant-phase IE approach (Almallah and Gucunski 2019). Air-coupled IE, in which contact sensors are replaced by microphones (Zhu and Popovics 2007) or MEMS (Sun et al. 2018), opens opportunities for rapid data collection. Another acoustic method that will be discussed later, ultrasonic tomography (UST), provides more detailed imaging of delaminated elements. Finally, shallow delamination can be rapidly detected using infrared thermography (IRT) (Maser and Roddis 1990; Maierhofer et al. 2001). However, delamination detection significantly depends on environmental conditions (Washer et al. 2009).

The quantitative assessment of concrete quality is most frequently assessed by the measurement of concrete elastic modulus using the USW method (Nazarian et al. 1994). The USW modulus evaluation relies on the measurement of the velocity of propagation of surface waves of wavelengths shorter than the deck thickness. The presence of shallow delamination often leads to the measurement of an apparent low concrete modulus (Azari et al. 2012). Typical USW devices

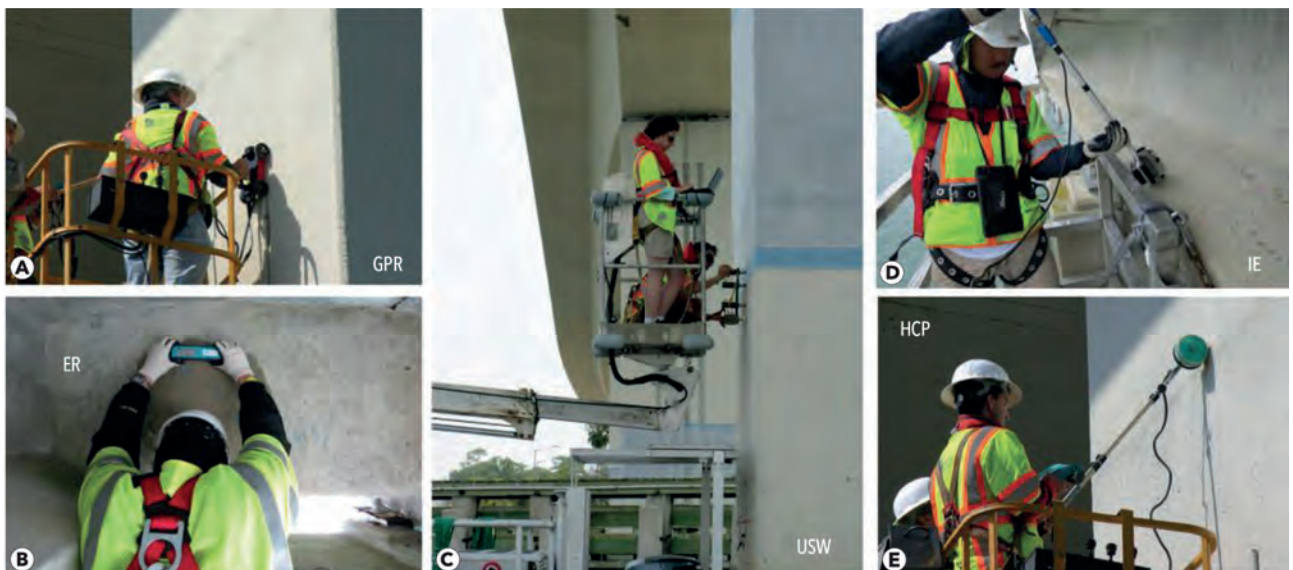


Figure 2. Manual NDE data collection on bridge piers and girders: (a) GPR; (b) ER; (c) USW; (d) IE; (e) HCP

Рис. 2. Ручний збір даних NDE про опори та балки мостів: (а) георадар; (б) ER; (с) USW; (д) IE; (е) HCP

consist of a source and two receivers. One of the devices, the portable seismic property analyzer (PSPA), is shown in Figures 1 and 2. GPR provides a qualitative assessment of the deck condition. The condition assessment is based on the evaluation of the amplitude of electromagnetic waves reflected from the top rebar layer (Barnes and Trottier 2000; Maser and Bernhardt 2000; Tarussov et al. 2013). Using certain thresholds, most often related to the results from other NDE technologies, areas with high signal attenuation in the obtained map are described as deteriorated concrete (Barnes et al. 2008). Consideration of the variability of concrete cover thickness and concrete conductivity is essential for an accurate assessment of signal attenuation (Dinh et al. 2016). Bridge deck evaluation by GPR can be conducted using ground-coupled (Figure 1) and air-coupled antennas. Typical productivity for ER, HCP, and IE data collection using the shown devices is about 100 m<sup>2</sup> (1000 ft<sup>2</sup>) on a 60 × 60 cm (2 × 2 ft) test grid. It is about 25 m<sup>2</sup> (250 ft<sup>2</sup>) for USW and about 500 m<sup>2</sup> (5000 ft<sup>2</sup>) for GPR on survey lines with a 60 cm (2 ft) spacing. More information about the performance of NDE technologies for the condition assessment of bridge decks can be found in an SHRP 2 report (Gucunski et al. 2013).

Condition assessment of other bridge components can be done using the same NDE technologies and devices as for concrete bridge decks. The biggest challenge in the NDE technology deployment is access to the element to be evaluated. The application of the previously described five NDE technologies in the condition assessment of concrete bridge piers and prestressed girders is shown in Figure 2.

**Automation of NDE Data Collection**

Comprehensive condition assessment of concrete bridges can be done using manual NDE technologies. However, and as illustrated in the previous section, manual multi-NDE technology data collection requires significant time and effort. In addition, in bridge deck evaluation, and in cases when super-

structure and substructure evaluation is done using snoopers, work zones for inspection cause traffic interruptions. All are adding to the cost of inspections, slowing or interrupting the traffic flow, and increasing risks for the inspectors and the traveling public. Considering that there are more than 620 000 bridges in the US, manual inspection and condition monitoring of the bridge network using NDE is not feasible. Automation of NDE data collection is, therefore, critical for their wide adoption as a tool for accurate condition assessment and monitoring and, thus, economic bridge management. The following sections describe some efforts in the automation of NDE data collection in the inspection of bridge decks and other bridge components.

**Automation of Bridge Deck NDE**

One of the earliest attempts for automated multi-NDE of concrete bridge decks was the robotic system BETOSCAN developed at the German Federal Institute for Material Research and Testing (BAM) (Raupach et al. 2009). BETOSCAN enabled the deployment of multiple NDE devices: ultrasonic, potential mapping, microwaves, and cover meters. While the system had significant capabilities, it could be deployed in the evaluation of smaller areas only because of a single NDE sensor installation. The RABIT (Robotics Assisted Bridge Inspection Tool) platform (Gucunski et al. 2017) brings elements of the previous efforts and implements them in a much bigger robotic platform with multiple NDE devices or sensor arrays (Figure 3).

RABIT integrates four NDE technologies: ER, GPR, USW, and IE. There are four ER probes and two acoustic arrays on the front end of the platform. The two acoustic arrays are equivalent to 16 IE devices and 12 USW devices. Two GPR arrays are mounted on the rear end of the platform, each having eight antenna pairs of dual polarization. Finally, two high-resolution cameras for deck surface imaging are mounted on the front end. RABIT is a fully autonomous system, whose

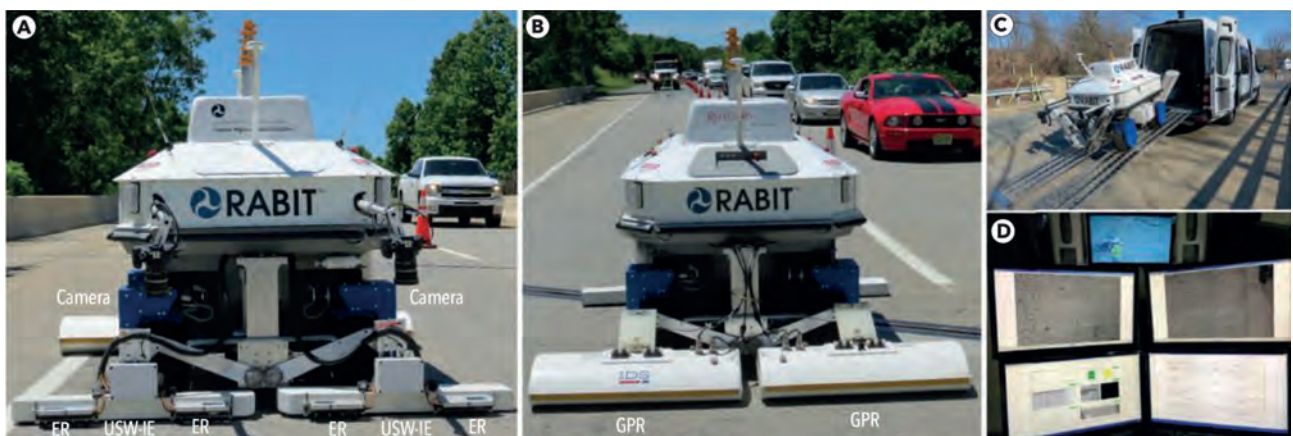


Figure 3. Robotic platform RABIT: (a) front view; (b) back view; (c) unloading from the command van; (d) screens in the command van. Рис. 3. Роботизована платформа RABIT: (а) вид спереду; (б) вид ззаду; (с) розвантаження з машини управління; (д) монітори в машині управління



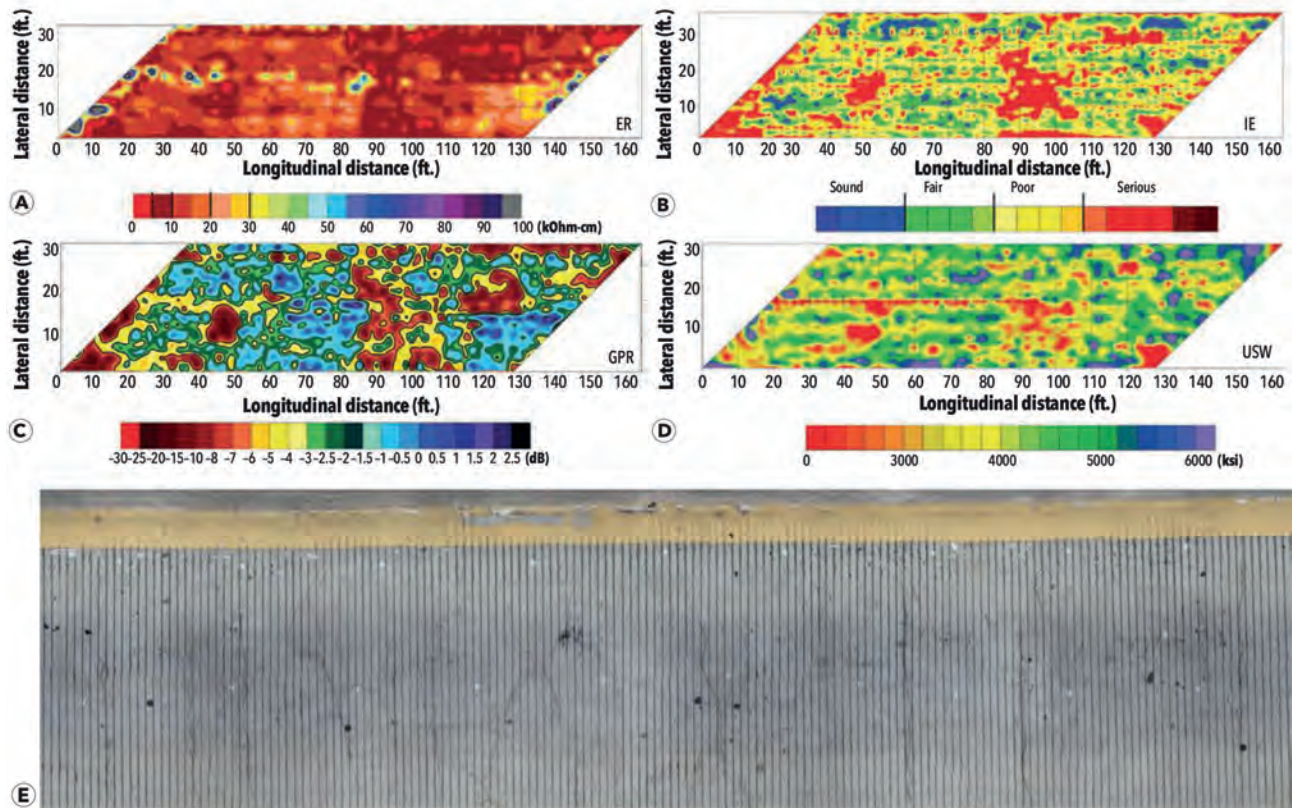


Figure 4. Condition maps from four NDE technology surveys: (a) ER; (b) IE; (c) GPR; (d) USW; and (e) section of the deck surface image  
 Рис. 4. Карти стану бетону за результатами чотирьох технологічних досліджень NDE: (a) ER; (b) IE; (c) георадар; (d) USW; та (e) зображення фрагменту поверхні настилу мосту

navigation was achieved through an integration of the differential global positioning system (DGPS), inertial measurement unit (IMU), and the wheel odometry. The data collection path is preprogrammed in terms of the deck sections to be evaluated and increments in the data collection. All the NDE data are streamed and monitored in real-time in the command van (Figure 3). The data collection production rate depends on the length of the bridge and data collection increment. For bridge decks approximately 100 m (330 ft) long, and data collection increment of 0.6 m (2 ft), RABIT can evaluate about 350 to 400 m<sup>2</sup> (3500 to 4000 ft<sup>2</sup>) per hour.

A sample of results from the RABIT includes the condition maps of a bridge shown in Figure 4, the ER map describing the severity of the corrosive environment, the IE delamination map, and GPR and USW maps of qualitative and quantitative concrete quality assessment. The condition maps are complemented by a high-resolution image of the deck surface which is obtained from stitched camera images. A section of the bridge deck with visible cracks is shown in the same figure. Such images become permanent records of the deck surface that can be reviewed at any time.

While the data collection speed of RABIT is significantly higher than of the manual data collection (approximately three times higher than a team of five NDE technicians), it could be significantly increased

through the use of air-coupled and/or rolling probes that would eliminate RABIT's test point stops. As an example, the use of air-coupled acoustic and vertical electrical impedance (alternative to ER) testing, along with GPR and high-definition imaging, was implemented on an NDE platform that enabled data collection at a walking speed (Pashtouni et al. 2020).

#### *Climbing Robots for Bridge Superstructure and Substructure*

The development of climbing robot systems for bridge inspection has received great attention recently (Tirthankar et al. 2018; Nguyen and La 2021). Inspired by the way that animals and insects move, robots have demonstrated the feasibility of climbing over different connectors and surfaces on bridges (Minor et al. 2000; Nguyen and La 2019; Nguyen et al. 2020). However, each bridge has many locations to be checked, and they are usually not close together, so it will take a long time for those climbing robots to complete the inspection of a bridge, not to mention that the calculation to move also takes a lot of time and requires intelligent algorithms. Studies on using drones for inspection have found that drones allow a quick, efficient overview without being limited to the bridge element material. However, a comprehensive inspection of bridges requires multiple positions for in-depth testing, while the current drone capabilities can provide only a visual inspection. Unlike the approaches mentioned



above, a new hybrid robotic design is presented, which considers the advantages of a drone's flying flexibility and a mobile robot's steady climbing capability to perform in-depth inspections of bridges. With the new design, the in-depth inspection of the bridge will also be conducted faster because of the drone's maneuverability. The mobile robot part is equipped with permanent magnets that can change the distance from the steel surface. Changing the distance between the magnet and the steel surface allows the robot to switch its operating modes between landing, taking off, and moving.

The design concept of this robot is illustrated in Figure 5. The robot is integrated with multiple sensors: Intel camera T265 and GPS for robot location tracking, infrared sensors for a safe landing, and a GMR sensor for crack detection. The onboard computer for processing is a Raspberry Pi4. The PX4 flight controller is for controlling the robot. The robot is surrounded by a sphere cage to protect it from a collision with the bridge. Overall, the robot is designed to work in two modes: mobile and drone. The mobile part allows the robot to cling to steel surfaces and move like other conventional mobile robots.

A new robot version will be able to cling to any material type surface, including concrete. On the robot, the body is attached to magnets to create an attractive force when the robot clings to a steel surface. The distance between the magnet array and the steel face is controlled by two pull motors. This distance is adjusted depending on the working condition of the robot. If the robot needs to cling strongly to the structure, then the distance is 0. Several images of the robot climbing on vertical structures of the bridge are shown in Figure 5. The robot was in mobile mode, using its wheels to climb on the elements. As shown, the robot can climb on tall elements and access difficult-to-reach areas to perform inspections. If the robot needs to climb on the bridge, then the distance is larger than 0 (e.g., 0.3 cm) to allow easy crawling of the robot. The drone mode allows the robot to fly between inspection areas. In this mode, the robot uses a high-resolution camera to capture images or record video of the surface of the bridge elements and joints. At the same time, the robot sends images to the inspector for live viewing. To navigate the robot in the drone mode, the inspector wears a VR headset (5.8 GHz) to receive video data from the ro-

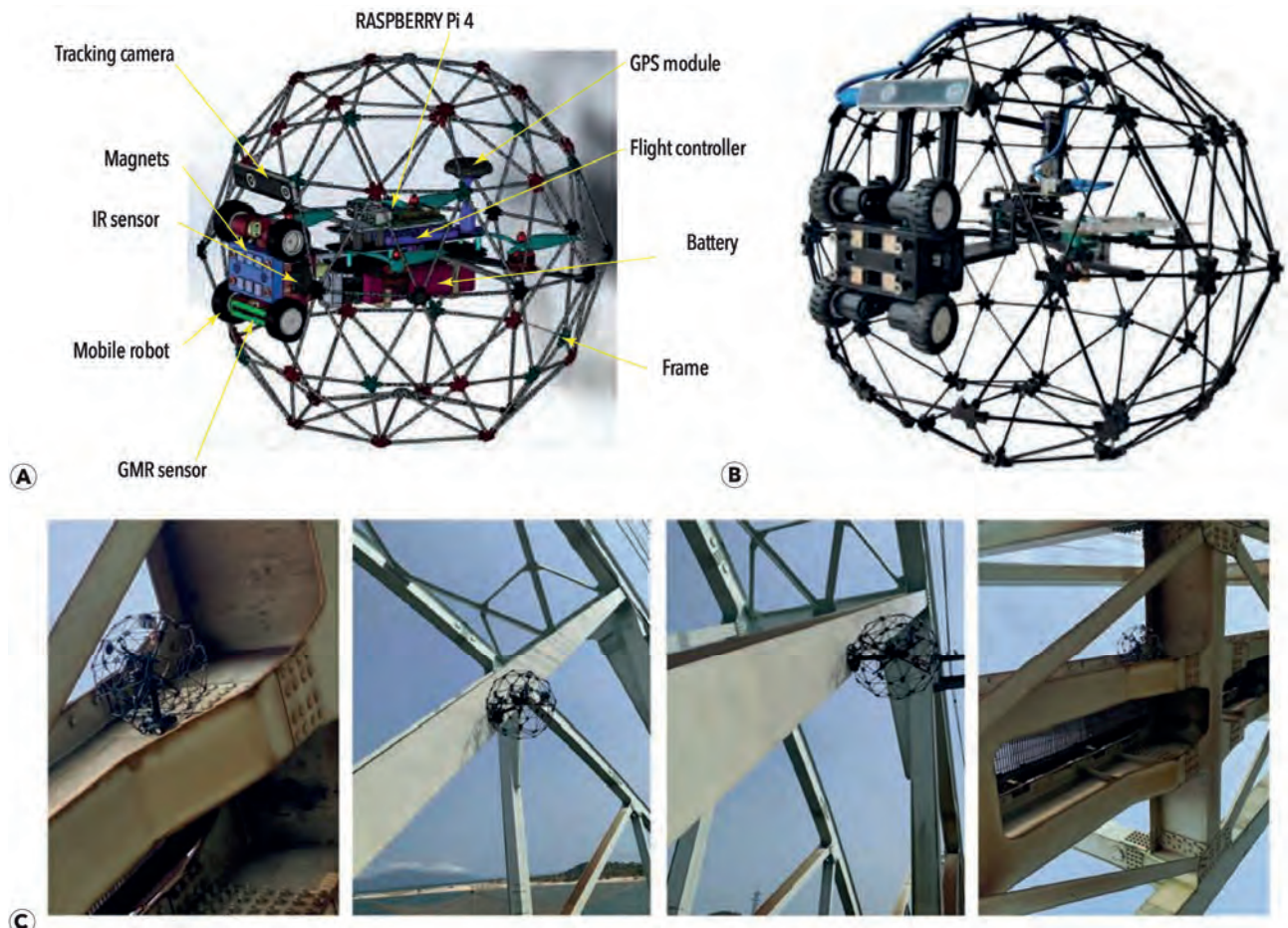


Figure 5. Flying robot with sensor integration: (a) overall design; (b) as built; and (c) images of the robot climbing on vertical surfaces of steel bridge elements

Рис. 5. Літаючий робот із вбудованими датчиками: (а) загальна будова; (б) в зборі; та (с) зображення робота, що піднімається на вертикальні поверхні сталевих елементів мосту



Figure 6. A snapshot from a recorded video taken by the robot. Two zoomed-in areas on the right side show the crack location  
 Рис. 6. Знімок із записаного відео, який зроблено роботом. Дві збільшені області праворуч показують розташування тріщини

bot's camera for observation of the environment at a distance of up to around 2 km. The robot uses its camera to detect available surfaces to land on the element (switching from the flying to the mobile mode). The robot relies on the values of two infrared sensors along with an intelligent landing algorithm to determine if the point in front is a safe position to land.

The robot was deployed to collect data on several bridges. Both mobile and drone modes were tested to validate the design. The left side of Figure 6 shows a snapshot of a video recording of a highway bridge taken by the robot in the flying mode. There are two high-resolution images on the right of the figure showing cracked pier surface areas from the robot's flight close to the pier.

#### Advanced Data Visualization

Like the automation discussed above, 3D visualization of NDE data is another area where improvements can be made for a more comprehensive and effective assessment of concrete bridges. Visualization allows NDE data to be presented in an intuitive manner, which will, in turn, facilitate the understanding and further analysis of NDE test results. Unlike the conventional data processing methods, which are used to detect the presence of anomalies through measurement of different physical properties of concrete, data visualization may help identify the exact location and shape of structural defects. As an example, it is known that the data collected by GPR contain significant information about the bridge deck condition (Tarussov et al. 2013). However, a major drawback of it is that its data in raw form are complex in nature, large in volume, and difficult to understand, and therefore can only be analyzed by GPR experts (Gucunski et al. 2013; Tarussov et al. 2013; Dinh et al. 2019). Even when GPR data are interpreted by GPR experts, the process is usually time-con-

suming and labor-intensive. In addition, the results can vary significantly between analysts. As illustrated in the subsequent paragraphs, these issues can be minimized, if not eliminated, through developing a standard procedure for visualizing and analyzing 3D images. It is noted that, while 3D visualization can be implemented for various technologies (Kim et al. 2017), herein it is demonstrated in the data collected by GPR and ultrasonic shear wave imaging devices.

GPR was developed originally as a geophysical imaging technique (Daniels 2004). GPR experts would review the collected GPR data, usually in the form of B-scans, to identify different subsurface layers and/or anomalies. For concrete applications, the evaluation results are conventionally presented in the form of contour maps of rebar reflection amplitude, on which the areas of low signal amplitude indicate the likelihood of rebar corrosion and/or concrete delamination, as was shown in Figure 4. Although this method has been validated for many bridge decks, it also has some significant limitations, as pointed out in the existing literature. First, the method can lead to deceptive results due to factors affecting the amplitudes such as depth, surface anomalies, reinforcing bar spacing, reinforcing bar configuration, and polarization effects (Tarussov et al. 2013). Second, it is not suitable for analyzing time-series data with the possibility of suggesting false improvement of the concrete condition over time (Dinh et al. 2015). The ability to map the locations of rebars, tendons, voids, concrete delaminations, and so on, is of great interest to fully understand the condition of concrete bridge elements. The benefit of 3D visualization for the condition assessment of concrete bridges is illustrated in Figure 7. In this figure, the conventional method for presenting the condition map (Figure 7a) is compared with the one based on the 3D visualization technique (Figure 7b) for a concrete deck where a significant amount of salt was added to concrete mixes during construction in one section of the deck. The resulting areas of a highly corrosive environment are marked on the maps. With such ground-truth information, one can easily observe in Figure 7a, the areas of false-positive diagnosis of a highly corrosive environment associated with the conventional method. As a comparison, that is not the case with the map in Figure 7b, which clearly shows the locations of all rebars as well as the sections of rebars affected by corrosion.

Ultrasonic shear wave tomography has recently become a commonly used technology for imaging concrete structures. It works by using multiple dry-point-contact (DPC) transducers to transmit and receive shear wave signals (De La Haza et al. 2013). The data obtained from a large number of transducer couples/pairs are then used to reconstruct the interior/volumetric image of concrete. A 3D image created from such data for a section of



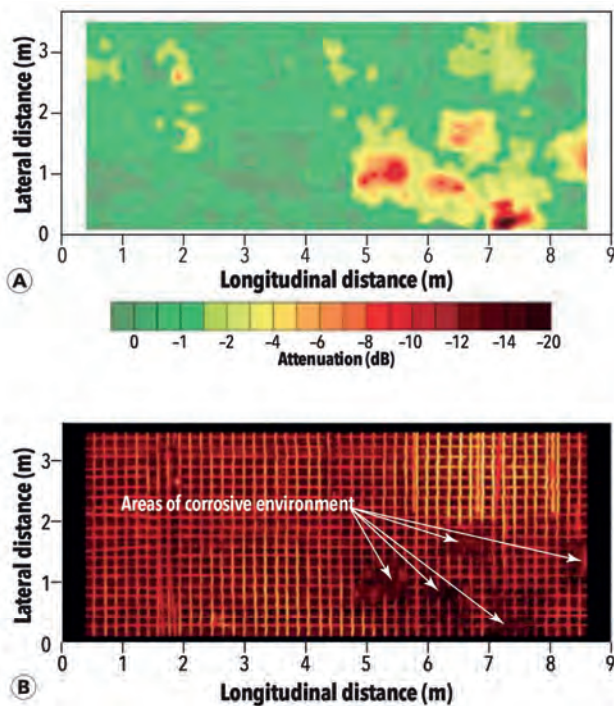


Figure 7. Presenting concrete bridge deck condition: (a) conventional method; (b) 3D visualization method (Dinh et al. 2019)

Рис. 7. Відображення стану бетонного мостового покриття: (a) звичайний метод; (b) метод 3D-візуалізації (Dinh et al. 2019)

the above concrete bridge deck specimen is shown in Figure 8. The image clearly shows the locations and shapes of simulated delamination, which was embedded into the deck during construction. It is worth noting that a delaminated area caused by corrosion is displayed in the image. This area coincides with an area of the corrosive environment depicted in Figure 7. The delamination is visible in the 3D image created from the ultrasonic shear wave data. The same is not the case with the one reconstructed from the GPR data. According to Dinh and Gucunski (2021), some factors might affect the visibility of delamination in GPR images such as the thickness of delamination, antenna frequency, signal attenuation, the proximity of steel bars, and so on. On one side, this indicates the need for using multiple NDE technologies for a comprehensive evaluation of concrete bridge elements. On the other side, which is of more interest to this section, it

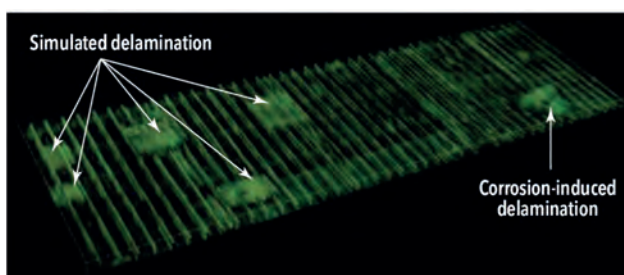


Figure 8. 3D visualization of bridge deck specimen from ultrasonic shear wave data

Рис. 8. 3D-візуалізація зразка мостового покриття за даними ультразвукової зсувної хвилі

showcases the benefits of 3D visualization of NDE data for concrete bridges.

### Improved Interpretation of Multi-NDE Technology Data

It has been recognized that NDE results may be affected by many parameters such as the degree of saturation, concrete cover, delamination depth, and similar. For example, Robles et al. (2022) summarized the effects of multiple parameters, including temperature, the presence of steel reinforcement, cracks and delamination defects, specimen geometry, and concrete composition on ER results. Because of that, corrections including the effects of those parameters should be incorporated to improve the data interpretation, which can be achieved through a joint analysis of results from multiple NDE technologies.

The joint analysis approach is illustrated for the HCP data collected on a bridge specimen at the BEAST (Bridge Evaluation and Accelerated Structural Testing) facility at Rutgers University. The measured potential of corrosion activity is, among others, affected by the moisture content of concrete, concrete cover thickness, presence and moisture condition of delamination, and electrical resistivity of concrete. The four parameters can be evaluated using different NDE technologies, as illustrated in Figure 9. For example, the Moist-SCAN device (Goeller and Jungstadt 2018) was used to estimate the degree of saturation of the concrete slab, as shown in Figure 9a. On the other hand, the concrete cover thickness was obtained from the GPR survey, as shown in Figure 9b. The IE results provide information about the delamination location and depth, as shown in Figure 9c. In addition, the results of ER measurements, as shown in Figure 9d, have been taken into consideration to correct the HCP measurement results.

To enable improved data interpretation, a series of finite element models have been prepared to simulate the effect of mentioned parameters on the results of various NDE technologies using COMSOL Multiphysics software. The results of the finite element models were used to produce an algorithm that mitigates the effects of different parameters on the results of the HCP. The effect of two of the parameters—the moisture content and concrete cover thickness—is illustrated in Figure 10. The HCP results before and after applying the algorithm are shown in the same figure. The raw HCP data in Figure 10c shows that the middle area of the slab has high potential values (more negative values) indicating an anticipated high corrosion activity, while the edges tend to have fewer negative values. On the other hand, the HCP measurement is modified based on four different parameters: the degree of saturation, concrete cover, delamination depth, and electrical resistivity, which are shown in Figure 10d. It can be seen clearly that the algorithm



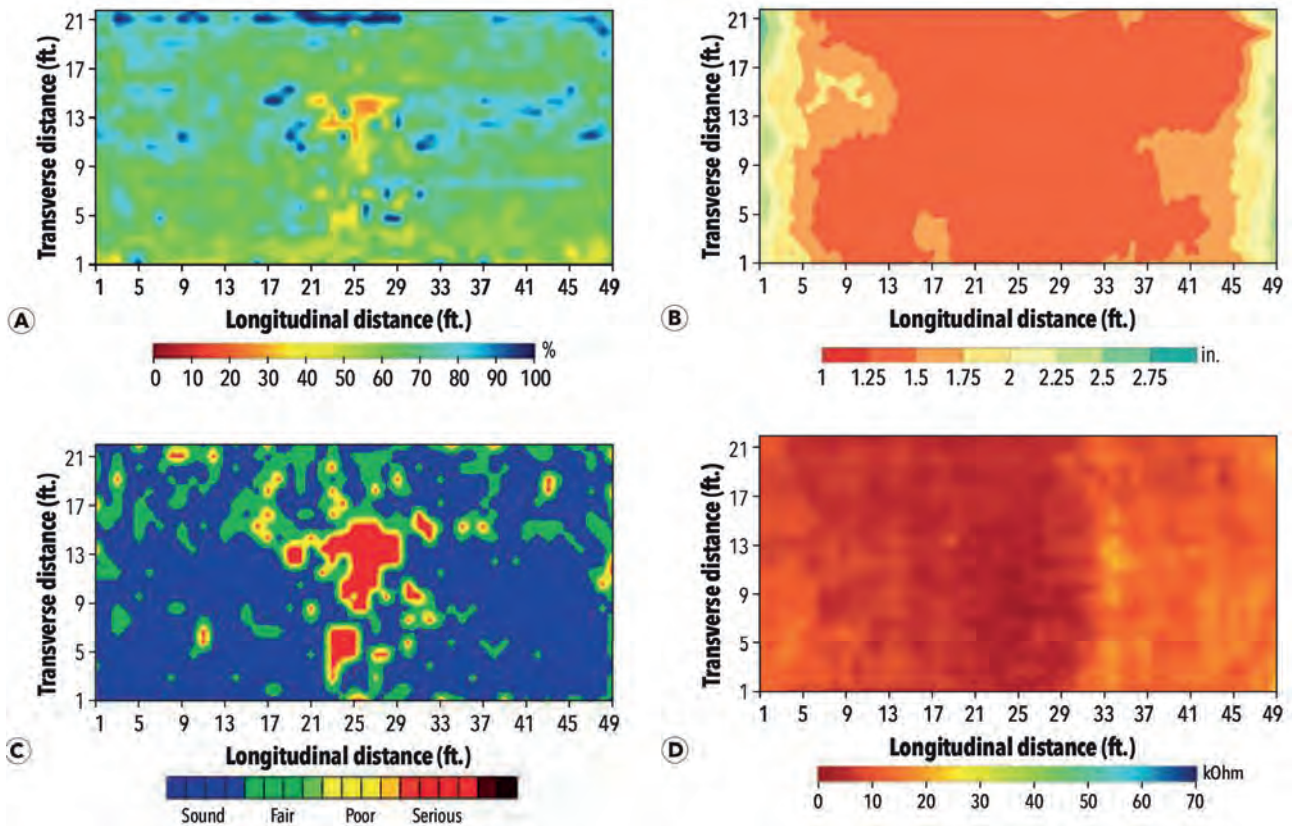


Figure 9. NDE maps for the BEAST slab: (a) degree of saturation; (b) concrete cover; (c) delamination; (d) electrical resistivity  
 Рис. 9. Карти NDE для плити BEAST: (a) ступінь насичення; (b) бетонне покриття; (c) розшарування; (d) електричний опір

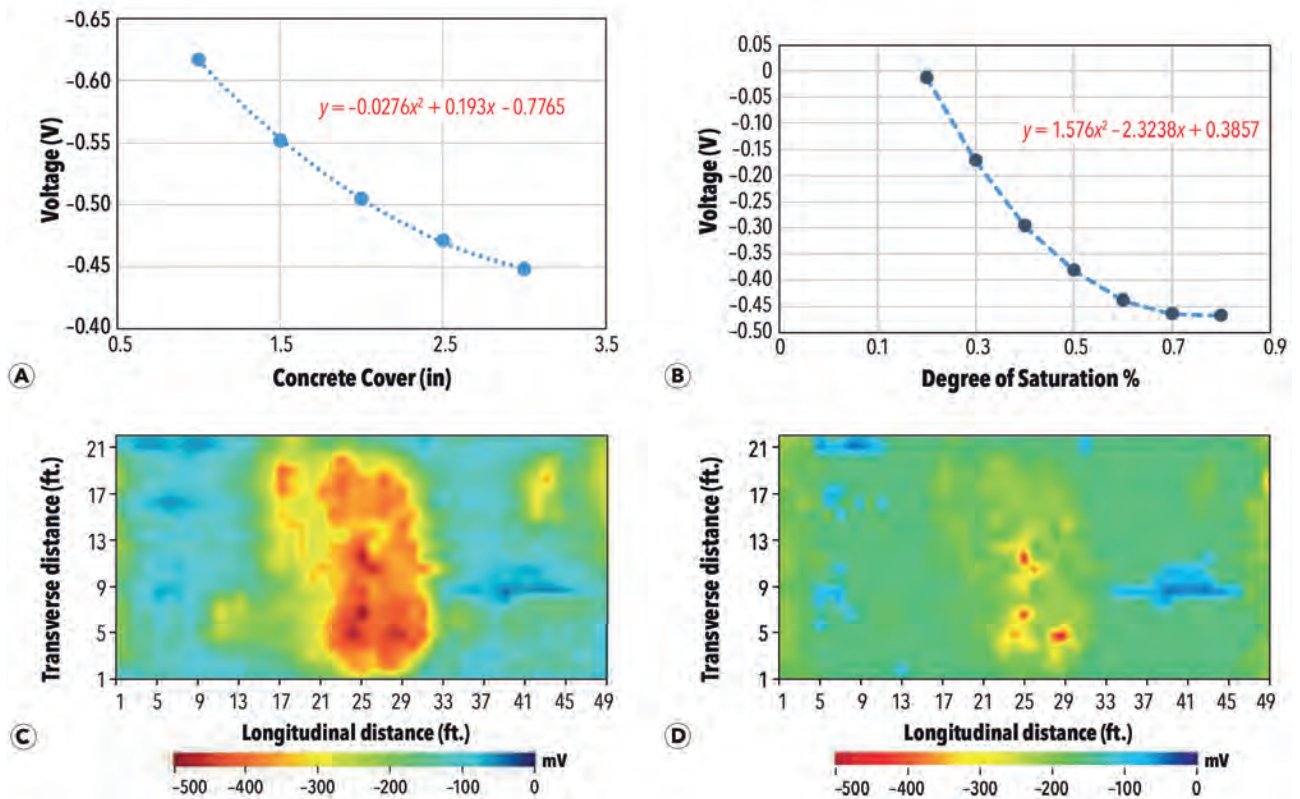


Figure 10. Improved HCP results interpretation: (a) calibration curves for concrete cover and (b) degree of saturation; and condition maps: (c) before and (d) after implementation of the algorithm  
 Рис. 10. Покращена інтерпретація результатів HCP: (a) калібрувальні криві для бетонного покриття та (b) ступінь насичення; і карти технічного стану: (c) до і (d) після впровадження алгоритму

has reduced the high potential voltages in the middle of the slab because this area has a thin concrete cover (25 to 38 mm, or 1 to 1.5 in.), as shown in Figure 9b, and also has a higher degree of saturation, as shown in Figure 9a. The reference model that was used to produce the algorithm is the model that has a 40% degree of saturation, a 50 mm concrete cover, and has no delamination as well as no corrosion in the reinforcement steel bar. In general, the algorithm has modified the HCP measurements by shifting the collected values to the right of the scale (fewer negative values), while the right and left edges had almost no changes in the potential values. The changes were primarily controlled by the effect of concrete cover thickness.

**Conclusion**

NDE will be essential for both the safety of bridges and their economic management. On the safety side, NDE technologies enable the detection and characterization of defects and deterioration on fracture-critical bridge members. On the bridge management side, periodical NDE surveys enable the development of more reliable deterioration, predictive and life-cycle cost models and, thus, timely implementation of preventive maintenance, rehabilitation, and repair. To achieve wide acceptance of NDE in the condition assessment and monitoring of bridges, improvements are needed in the speed of data collection, the ability to deploy NDE technologies on hard-to-reach bridge components, and the NDE data interpretation. The first two will lead to a significant reduction in NDE survey costs, traffic interruptions, and risks for the bridge inspectors and drivers, while the third will lead to an accurate interpretation of the condition. The presented robotic systems are illustrations of the potential for improvements in the speed of data collection, simultaneous deployment of multiple NDE technologies, reduction in the number of bridge inspectors needed to conduct NDE surveys, and accessibility of all bridge components. At the same time, the presented examples of enhanced visualization of NDE data and improved interpretation of NDE results through a joint analysis of results of multiple NDE technologies illustrate the potential for both more reliable and intuitive detection of defects and a more objective description of the condition.

**Acknowledgments**

Some of the presented work was funded by the Federal Highway Administration’s Long Term Bridge Performance (LTBP) Program and by Vingroup Joint Stock Co. and supported by Vingroup Innovation Foundation (VINIF) under project code VINIF.2020.NCUD.DA094.

**References**

AASHTO. 2011. AASHTO TP 95-11: Standard Test Method for Surface Resistivity Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Washington: AASHTO.

Almallah, N., and N. Gucunski. 2019. “Automated Detection and Visualization of Defects Using Constant Phase Data from Air-Coupled Impact Echo Testing of Concrete Decks,” *Proceedings of the 98th Annual Transportation Board Meeting, Washington, DC*.

ASCE. 2021. 2021 *Infrastructure Report Card, American Society of Civil Engineers (ASCE)*. infrastructurereportcard.org.

ASTM. 2015. ASTM C876-15: *Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Azari, H., D. Yuan, S. Nazarian, and N. Gucunski. 2012. “Sonic Methods to Detect Delamination in Concrete Bridge Decks: Impact of Testing Configuration and Data Analysis Approach,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2292* (1): 113–24. <https://doi.org/10.3141/2292-14>

Barnes, C.L., and J.F. Trottier. 2000. “Ground-penetrating Radar for Network-level Concrete Deck Repair Management” *Journal of Transportation Engineering* 126 (3): 257–62. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:3\(257\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:3(257))

Barnes, C., J.F. Trottier, and D. Forgeron. 2008. “Improved Concrete Deck Evaluation Using GPR by Accounting for Signal Depth-Amplitude Effects” *NDT & E International* 41 (6): 427–33. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.03.005>

Bien, J., L. Elfgrén, and J. Olofsson (eds.). 2007. *Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives, TIP3-CT-2003-001653* within the 6th Framework Programme of EU, ISBN 978-7125-161-0, Wrocław, Poland.

Daniels, D.J. (ed.). 2004. *Ground Penetrating Radar*. 1st ed. London: The Institution of Engineering and Technology.

De La Haza, A., A.A. Samokrutov, and P.A. Samokrutov. 2013. “Assessment of Concrete Structures Using the Mira and Eyecon Ultrasonic Shear Wave Devices and the SAFT-C Image Reconstruction Technique” *Construction & Building Materials* 38:1276–91. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.002>

Dinh, K., T. Zayed, F. Romero, and A. Tarussov. 2015. “Method for Analyzing Time-series GPR data of Concrete Bridge Decks” *Journal of Bridge Engineering* 20 (6): 04014086. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000679](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000679)

Dinh, K., N. Gucunski, J. Kim, and T.H. Duong. 2016. “Understanding Depth-Amplitude Effects in Assessment of GPR Data from Concrete Bridge Decks” *NDT & E Journal* 83: 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.06.004>

Dinh, K., N. Gucunski, and T. Zayed. 2019. “Automated Visualization of Concrete Bridge Deck Condition from GPR Data” *NDT & E International* 102: 120–28. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.11.015>

Dinh, K., and N. Gucunski. 2021. “Factors Affecting the Detectability of Concrete Delamination in GPR Images.” *Construction & Building Materials* 274: 121837. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121837>

Elsener, B.C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder, and M. Raupach. 2003. “Half-cell Potential Measurements - Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures” *Materials and Structures* 36 (Aug): 461–71. <https://doi.org/10.1007/BF02481526>

Gibson, A., and J.S. Popovics. 2005. “Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis” *Journal of Engineering Mechanics* 131 (4) 438–443. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:4\(438\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:4(438))

Goeller, A., and B. Jungstadt. 2018. “Mikrowellen-Feuchtescans an großen Bauwerken-Anwendungen des Mikrowellenscanners MOIST SCAN 100.” *Fachtagung Bauwerksdiagnose, Feb. 15–16, Berlin (DGZfP Bau-2018)*, NDT. net Issue: 2018-07.

Gowers, K.R., and S.G. Millard. 1999. “Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique.” *ACI Materials Journal* 96 (5): 536–42.

Gucunski, N., A. Imani, F. Romero, S. Nazarian, H Azari, H. Wigenhauser, P. Shokouhi, A. Taffe, and D. Kutrubes. 2013. *Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration, SHRP 2 Report S2-R06A-RR-1*, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Gucunski, N., B. Pailles, J. Kim, H. Azari, and K. Dinh. 2016. “Capture and Quantification of Deterioration Progression in Concrete Bridge Decks Through Periodical NDE Surveys.” *Journal*



- of *Infrastructure Systems*, 23 (1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000321)
- Gucunski, N., B. Basily, J. Kim, J. Yi, T. Duong, K. Dinh, S.-H. Kee, and A. Maher. 2017. "RABIT: Implementation, Performance Validation and Integration with Other Robotic Platforms for Improved Management of Bridge Decks." *International Journal of Intelligent Robotics and Applications* 1: 271–86. <https://doi.org/10.1007/s41315-017-0027-5>.
- Hornbostel, K., C.K. Larsen, and M.R. Geiker. 2013. "Relationship between Concrete Resistivity and Corrosion Rate – A Literature Review." *Cement and Concrete Composites* 39: 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- Kee, S.H., and N. Gucunski. 2016. "Interpretation of Flexural Vibration Modes from Impact-Echo Testing." *Journal of Infrastructure Systems* 22 (3): 04016009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000291](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000291)
- Kim, J., N. Gucunski, T.H. Duong, and K. Dinh. 2017. "Three-dimensional Visualization and Presentation of Bridge Deck Condition Based on Multiple NDE Data." *Journal of Infrastructure Systems* 23 (3): B4016012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000341](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000341)
- Kim, J., N. Gucunski, and K. Dinh. 2019. "Deterioration and Predictive Condition Modeling of Concrete Bridge Decks Based on Data from Periodic NDE Surveys." *Journal of Infrastructure Systems* 25 (2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000483](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000483)
- Maser, K.R., and W.M. Kim Roddis. 1990. "Principles of Thermography and Radar for Bridge Deck Assessment." *Journal of Transportation Engineering* 116 (5): 583–601. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1990\)116:5\(583\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1990)116:5(583)).
- Maser, K. and M. Bernhardt. 2000. "Statewide Bridge Deck Survey using Ground Penetrating Radar." *Structural Materials Technology IV - An NDT Conference, Atlantic City, NJ*.
- Maierhofer, C., A. Brink, M. Roellig, and H. Wiggenshauser. 2001. "Detection of Shallow Voids in Concrete Structures with Impulse Thermography and Radar." *Proceedings of the 9th Structural Faults & Repair Conference, London, United Kingdom*.
- Minor, M., H. Dulimarta, G. Danghi, R. Mukherjee, R. Lal Tummala, and D. Aslam. 2000. "Design, implementation, and evaluation of an under-actuated miniature biped climbing robot." *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)* (Cat. No.00CH37113), pp. 1999–2005 vol. 3. <https://doi.org/10.1109/IROS.2000.895264>
- Nazarian, S., M. Baker, and S. Reddy. 1994. "Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Second Volume." STP 1198, 473–487. Philadelphia, PA.: ASTM Publication. <https://doi.org/10.1520/STP181655>
- Nguyen, S.T., and H.M. La. 2019. "Roller Chain-Like Robot For Steel Bridge Inspection." *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMI-9), St. Louis, MO*.
- Nguyen, S.T., and H.M. La. 2021. "A Climbing Robot for Steel Bridge Inspection." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 102 (4): 75. <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01266-1>
- Nguyen, A., G. Klysz, F. Deby, and J.-P. Balayssac. 2017. "Evaluation of Water Content Gradient using a New Configuration of Linear Array Four- Point Probe for Electrical Resistivity Measurement." *Cement and Concrete Composites* 83: 308–22. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.020>
- Nguyen, S.T., A.Q. Pham, C. Motley, and H.M. La. 2020. "A Practical Climbing Robot for Steel Bridge Inspection." *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 9322–9328, <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196892>
- Pashoutani, S., J. Zhu, C. Sim, B. Mazzeo, and S. Guthrie. 2020. Development and Implementation of a Moving Nondestructive Evaluation Platform for Bridge Deck Inspection, Report SPR-P1(17) M075, Nebraska DOT.
- Raupach, M., K. Reichling, H. Wiggenshauser, M. Stoppel, G. Dobmann, and J. Kurz. 2009. "BETOSCAN 0 An Instrumented Mobile Robot System for the Diagnosis of Reinforced Concrete Floors." *Proc. 2nd Intl. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, ICCRRR-2, November 24-26, 2008, Cape Town, South Africa, CRC Press*, 651-655.
- Robles, K. P. V., J.-J. Yee, and S.-H. Kee. 2022. "Electrical Resistivity Measurements for Nondestructive Evaluation of Chloride-Induced Deterioration of Reinforced Concrete-A Review." *Materials (Basel)* 15 (8): 2725. <https://doi.org/10.3390/ma15082725>
- Rupnow, T.D., and P.J. Icenogle. 2012. "Surface Resistivity Measurements Evaluated as Alternative to Rapid Chloride Permeability Test for Quality Assurance and Acceptance." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2290 (1): 30–37. <https://doi.org/10.3141/2290-04>
- Sansalone, M., and N.J. Carino. 1989. "Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using the Impact-Echo Method." *ACIMaterials Journal* 86 (2): 175–84.
- Sun, H. B., J.Y. Zhu, and S.Y. Ham. 2018. "Automated Acoustic Scanning System for Delamination Detection in Concrete Bridge Decks." *Journal of Bridge Engineering* 23 (6): 04018027. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001237](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001237)
- Tarussov, A., M. Vandry, and A. De La Haza. 2013. "Condition Assessment of Concrete Structures using a New Analysis Method: Ground-Penetrating Radar Computer-Assisted Visual Interpretation." *Construction & Building Materials* 38:1246–54. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.026>
- Tirthankar, B., S. Ryan, T. Fletcher, K. Navinda, D. Ross, W. Brett, B. James, H. Karsten, and E. Alberto. 2018. "Magneto: A Versatile Multi-Limbed Inspection Robot." *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain*, pp. 1–5.
- Washer, G., R. Fenwick, N. Bolleni, and J. Harper. 2009. "Effects of Environmental Variables on Infrared Imaging of Subsurface Features of Concrete Bridges." *Transportation Research Record* 2108 (1): 107–114. <https://doi.org/10.3141/2108-12>
- Zhu, J., and J.S. Popovics. 2007. "Imaging Concrete Structures Using Air-Coupled Impact Echo." *Journal of Engineering Mechanics* 133 (6): 628–40. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:6\(628\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:6(628))

Premission to Reprint 08.02.2023:

The American Society for Nondestructive Testing, Inc.

CITATION

*Materials Evaluation* 81(1): 56-66

<https://doi.org/10.32548/2023.me-04289>

©2022 American Society for Nondestructive Testing

НОВА КНИГА



**Welding and Joining of Aerospace Materials**

Editor: Mahesh Chaturvedi

eBook ISBN: 9780128191415

Paperback ISBN: 9780128191408

Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies

Welding and Joining of Aerospace Materials, Second Edition, is an essential reference for engineers and designers in the aerospace, materials, welding and joining industries, as well as companies and other organizations operating in these sectors. This updated edition brings together an international team of experts with updated and new chapters on electron beam welding, friction stir welding, weld-bead cracking, and recent developments in arc welding.

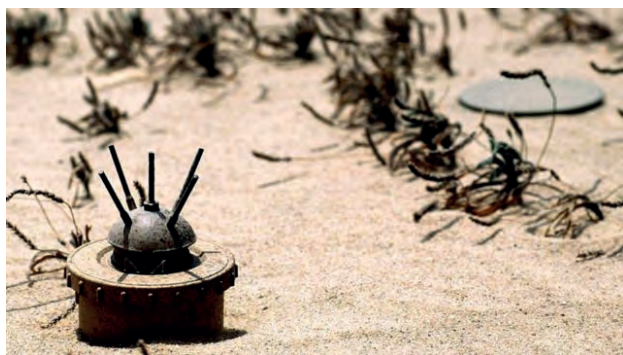


Від редакції

*В Україні заміновано 250 тис. км<sup>2</sup> території – повідомив прем'єр-міністр України Денис Шмигаль. Він також зазначив, що Київ сподівається на допомогу та досвід Південної Кореї у розмінуванні такої величезної території.*

## СМЕРТЕЛЬНА НЕБЕЗПЕКА, ЯКУ ВИ НЕ БАЧИТЕ

Багато країн заборонили використання мін, але мільйони цих боєприпасів продовжують чатувати на нічого не підозрюючих жертв. Методи, які використовуються для їх пошуку та боротьби з ними, змушені йти в ногу з їх дедалі більшою складністю.



Зображення: Science Photo Library

«Небезпека: мінне поле» — це два слова, які мають майже неперевершену силу, щоб зупинити вас на шляху. Але не Пола Геслопа. Геслоп є керівником програм Служби ООН з протимінної діяльності (Unmas), робота якої пов'язана з розмінування у 18-ти країнах, і сам є сапером.

«Якщо розмінування і схоже на будь-яку професію, то це археологія, тому що це спокійна, повільна, повторювана робота», — каже Геслоп, який почав знешкоджувати міни 23 роки тому. Він каже, що їхати на мінне поле небезпечніше, ніж розмінувати. «Ми використовуємо металошукач, щоб з'ясувати, де знаходиться міна, а потім скрепки та щипці, щоб ретельно її викопати. Хороший сапер може знайти одну міну на тиждень».

За деякими оцінками загальне число цих смертельно небезпечних пристроїв, які до сих пір за-



Знешкодження мінних полів вимагає багато часу та зусиль (зображення: Getty Images)

ховані під землею в 60-ти країнах світу, може досягати 110 мільйонів. Однак точна їх кількість нікому не відома, тому що деякі з цих мін можуть бути з часів Другої світової війни, а відомості про місце їх розташування втрачено.

Вважають, що Афганістан є країною, яка має найбільшу кількість мін. Однак величезну кількість все ще можна знайти в таких країнах як Камбоджа, Лаос, Боснія та Ангола. І протипехотні міни продовжують використовуватися в таких гарячих точках, як М'янма, Лівія та Сирія, у тому числі угрупованнями на кшталт «Ісламська держава».

Через ці конфлікти кількість чоловіків, жінок і дітей, загиблих і, частіше, покалічених, від мін знову почала зростати. У 2015 р. близько 6500 людей загинули або отримали поранення від мін у всьому світі. Більшість жертв були цивільними особами, а приблизно третина — діти.

Незважаючи на ці проблеми, можливо все ж таки очистити будь-яку країну від мін. Просто це займає багато часу. Так, після 22-ти років напруженої роботи у 2015 р. Мозамбік було оголошено вільним від мін. Понад 200 тис. мін було вилучено або знищено з 17 мільйонів квадратних миль площі.

Сьогодні більшість заходів з розмінування підтримують або проводять такі гуманітарні організації, як Unmas або Halo Trust. Після завершення конфлікту їх завданням є навчити місцевих жителів використовувати металошукачі, щоб допомогти знаходити, а потім знешкоджувати міни. Техніка знешкодження менш драматична, ніж показують у кіно. Замість того, щоб прокладати шлях через мінне поле за допомогою вибухів — традиційний військовий підхід до розмінування — метою гуманітарної організації є 100 %-е очищення від мін, що є набагато складнішим. Часто кажуть, що єдина річ, яка гарантує, що територія повністю очищена від мін, це те, що сапер вийде тим самим шляхом, яким він або вона зайшли.

Велика кількість мін часто використовується для захисту військових позицій замість солдатів. На відміну від вартового, міни ніколи не потрібно спати. І подібно до стін і ровів замку, мінні поля можна використовувати, щоб скерувати атакуючу армію в смертельно небезпечну зону ураження. І лише кілька мін потрібно розкидати в полі або в



Навіть однієї ймовірності того, то мінна загроза існує, може бути достатньо, щоб перетворити територію на заборонену зону (зображення: iStock)

лісі, щоб перетворити родючу землю на зарослу пустку. Навіть загроза наявності міни є потужним стимулом для людей триматися подалі від цього місця.

Технології розмінування постійно змінювалися, оскільки самі міни постійно оновлювалися.

Точно встановити, коли вперше відбулось використання чогось, що ми б визнали міною, наразі навряд чи вдасться. Відомо лише, що міна могла бути вперше використана ще в третьому столітті нашої ери в Китаї. У 1277 р. генерали Імператорського Китаю, безумовно, використовували міни проти монгольських орд, які вторглися в їхню країну. Переважно ці міни були примітивними, але деякі з них спрацьовували в момент, коли на них наступав кінь із вершником. Знадобилося ще триста років, перш ніж іспанський солдат на ім'я Педро Наварро використав першу протипіхотну міну в Європі.

Першу сучасну міну було створено під час громадянської війни в США. Натхненний простими вибуховими мінами-пастками, генерал Габріель Джей Рейнс розробив протипіхотну міну для захисту позицій від чисельно переважаючої армії Конфедерації в битві за Йорктаун у 1862 р. Потім німецькі військові вдосконалили конструкцію Рейнса за декілька років до Першої світової війни і тактика військових дій змінилася назавжди. Технологію виготовлення мін було дуже швидко скопійовано в інших арміях.

У наступні роки протипіхотні міни ставали все небезпечнішими. Під час Другої світової війни німці розробили S-міну. Вона була відомою як «підстрибуюча Бетті», тому що коли спрацьовувала, то підлітала приблизно на метр у повітря, вибухала та розсипала осколки на всі боки. Американська міна «Клеймор» сумно відома тим, що на її корпусі написано «фронтом до ворога». Цією міною можна керувати дистанційно і вона вибухає в одному напрямку, розсипаючи осколки, як з рушниці.

Сьогодні протипіхотні міни все ще використовуються у звичайній війні державами, які не є

учасниками Договору про заборону мін (Бенедикт Вілсон, Королівський коледж Лондона).

З появою під час Першої світової війни на західному фронті перших танків з'явилися і перші саморобні протитанкові міни. А до кінця війни німці почали масово випускати дерев'яну міну «Flachmine 17». У 1929 р. в Німеччині було розроблено першу сучасну протитанкову фугасну міну. Це була «Tellermine 29» у формі літаючої тарілки, яка стала прототипом для цілих поколінь мін.

У міру того, як міни ставали складнішими і їх ставало більше, потреба в їх знешкодженні ставала дедалі гострішою. Одним із перших способів розмінування був «Мінний трал», створений у Франції в 1918 р. – плуг був прикріплений до передньої частини танка. Випробовувалися й інші методи, засновані на використанні танків, у тому числі танк-тральщик, який підриває міни попереду за допомогою обертових металевих ланцюгів, з великим успіхом використовувався союзними військами під час висадки в Нормандії. Сьогодні подібна система під назвою «Aardvark» все ще використовується при розмінуванні.

Однак треба було змінювати не лише технологію розмінування. Пристрої для пошуку мін також повинні були ставати все досконалішими. Легендарний портативний міношукач був винайдений польським офіцером Йозефом Косацьким перед вторгненням Німеччини в Польщу в 1939 р., а потім потайки вивезений перед капітуляцією Польщі. Вперше він був використаний для розмінування мінних полів у Ель-Аламейні в Лівії під час кампанії в Північній Африці та залишається на сьогодні основним засобом розмінування.

Подібно до детекторів, які використовуються для пошуку золотих виробів залізного віку, ці детектори використовують електричний струм для генерації магнітного поля, яке, якщо провести над шматком металу, створює інше магнітне поле. Це друге поле вловлюється детектором і створює шум. Чим ближче до об'єкта, тим гучніший шум. Детектори, на жаль, працюють краще в деяких типах ґрунту, ніж в інших, і можуть лише сказати, де



Трал з ланцюгами, який обертається потужним двигуном, був ефективним методом розмінування (зображення: iStock)



знаходиться шматок металу, а не чим він є. У результаті вони дають багато помилкових сигналів.

Останніми роками було докладено спільних зусиль щодо заборони мін, але міни ще не відійшли у небуття. У 1997 р. Договір про заборону мін заборонив виробництво, накопичення та використання протипіхотних мін 162 країнами, які підписали цей акт. Хоча це зменшило кількість мін, що використовуються, для тих, хто цього не зробив, все залишилося як було. Такі великі виробники зброї, як США, Росія та Китай, все ще зберігають величезні запаси мін. Індія, М'янма, Пакистан і Південна Корея все ще виробляють їх, а інші країни залишають за собою таке право.

«Сьогодні протипіхотні міни все ще використовуються у воєнних діях державами, які не є учасниками Договору про заборону мін», – каже д-р Бенедикт Вілкінсон, старший науковий співробітник Інституту політики Королівського коледжу Лондона. «Застарілі міни, які залишилися з попередніх конфліктів, продовжують завдавати серйозної шкоди цивільному населенню, а недержавні збройні угруповання, такі як ІДІЛ, замість мін використовують різні типи саморобних вибухових пристроїв (СВП)».

«Щоб зрозуміти загрозу, яку становлять СВП, ви повинні зрозуміти, що вони є вибором людей, які не мають вибору», – каже генерал-майор Джонатан Шоу, колишній командувач британськими силами в Іраку та Афганістані, а нині голова «Optima», яка спеціалізується на знешкодженні СВП. «Коли йдеться про стандартну протипіхотну міну, достатньо виявити одну з них, щоб зрозуміти, з яким типом пристроїв доведеться мати справу. Однак коли справа доходить до цих локалізованих мін, виготовлених з будь-яких компонентів, які вони можуть знайти, про це можна забути».

Металощукачі, подібні до детектора Геслопа, може і стали потужнішими та продуктивнішими, ніж їх найперші попередники, але солдати того періоду все одно змогли б їх упізнати. Однак використовуються й інші технології, які, безумовно, більше відповідають вимогам ХХІ сторіччя. У Манчестерському університеті професор Ентоні Пейтон зайнятий пошуком приміщення, де розміститься новий сучасний Центр міжнародних досліджень із знешкодження мін і вибухівки («Circle») вартістю 5,5 млн. фунтів стерлінгів. Незабаром власний проєкт Пейтона – «Semis», який має на меті перетворити металощукач на пристрій для розпізнавання та класифікації мін, має розпочати випробування.

«Ми використовуємо металощукачі з тих пір, як їх винайшли під час Другої світової війни, і вони все ще є домінуючим пристроєм, який ви-



Під час Другої світової війни технологія розробки мін швидко розвивалася, коли їх було закладено багато мільйонів (зображення: iStock)

користується суспільством», – каже Пейтон. – «Населення їх добре знає та розуміє, але вони мають досить значні обмеження. Те, що ми намагаємося зробити в «Circle» і програмі «Semis», це розробити найкращу електромагнітну технологію, а потім поєднати її з іншими технологіями, такими як георадар, комерційні шлеми віртуальної реальності, камери в шоломах і дрони».

Сьогодні британська армія використовує систему розриву мін «Python», яка стріляє шлангом, начиненим вибуховою речовиною великої руйнівної сили, на мінне поле, де вона вибухає і тим самим викликає детонацію мін. У деяких країнах собак регулярно використовують для пошуку мін через чутливість їхніх носів до хімічних речовин, що входять до складу вибухівки, хоча їхня ефективність часто залежить від їхнього зв'язку з інструкторами.

Одним з найбільших нововведень за останні 10 років є кріплення георадара до металощукача. Однак цей коштовний пристрій лише зараз переходить від військових до цивільного населення і має ті ж обмеження, що й металощукачі, оскільки він генерує помилкові показники та за його допомогою оператор не може з'ясувати, який саме об'єкт знайдено.

«У минулому не бракувало інновацій. Просто збільшення площі мінних полів у 1960-х, 70-х і 80-х роках зробило цю проблему актуальнішою», – каже Лу МакГрат, генеральний директор «Find a Better Way». Це благодійна організація, заснована британським футбольним героєм сером Боббі Чарльтоном для фінансування досліджень з розмінування, і яка фінансує «Circle» і «Semis». «Хоча багато нових технологій у минулому було досить непоганими, вони не дозволяли повністю розчистити землю».

«Ми з'ясували, що єдиний спосіб гарантувати 100 %-е очищення ділянки – це очищення вручну. Ніхто не віддасть своїх дітей до школи, яка лише на 95 % розмінована».

«Якщо територією пройшов тільки мінний трал, я, звичайно, нізащо не піду туди», – додає





У найбідніших країнах розмінування часто проводять вручну місцеві жителі (зображення: iStock)

МакГрат. «Неурядові організації використовували трали, але вони можуть пропустити міни, тому важко сказати, що вони очистили все на 100 %. Трала є корисними тільки для швидкого очищення певної частини території».

«Окрім проекту «Semis», ми займаємось дослідженнями в області доповненої реальності», каже Ентоні Пейтон. «Споживчі пристрої віртуальної реальності зараз розвиваються шаленими темпами і ми сподіваємося, що такі пристрої, як «Halo», допоможуть у реалізації гуманітарних програм».

«На сьогодні також важко сказати, чи оператори сканують детектором саме ту зону, яка потріб-

на. На шоломі сапера можна встановити камеру та GPS, що дозволяє бачити те, що бачить він, і знати, де він знаходиться».

«Всі ці дані потім можуть бути передані тому, хто знаходиться на відстані 100 м або навіть на іншій частині світу. Для аналізу даних, зібраних саперами, можна навіть використовувати методи штучного інтелекту».

Дослідники вже намагаються забезпечити дрони тепловізійними камерами, оскільки міни можуть виглядати як гарячі точки в землі. Дрони намагаються перетворити на літаючі металодетектори з власним георадаром.

«Можливо, ви можете використовувати безпілотник?» – каже Пейтон. «Ймовірно, досить легко підірвати міну, і навіть якби це вдалося, ви були б на безпечній відстані. Зрештою, якщо все, що зрештою робить сапер, це тримає детектор на кінці палиці, чому машина не може це зробити?»

Однак для Геслопа дешевші інновації в розмінуванні вже впливають на його роботу. Використання супутникових зображень для виявлення мінних полів означає, що навіть Афганістан, найбільш заміновану країну в світі, можна буде розчистити до 2023 р.

Mark Piesing, BBC Future, 2017

<https://www.bbc.com/future/article/20170321-the-deadly-danger-you-cant-see>

## Розмінування Київщини

(фото з відкритих джерел)



Редакція запрошує читачів долучитися до фахового обговорення цієї важливої для країни теми на сторінках журналу

## ІСТОРІЯ ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТА НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ»

Міжнародний науково-технічний журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» було засновано Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України у 1989 р.



Появі журналу передував випуск щорічної Республіканської міжвідомчої збірки наукових праць «Діагностика і прогнозування руйнування зварних конструкцій» (ISSN 0234-4874), перший номер якої вийшов наприкінці 1985 р. Загалом за період 1985–1988 рр. було видано 7 номерів збірки, у яких розміщено

132 наукові публікації з теорії, методів і засобів неруйнівного контролю. Цікаво, що тематика збірок чергувалася, тому питанням розробки теоретичних основ оцінки та прогнозування міцності зварних конструкцій, практичного застосування результатів теорії при створенні обладнання та методик контролю в лабораторіях і на виробництві присвячено перший, третій, п'ятий і сьомий випуски, а питанням, пов'язаним із вдосконалення технологій, методів і засобів неруйнівного контролю зварних з'єднань, пошуку шляхів підвищення достовірності неруйнівних випробувань, оптимальних параметрів апаратури та методикам виявлення дефектів різних типів – другий, четвертий та шостий відповідно. Кожен з випусків розійшовся тисячним накладом.

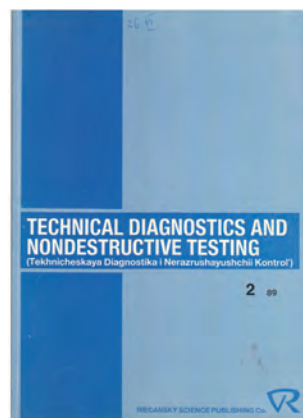
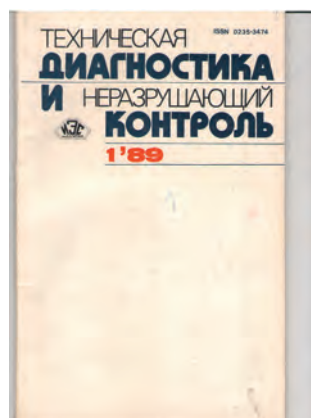
У 80-90-х рр. 20 ст. розпочинає інтенсивно розвиватися новий науковий напрямок – технічна діагностика та неруйнівні методи контролю. Основною задачею цього напрямку стає створення теорії, методів і засобів оцінки технічного стану та прогнозування несучої здатності експлуатаційних конструкцій і об'єктів народного господарства. Тому поява журналу «Технічна діагностика та неруйнівний кон-

троль» була продиктована об'єктивними потребами ринку в оперативній та актуальній інформації зі світу технічної діагностики конструкцій та їх неруйнівного контролю. Так, у грудні 1989 р. виходить друком перший номер щоквартального Всесоюзного науково-теоретичного журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» (ISSN 0235-3474), ініціатором і головним редактором якого стає академік Б.Є. Патон. За збігом обставин підпис до друку першого номеру журналу здійснено фактично до 70-річчя Б.Є. Патона. В опублікованому у ньому зверненні редакційної колегії до читачів зазначено, що «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» має собі за мету розширити обмін досвідом у сфері розробки та застосування теорії, методів діагностики та неруйнівного контролю. Збірка реорганізовується в журнал для подальшого підвищення ефективності досліджень, розробок, впровадження нових методів, апаратури технічної діагностики та неруйнівних методів контролю для ширшої і оперативнішої публікації матеріалів у цій сфері. До середини 2001 р., продовжуючи традицію попередньої збірки, журнал спеціалізується за наступними науковими напрямками: непарні номери присвячено технічній діагностиці, парні – неруйнівному контролю.

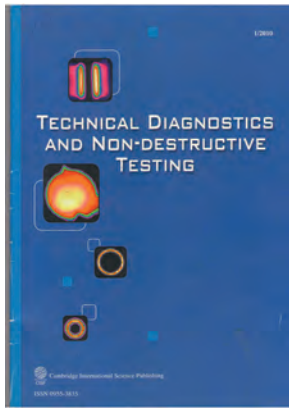
З 1989 р. журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» перевидається в повному обсязі англійською мовою у Кембриджі (Велика Британія) фірмою «Riecanaky Science Publishing Co» під назвою «Technical Diagnostics and Nondestructive Testing» (ISSN 0955-3835).

У 1995 р. журнал починає перевидаватися англійською мовою у Нью-Йорку (США) фірмою «Backbone Publishing Company» під назвою «Technical Diagnostics and NDT» (ISSN 0955-3835), але вже з 1996 р. перекладом на англійську мову та виданням журналу знову займається «Riecanaky Science Publishing Co».

Починаючи з 2010 р. та до, ймовірно, середини 2014 р. англійськомовний журнал







«Технічна діагностика та неруйнівний контроль» у повному обсязі перевидається у Великій Британії видавцем «Cambridge International Science Publishing» (CISP) під назвою «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» (ISSN 0955-3835).

Характерним є те, що англійські аналоги журналу мали наскрізну нумерацію сторінок протягом одного року, а вітчизняні журнали – одного номеру.

З 2021 р. статті з журналу вибірково перевидуються англійською мовою в журналі «The Paton Welding Journal».

5 жовтня 2022 р. на засіданні Президії НАН України головним редактором журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» було затверджено академіка НАН України Л.М. Лобанова.

У наукових публікаціях журналу висвітлюються підходи до вирішення проблеми забезпечення безпеки експлуатації машин, конструкцій і споруд. Значна увага приділяється сфері досліджень неруйнівного контролю з особливим акцентом на зварні з'єднання та конструкції. У журналі представлено останні досягнення в галузі технічної діагностики та неруйнівного контролю (акустичні, магнітні, вихрострумові, радіохвильові, термічні, оптичні, радіаційні) і методи для оцінки та прогнозування міцності зварних конструкцій. На сторінках журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» можна зустріти обговорення державних стандартів з метою приведення у відповідність національних науково-технічних документів до міжнародних норм, технічні характеристики нових приладів, результати новітніх розробок у галузі неруйнівного контролю, анонси та результати науково-технічних конференцій, тематичних семінарів, виставок, симпозіумів, рецензії на наукові видання, інтерв'ю з провідними фахівцями тощо.

Редакція журналу дотримуєть-

ся політики відкритого доступу Open Access відповідно до Будапештської ініціативи відкритого доступу та надає доступ до повних текстів публікацій в мережі Інтернет (<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>).

Також архіви журналу представлено в міжнародних наукометричних базах даних Scopus (США, 2005 р.), Google Scholar (США, з 1982 р. у пристатейних бібліографічних списках літератури та цитуваннях), EBSCO (США, з 2013 р.), ULRICH'S Periodicals Directory (США, з 2016 р.) та реферується в українському реферативному журналі «Джерело» (Україна, з 1995 р.), який представлено в Науковій електронній бібліотеці періодичних видань НАН України (Україна, з 1995 р.) та в електронній реферативній базі «Україніка наукова» (Україна, з 1995 р.). Архіви журналу за 2001-2018 рр. представлено в Науковій електронній бібліотеці періодичних видань НАН України ([dspace.nbuv.gov.ua](http://dspace.nbuv.gov.ua)). З 2015 р. журнал індексується агентством Crossref (США), присвоюючи цифрові ідентифікатори DOI (Digital Object Identifier) кожній опублікованій науковій статті.

Журнал входить до реєстру наукових фахових видань України, затвердженого Міністерством освіти і науки України, у яких можуть бути опубліковані результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та доктора філософії в галузі технічних наук (Наказ МОН України №409 від 17.03.2020 р.).

Журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» сьогодні – це періодичне міжнародне фахове науково-технічне видання, у якому висвітлюються актуальні проблеми діагностики матеріалів і конструкцій, автоматизації та приладобудування, теорії, методів і засобів технічної діагностики та результати досліджень у цих галузях. Видавцем журналу нині є Міжнародна Асоціація «Зварювання». Журнал досі виходить 4 рази на рік і поширюється переважно через оформлення передплати. За роки свого існування він зазнав трансформацій відповідно до вимог часу, але не змінив своєї головної початкової місії – всесторонньо сприяти розвитку теорії і практики з проблем технічної діагностики та неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій. Тематична спрямованість журналу дає уявлення про основні напрями та послідовні тенденції розвитку цієї галузі в Україні та за її межами.

*Завідувачка науково-технічною бібліотекою  
ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України  
Світлана Іваненко*







## Міжгалузевий учбово-атестаційний центр Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України Програми професійної підготовки на 2023 р.



Шифр курсу	Найменування програми		Тривалість	Строки проведення		
<b>1. Підвищення кваліфікації інженерно-технічних працівників</b>						
101	Підтвердження професійної компетентності координаторів (керівників) зварювальних робіт згідно ДСТУ ISO 14731 «Координація зварювальних робіт. Завдання і функції»		сертифікація	3 тижня (112 г)	березень, жовтень	
102			ресертифікація	24 г	травень, липень, листопад	
103	Розширення області сертифікації координаторів (керівників) зварювальних робіт			6 г	жовтень	
106	Технічне керівництво зварювальними роботами при ремонті діючих трубопроводів (під тиском)		підготовка і атестація	2 тижня (72 г)	за узгодженням з замовником	
107			переатестація	22 г		
109	Технічне керівництво роботами по контактному стиковому зварюванню залізничних рейок.			72 г	лютий-грудень	
111	Підготовка і атестація голів комісій з атестації зварників - експертів Українського атестаційного комітету зварників (УАКЗ)			3 тижня (112 г)	квітень, грудень	
112	Розширення області атестації голів комісій з атестації зварників – експертів УАКЗ (згідно НПАОП 0.00-1.16-96)			8 г	травень, грудень	
1121	Розширення повноважень експертів УАКЗ на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1			32 г	червень	
1122	Розширення повноважень експертів УАКЗ на право атестації зварників пластмас згідно ДСТУ EN 13067			72 г	травень	
113	Підготовка і атестація членів комісій по атестації зварників:	фахівців технологічних служб, відповідальних за організацію атестації зварників		2 тижня (72 г)	по мірі комплектування груп	
114		фахівців служб технічного контролю, відповідальних за контроль зварних з'єднань (включаючи спеціальну підготовку до атестації по візуально-оптичному методу контролю)		2 тижня (74 г)		
115		фахівців служб охорони праці підприємств		2 тижня (74 г)		
116	Розширення області атестації членів комісій по атестації зварників – фахівців технологічних служб по зварюванню (згідно НПАОП 0.00-1.16-96)			6 г	травень	
117	Розширення повноважень членів комісій по атестації зварників – фахівців технологічних служб по зварюванню на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1			32 г	по мірі комплектування груп	
118	Розширення повноважень членів комісій по атестації зварників – фахівців з технічного контролю на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1			24 г		
119	Підтвердження повноважень (переатестація) голів комісій з атестації зварників - експертів УАКЗ з розширенням повноважень на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1			32 г	січень, березень, травень, жовтень, листопад	
120	Підтвердження повноважень (переатестація) членів комісій по атестації зварників:	фахівців технологічних служб по зварюванню з розширенням повноважень на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г	січень, березень, травень, жовтень	
121		фахівців з технічного контролю		16 г		
122		фахівців з технічного контролю (включаючи спец. підготовку до атестації по візуально-оптичному методу контролю)		36 г		
123		фахівців з охорони праці		16 г		
130	Перепідготовка фахівців зварювального виробництва по програмах Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) із присвоєнням кваліфікації:	Міжнародний інженер із зварювання		453/ 128 г <sup>1</sup>	квітень, листопад	
132		Міжнародний технолог із зварювання		372/91 г <sup>1</sup>		
134		Міжнародний спеціаліст із зварювання		248/60 г <sup>1</sup>		
135		Міжнародний практик із зварювання		114 г		
136		Міжнародний дизайнер (конструктор) із зварювання	повного рівня		230 г	за узгодженням з МІЗ
137			стандартного рівня		170 г	
140			базового рівня		115 г	
139	Міжнародний інспектор із зварювання	фахівців, які мають кваліфікацію «Міжнародний інженер / технолог із зварювання»		76/78 г	вересень	
141	Металографічні дослідження металів і зварних з'єднань		спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (72 г)	липень	
142			переатестація	22 г	квітень, липень, вересень	
143	Фізико-механічні випробування матеріалів і зварних з'єднань		спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (72 г)	по мірі комплектування груп	
144			переатестація	20 г		
145	Емісійний спектральний аналіз (стилоскопіювання) металів і сплавів		спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (74 г)	за узгодженням з замовником	
146			переатестація	22 г		
151	Виробництво зварювальних матеріалів: організація, технології і системи управління якістю			2 тижня (72 г)		

<b>Тематичні семінари</b> (можливе проведення на території замовника)			
161	Нормативно-технічна документація у зварювальному виробництві, стан і перспективи	2 дні (16 г)	березень, червень, жовтень
162	Забезпечення якості зварювання. Вимоги національних і міжнародних стандартів	2 дні (16 г)	квітень, червень, жовтень
163	Виготовлення конструкцій із сталі згідно вимог ДСТУ EN 1090	32 г	лютий

## 2. Підвищення кваліфікації педагогічних працівників системи професійної освіти в галузі зварювання

203	Підвищення кваліфікації майстрів (інструкторів) виробничого навчання із зварювання	110 г	за узгодженням з замовником
204	Підвищення кваліфікації викладачів спеціальних дисциплін професійно-технічних навчальних закладів по напрямку «Зварювання»	40 г	

## 3. Професійна підготовка, перепідготовка і підвищення кваліфікації кваліфікованих робітників в галузі зварювання і споріднених технологій (з присвоєнням кваліфікації відповідно до національної і міжнародної кваліфікаційних систем)

<b>Курсова підготовка ЗВАРНИКІВ:</b>			
301	ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	9 тижнів (356 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
302	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	5 тижнів (192 г)	
304	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	7 тижнів (276 г)	
306	автоматичного дугового зварювання під флюсом / в захисних газах	3 тижня (112 г)	
308	контактного (пресового) зварювання рейок з атестацією відповідно ДСТУ EN 14732	3 тижня (112 г)	
309	пластмас (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб) з атестацією відповідно до ДСТУ EN 13067	5 тижнів (196 г)	
<b>Підготовка зварників по програмах Міжнародного інституту зварювання із присвоєнням кваліфікації:</b>			
310	Міжнародний зварник кутових швів (IFW) з атестацією по EN ISO 9606-1	130 – 210 г <sup>2</sup>	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
312	Міжнародний зварник плоских з'єднань (IPW) з атестацією по EN ISO 9606-1	250 – 380 г <sup>2</sup>	
315	Міжнародний зварник труб (ITW) з атестацією по EN ISO 9606-1	360 - 510 г <sup>2</sup>	
318	Міжнародний практик-зварник (IWP) з атестацією по EN ISO 9606-1	35 - 153 г <sup>2</sup>	
<b>Перепідготовка ЗВАРНИКІВ із присвоєнням кваліфікації «Міжнародний зварник»: (IFW, IPW, ITW)</b>			
321	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г <sup>2</sup>	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
322	перепідготовка зварників механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г <sup>2</sup>	
323	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г <sup>2</sup>	
<b>Підвищення кваліфікації ЗВАРНИКІВ:</b>			
330	ручного дугового зварювання покритими електродами	2 тижня (72 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
331	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах	2 тижня (72 г)	
333	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG)	2 тижня (72 г)	
334	механізованого дугового зварювання порошковим дротом	2 тижня (72 г)	
<b>Курсова підготовка контролерів неруйнівного контролю:</b>			
343	Спеціалізація – візуально-оптичний контроль	72/196 г <sup>3</sup>	індивідуальна підготовка за узгодженням з замовником
344	Спеціалізація – радіографічний контроль	72/196 г <sup>3</sup>	
345	Спеціалізація – ультразвуковий контроль	72/196 г <sup>3</sup>	
346	Спеціалізація – магнітопорошковий контроль	72/196 г <sup>3</sup>	
347	Спеціалізація – капілярний контроль	72/196 г <sup>3</sup>	

## 4. Атестація персоналу зварювального виробництва

400	Атестація координаторів (керівників) зварювальних робіт відповідно до ДСТУ ISO 14731	8 г	проводиться по закінченню курсів 101-109
401	Спеціальна підготовка і атестація зварників відповідно до НПАОП 0.00-1.16-96 і стандартів ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5, ДСТУ ISO14732	72 г	постійно
402	Додаткова і позачергова атестація зварників згідно з НПАОП 0.00-1.16-96	24 г	
403	Періодична атестація зварників відповідно до НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5	32 г	
405	Спеціальна підготовка і атестація зварників авіаційної промисловості відповідно до ДСТУ ISO 24394	72 г	постійно
406	Періодична атестація зварників відповідно до міжнародного (європейського) стандарту EN ISO 9606-1	24 г	
407	Спеціальна підготовка і атестація операторів автоматичного зварювання плавленням відповідно до стандарту ДСТУ ISO 14732	72 г	
411	Спеціальна підготовка і атестація зварників на допуск до виконання зварювальних робіт при ремонті діючих магістральних трубопроводів (під тиском)	3 тижня (112 г)	
412	Періодична атестація зварників на допуск до виконання зварювальних робіт при ремонті діючих магістральних трубопроводів (під тиском)	32 г	за узгодженням з замовником
413	Періодична атестація операторів-зварників контактної-стиківого зварювання рейок відповідно до ДСТУ ISO 14732 і СОУ 35.2-00017584-030-1:2009 (проводиться по закінченню курсу 308)	32 г	

414	Атестация зварників пластмас відповідно до ДСТУ EN 13067 (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб)			проводиться по закінченні курсу 309
415	Періодична атестация зварників пластмас (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб) відповідно до ДСТУ EN 13067		32 г	щокварталу
421	Спеціальна підготовка дефектоскопістів до сертифікації згідно ДСТУ EN 9712	ультразвуковий контроль	32/36 / 64 (I рів) г <sup>4</sup>	індивідуальна підготовка за узгодженням з замовником
423			40/48 / 72/80 / 144 (II рів) г <sup>4</sup>	
427		радіографічний контроль	36/40 72 (I рів) г <sup>4</sup>	
430			40/48 / 76/80 / 152 (II рів) г <sup>4</sup>	
433		візуально-оптичний контроль	16/20 / 30 (I рів) г <sup>4</sup>	
436	20/24 / 35/40 / 70 (II рів) г <sup>4</sup>			
448	Переатестация операторів-зварників контактної-стиків зварювання рейок відповідно до вимог ДСТУ ISO 14732 і СОУ 35.2-00017584-030-1:2009		32 г	лютий

### 5. Тренінги, тестування і підтвердження кваліфікації

501	Професійне тестування і підтвердження кваліфікації зварників механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG)	4 – 12 г <sup>5</sup>	за узгодженням з замовником
502	Професійне тестування і підтвердження кваліфікації зварників ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG)	4 – 12 г <sup>5</sup>	
503	Професійне тестування і підтвердження кваліфікації зварників ручного дугового зварювання покритими електродами (MMA)	4 – 16 г <sup>5</sup>	
512	Практичні тренінги з різних способів зварювання	8 – 32 г <sup>5</sup>	

<sup>1</sup> - Тривалість навчання визначається залежно від базової професійної підготовки і досвіду роботи у зварювальному виробництві.

<sup>2</sup> - Тривалість навчання залежить від спеціалізації.

<sup>3</sup> - Тривалість програми визначається за результатами вхідного тестування.

<sup>4</sup> - Тривалість навчання вказується в напрямленні ОСП (орган по сертифікації персоналу).

<sup>5</sup> - Тривалість програми залежить від умов і характеру випробувань.

- За узгодженням із Замовниками можливе проведення навчання по інших програмах, що не ввійшли в даний перелік.
- На період навчання слухачам надається житло з оплатою за готівку.
- Вартість навчання визначається при укладанні договору.
- Для прийому на навчання необхідно направити заяву із зазначенням шифру курсу, кількості фахівців і поштових реквізитів підприємства.

Україна, 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 56 Тел. (044) 294-61-65; 294-61-67, 200-82-80, 200-81-09,  
E-mail: paton\_muac@ukr.net, http://muac.kpi.ua

## ПЕРЕДПЛАТА 2023

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	280	840	1680	3360
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	280	560	1120
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	280	560	1120
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	560	1680	3360	6720

\*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

\*\* Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агентств «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» та у видавництвах. Передплата через видавництво з любого місяця на любий термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>, <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>  
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>, <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>  
На сайті видавництва у 2023 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2021 рр.



# ДОСЯГНЕННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДБУДОВИ УКРАЇНСЬКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ, НАУКИ ТА ІНЖИНІРИНГУ

*Надихаємо українську технологічну революцію*

Міжнародний інститут сучасних технологій (МІСТ) у співробітництві з Київським академічним університетом, проектом Academ.City та Міжнародним інститутом бізнесу 7-8 грудня 2022 р. в готелі «Національний» (м. Київ) провели україно-американську онлайн-конференцію «Досягнення адитивних технологій для відбудови української промисловості, науки та інжинірингу». Конференція була проведена за сприянням та участю спеціалістів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Тема події: найсучасніші досягнення адитивних технологій і 3D-друку та їх використання у відбудові української промисловості, інжинірингу та науки. У конференції прийняли участь кращі світові розробники технологій, виробники обладнання, програмного забезпечення та матеріалів, а також провідні українські фахівці даної галузі, які обговорили сучасні тренди у адитивних технологіях, останні досягнення в обладнанні та матеріалах, питання інженерної освіти для сучасних технологій 3D-друку, найновіші досягнення адитивних технологій у медицині. До участі в роботі конференції були запрошені українські промисловці, а також компанії, що вже працюють з технологіями 3D-друку, викладачі та студенти інженерних спеціальностей, інженери, зацікавлені у побудові кар'єри у галузі дизайну для сучасного виробництва.

Під час конференції було проведено чотири секції:

- Сучасні тренди в адитивних технологіях

- Останні досягнення у адитивних технологіях/3D-прінтингу
- Інженерна освіта для адитивних технологій
- Новітні адитивні технології у медицині.

До пленарних виступів було залучено лідерів галузі, розробників обладнання та програмного забезпечення, представників провідних навчальних закладів і наукових установ. Зокрема, з доповідями виступили Юджин Геллер (PALITRA, США), Марк Абшир (Additive Manufacturing Users Group AMUG, США), Алекс Меджіріцкі (Formlabs Ohio, США), Калум Стюарт (SPEE3D, США), Омер Тюран (Stratasys, США), Дмитро Ковальчук (Червона Хвиля, Україна), Метью Крессі (MIT, США), Сергій Веретюк (Ноосфера, Україна), Керім Генк (Synopsys Simpleware division, США), Максим Русиник (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна), Юрій Богомол (Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського, Україна) та інші.

Під час конференції доповідачі та учасники обговорили сучасні тенденції в застосуванні 3D-друку та нові розробки апаратного та програмного забезпечення, матеріалів, а також актуальні питання наукових досліджень, інноваційної діяльності та інженерної освіти. Основним акцентом панельних дискусій були перспективи співпраці українських та американських компаній та спеціалістів в ключових аспектах розвитку адитивного виробництва в Україні.

За матеріалами сайту  
<https://iimt.com.ua/3d-conference-2022>

*Заснований у 2022 р. та розташований у м. Києві, Міжнародний інститут сучасних технологій (МІСТ) є освітнім, дослідницьким та інженерним центром, який приносить найсучасніші інженерні та виробничі технології в Україну. МІСТ має на меті допомогти українським інженерам у використанні найсучаснішого програмного забезпечення і обладнання для виробництва, щоб допомогти відновити та розвинути українську промисловість. МІСТ – прямий шлях для українських інженерів на світовий ринок передових технологій. Програми МІСТ особливо зосереджені, але не обмежуються, технологіями адитивного виробництва. МІСТ об'єднує виробників обладнання, розробників програмного забезпечення, науковців, інженерів, бізнесменів, які зацікавлені в розвитку інженерного та виробничого потенціалу України.*

*Історія Київського академічного університету (КАУ) починається з Київського відділення Московського фізико-технічного інституту (КВ МФТІ), яке було створене за ініціативи Бориса Євгеновича Патона з метою забезпечити можливість українським студентам, що навчались в МФТІ, повертатись і працювати в Україні. У 1997 р. КВ МФТІ реорганізовано у Фізико-технічний навчально-науковий центр (ФТННЦ) НАН України, а у 2016 р. було утворено державну наукову установу «Київський академічний університет», за яким КАУ утворено шляхом реорганізації ФТННЦ НАН України.*





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

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



*Шановні читачі журналу!*

Починаючи з цього номеру в журналі «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» започатковується нова рубрика – «Новини Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики». У ній будуть публікуватися статті про нові технології НКТД; висвітлюватися новини в галузі стандартизації і сертифікації персоналу з НК; обговорюватися проблемні питання, з якими стикаються спеціалісти, що розробляють технології, прилади і виконують НК; надаватися інформаційні матеріали про різноманітні заходи з НК в Україні та за кордоном і участь у них українських спеціалістів тощо.

Ця рубрика відкривається на заміну Інформаційному бюлетеню УТ НКТД «НК-інформ» (що друкувався для членів УТ НКТД) з метою більшого охоплення спеціалістів, що працюють у галузі неруйнівного контролю і технічної діагностики.

Запрошуємо Вас, шановні читачі, брати участь в інформаційному наповненні цієї рубрики і надсилати для публікації в ній матеріали, що можуть зацікавити читачів журналу. Цей розділ також буде публікуватися на інтернет-сайті Товариства: [www.usndt.com.ua](http://www.usndt.com.ua).

Голова УТ НКТД  
проф. В.О. Троїцький

**ДЕФЕКТОСКОПІЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ, МОНІТОРИНГ  
СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ РАДІОСКОПІЧНИМИ ЗАСОБАМИ**

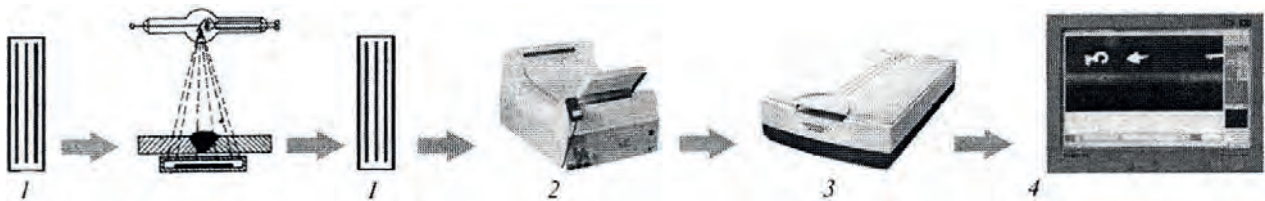
**В.О. Троїцький**

У країнах ЄС з 2003 р., а в Україні з 2016 р. діє стандарт ISO 5817-2016, за яким усі зварні шви поділяються на три рівні якості: D, C, B. Рівень якості має вказуватись у контрактах на виготовлення зварних металоконструкцій. Розміри та кількість допустимих пор, кратерів, натікань, підрізів та інших дефектів для рівнів якості D та B відрізняються на порядок. Зварні шви якості B не можуть бути здані без результатів дефектоскопії. Якщо з Best (B) не вийшло, то передбачені роз-

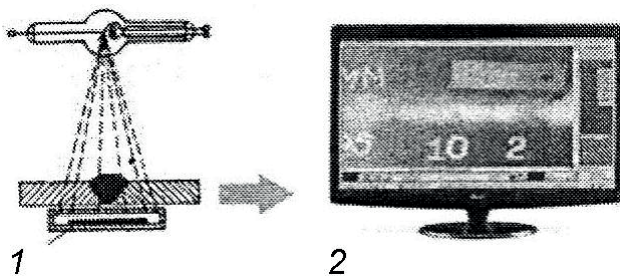
рахунки за більш низькою якістю (C), з нижчою вартістю. Ремонт допустимий лише для швів D.

Існують десятки методів оцінки якості зварних швів, проте наочнішими є радіографічні і рентгенотелевізійні дослідження. Перші застосовуються понад 100 років, другі – нещодавно завдяки розвитку оптоелектроніки.

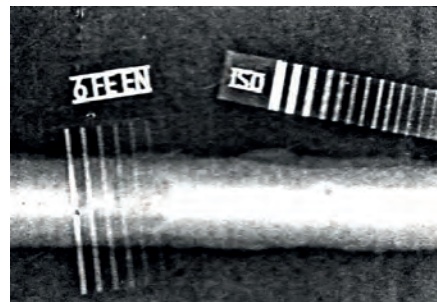
В ІЕЗ ім. Є.О. Патона застосовується технологія миттєвого цифрового рентгенотелевізійного контролю (РТК) на основі флюороскопічних і твердотіль-



Плівковий радіографічний контроль оцифровуванням рентгенограм: 1 – касета з плівкою; 2 – процедури обробки плівки; 3 – сканування знімка; 4 – цифрове зображення

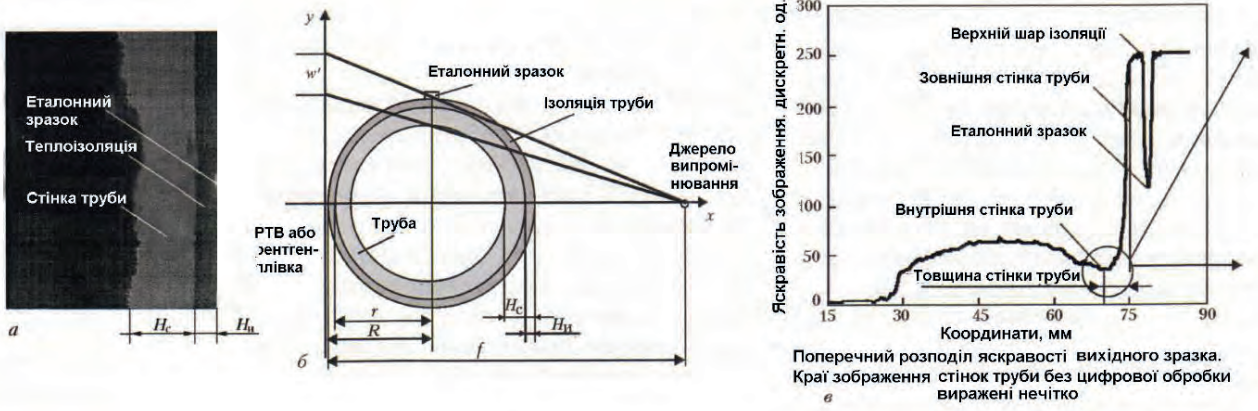


Рентгенотелевізійний контроль без проміжних носіїв інформації: 1 – твердотільний перетворювач; 2 – цифрове зображення



Згідно зі стандартом ДСТУ ISO 17636-2 проведено радіаційний контроль зварних з'єднань із застосуванням цифрових детекторів





них детекторів. Це найшвидший і найдешевший спосіб отримання цифрового зображення дефектів в електронному вигляді, що не вимагає обладнання для зчитування та обробки, часу, витратних матеріалів, спеціальних приміщень, які потрібні для плівкової радіографії. В ІЕЗ налагоджено виготовлення таких перетворювачів РТК (Патенти України №№ 111374, 113257, 120338, 135146).

В ІЕЗ розроблено унікальну технологію тангенціального R-просвічування, що дозволяє визначати залишкову товщину металу, зазори між обшивкою і тілом труби, випущений стандарт. Таку технологію впроваджено на АЕС.

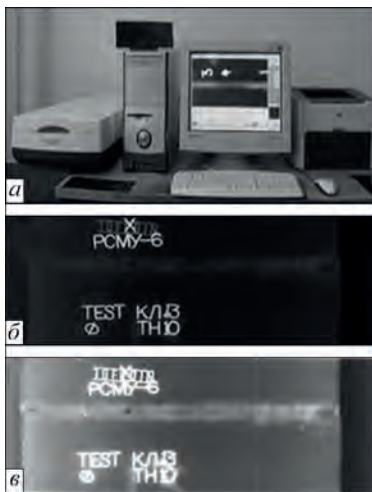
На рисунку показано фрагменти технології тангенційного просвічування тіл обертання: *a* – кольорова селекція радіаційного зображення стінки труби та її теплоізоляції діаметром 60 мм з товщиною стінок 5 мм і товщиною ізоляції 2 мм; *б* – схема тангенційного просвічування стінки труби; *в* – результат РТК.



Стационарні рентгенівські апарати РУП 150/300 і «Екстравольт-360» в рентгенівській лабораторії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ

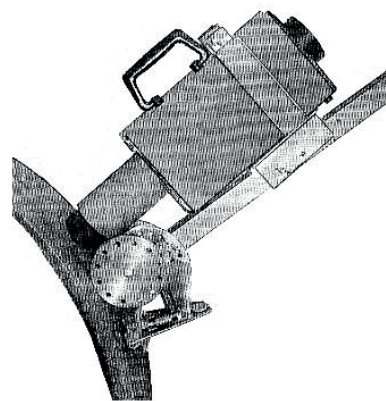
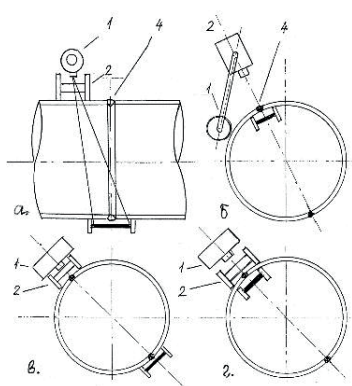
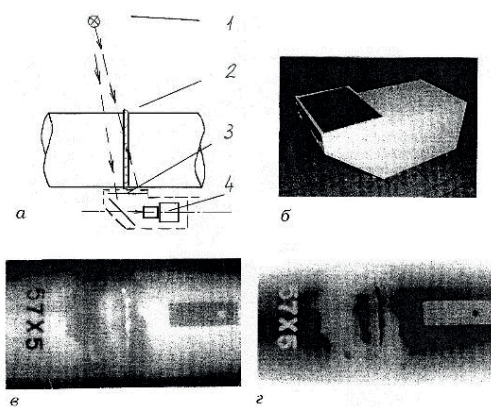


Рентгенотелевізійний контроль стикових з'єднань арматури (*a*) і труб малого діаметра (*б*): 1 – джерело випромінювання; 2 – мініатюрний твердотільний перетворювач; 3 – блок передачі цифрових зображень; 4 – виведення



Система цифрової обробки рентгенограм: *a* – робоче місце оператора, *б* – зображення вихідної рентгенограми зварного з'єднання, *в* – зображення рентгенограми зварного з'єднання після цифрового контрастування, *г* – структура програмного забезпечення

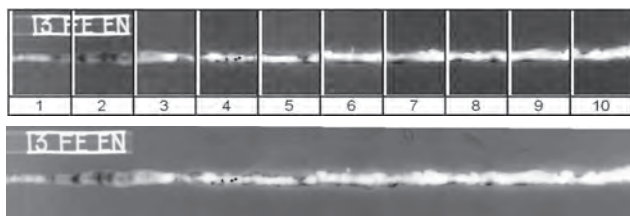




Рентгенотелевізійний контроль на основі радіоскопічного перетворювача сталеві труби діаметром 57×5 мм: а – схема просвічування: 1 – випромінювач, 2 – зварний шов, 3 – флуоресцентний екран, 4 – оптичний об’єктив і відеокамера; б – R-детектор 25×125×110; в, г – негативне та позитивне зображення зварного шва, просвічуваного на еліпс

Автономний R-апарат (1), що переміщується на магнітних колесах (2) вздовж зварного шва (3), і R-перетворювач (4), що переміщується по зовнішній і внутрішній поверхнях труб великого діаметра при просвічуванні через дві (а, б) і одну (в, г) стінки

Фото R-апарата Аріна-05 на рухомій магнітній платформі, розташованій на трубі Ø 920×12 з магнітними колесами Ø 110 мм і стопорним магнітом



Результати зшивання 10 РТК-знімків у єдину цифрову радіограму (Патент України № 145831)

Застосування мініатюрних ПЗЗ-перетворювачів для рентгенотелевізійного контролю дало поштовх до розробок нових технологій. Так, поєднання контактного великоформатного просвічування, на якому намічаються зони можливих прихованих дефектів, і подальше віддалене від поверхні розташування сенсора РТК високої роздільної здатності дозволило вивчати в реальному часі сумнівні зони великого об’єкта, вимірювати розміри та розташування в ньому внутрішніх дефектів у реальному часі без використання R-платформ.

вок, проводити моніторинг фюзеляжів авіаційних апаратів зі значним терміном експлуатації тощо. Рентгенотелевізійні перетворювачі та R-апарати на колесах, наведені на фотографіях, дають цікаві рішення для труб.

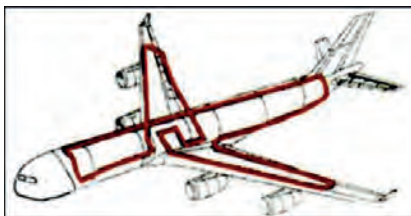
Впроваджується лінійний перетворювач, що складається з мініатюрного високочутливого ПЗЗ-сенсора типу S10810-11 фірми «Hamamatsu» і гнучкою напрямною, по якій переміщується цей сенсор. У процесі контролю сенсор виконує зупинки тривалістю кілька секунд. Так, перебуваючи у полі випромінювання R-апарату, переміщується мініатюрний ПЗЗ-сенсор. На рисунку вище показано 10 РТК-знімків розміром 24×36 мм, що відповідають 10-ти зупинкам сенсора. Японський сенсор S10810-11 має розмір пікселя 25 мкм, розрядність АЦП 14 біт, WiFi передачу до комп’ютера.

Час отримання такого дешевого цифрового рентгенівського знімка займає не більше однієї хвилини, роздільна здатність – 20 пар ліній на 1 мм.

### РТК ФЮЗЕЛЯЖІВ ЛІТАКІВ І ГЕЛІКОПТЕРІВ ЗІ ЗНАЧНИМ ТЕРМІНОМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ – ШЛЯХ ДО РЯТУВАННЯ ПАСАЖИРІВ

В ІЕЗ запропоновано використовувати космічне випромінювання (патент України № 149201) для моніторингу стану корпусів літаків, гелікоптерів, космічних апаратів зі значним терміном експлуатації, які часто руйнуються через приховані під обшивкою тріщини. Фюзеляжі літальних апаратів відчувають великі вібрації і практично не мають ресурсних обмежень, які є для всіх механічних вузлів.

який у стаціонарних земних умовах може бути посилений зовнішніми випромінювачами. При запропонованому моніторингу першою процедурою є вивчення картини R-фону за допомогою дозиметрів на основі лічильників Гейгера, які реагують на кожний квант гамма-випромінювання. Інтенсивність R-фону в дозиметрах перетворюється на інтенсивність звукового сигналу. Це дозволяє швидко і точно встановити місця тріщин під обшивкою, які можна вивчити на рентгенотелевізійному моніторі. Так можна встановлювати розміри тріщин та інших прихованих пошкоджень корпусу, яких може бути дуже багато. РТК-перетворювачі описано вище та в журналі «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», № 3, 2020.



Пошук прихованих дефектів фюзеляжу може здійснюватися на основі природного космічного радіаційного фону,

## НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК «МОНІТОРИНГ СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ (ВВЕДЕННЯ В ПРОФЕСІЮ)»

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



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

Представлено багато матеріалів за новими технологіями НК. В останні роки почав широко застосовуватися рухомий рентгенотелевізійний контроль. Дефектоскопісти України навчилися виготовляти недорогі, портативні, дистанційно керовані РТК-перетворювачі, за допомогою яких можливо виконувати моніторинг технічного стану будь-яких об'єктів, виготовлених з будь-яких матеріалів. Портативні РТК-перетворювачі можуть бути створені на основі мініатюрних стоматологічних ПЗЗ-матриць або на основі флюороскопічних екранів та оптоелектроніки високої роздільної здатності, яка використовується в астрономії. Обидва рішення дозволяють вико-

нувати НК у реальному часі без затратних матеріалів. Такі РТК-технології з часом зменшать застосування УЗК і повністю витіснять плівкову радіографію.

У книзі описані оригінальні рішення з магнітного, капілярного та інших методів неруйнівного контролю.

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

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

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

Приймаються заявки на замовлення книги: [ndt@paton.kiev.ua](mailto:ndt@paton.kiev.ua), [larimart@ukr.net](mailto:larimart@ukr.net), [usndt@ukr.net](mailto:usndt@ukr.net)

## НОВИНИ В ГАЛУЗІ СТАНДАРТИЗАЦІЇ

Наказом №288 від 28 грудня 2022 р. ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», яке виконує функції національного органу стандартизації, прийнято 20268 європейських нормативних документів CEN/CENELEC як національні нормативні документи методом підтвердження з наданням чинності з 31 грудня 2023 р.

Значну кількість цих стандартів складають стандарти з неруйнівного контролю, перелік яких наведено нижче.

№	Позначення	Назва
1	ДСТУ EN 16602-70-15:2022 (EN 16602-70-15:2021, IDT)	Гарантія космічної продукції. Частина 70–15. Неруйнівний контроль
2	ДСТУ EN IEC 62976:2022 (EN IEC 62976:2019, IDT; IEC 62976:2017, IDT)	Промислове обладнання неруйнівного контролю – Лінійний прискорювач електронів
3	ДСТУ CEN/TR 15135:2022 (CEN/TR 15135:2005, IDT)	Зварювання – Проектування та неруйнівний контроль зварних швів
4	ДСТУ EN ISO 13588:2022 (EN ISO 13588:2019, IDT; ISO 13588:2019, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Використання технології автоматизованої фазованої решітки
5	ДСТУ EN 12799:2022 (EN 12799:2000, IDT)	Пайка – неруйнівний контроль паяних з'єднань
6	ДСТУ EN ISO 17405:2022 (EN ISO 17405:2022, IDT; ISO 17405:2022, IDT)	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Методика випробування покриттів, виготовлених зварюванням, прокаткою та вибухом
7	ДСТУ EN 12799:2022 (EN 12799:2000, IDT)/Зміна № 1:2022 (EN 12799:2000/A1:2003, IDT)	Пайка – Неруйнівний контроль паяних з'єднань
8	ДСТУ EN 13925-1:2022 (EN 13925-1:2003, IDT)	Неруйнівний контроль. Дифракція рентгенівського випромінювання на полікристалічному та аморфному матеріалі. Частина 1. Загальні принципи
9	ДСТУ EN 13925-2:2022 (EN 13925-2:2003, IDT)	Неруйнівний контроль. Дифракція рентгенівського випромінювання на полікристалічному та аморфному матеріалі. Частина 2: Процедури
10	ДСТУ EN ISO 18563-3:2022 (EN ISO 18563-3:2015, IDT; ISO 18563-3:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Визначення характеристик і верифікація обладнання на ультразвукових фазованих решітках. Частина 3. Комбіновані системи

11	ДСТУ CEN/TS 17100:2022 (CEN/TS 17100:2017, IDT)	Неруйнівний контроль – Пенетрантний контроль – Еталонні фотографії та розмір індикацій
12	ДСТУ EN ISO 16526-1:2022 (EN ISO 16526-1:2020, IDT; ISO 16526-1:2011, IDT)	Неруйнівний контроль. Вимірювання та оцінка напруги рентгенівської трубки. Частина 1. Метод дільника напруги
13	ДСТУ EN 1330-9:2022 (EN 1330-9:2017, IDT)	Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 9. Терміни, які використовують в акустико-емісійному контролі. – На заміну ДСТУ EN 1330-9:2016 (EN 1330-9:2009, IDT)
14	ДСТУ EN ISO 18563-1:2022 (EN ISO 18563-1:2015, IDT; ISO 18563-1:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Визначення характеристик і верифікація обладнання на ультразвукових фазованих решітках. Частина 1. Прилади
15	ДСТУ EN 15305:2022 (EN 15305:2008, IDT)	Неруйнівний контроль – Метод аналізу залишкової напруги за допомогою рентгенівської дифракції
16	ДСТУ EN 13925-3:2022 (EN 13925-3:2005, IDT)	Неруйнівний контроль. Дифракція рентгенівського випромінювання на полікристалічному та аморфному матеріалі. Частина 3: Інструменти
17	ДСТУ EN 15857:2022 (EN 15857:2010, IDT)	Неруйнівний контроль – Акустична емісія – Випробування армованих волоконним полімерів – Спеціальна методологія та загальні критерії оцінки
18	ДСТУ EN ISO 14096-2:2022 (EN ISO 14096-2:2020, IDT; ISO 14096-2:2005, IDT)	Неруйнівний контроль. Атестація систем оцифрування радіографічної плівки. Частина 2. Мінімальні вимоги
19	ДСТУ EN ISO 16526-3:2022 (EN ISO 16526-3:2020, IDT; ISO 16526-3:2011, IDT)	Неруйнівний контроль. Вимірювання та оцінка напруги рентгенівської трубки. Частина 3. Спектрометричний метод
20	ДСТУ EN 17501:2022 (EN 17501:2022, IDT)	Неруйнівний контроль – Термографічний контроль – Активна термографія з лазерним збудженням
21	ДСТУ EN 15305:2022 (EN 15305:2008, IDT)/ Поправка № 1:2022 (EN 15305:2008/ AC:2009, IDT)	Неруйнівний контроль – метод аналізу залишкової напруги за допомогою рентгенівської дифракції
22	ДСТУ EN ISO 21432:2022 (EN ISO 21432:2020, IDT; ISO 21432:2019, IDT)	Неруйнівне випробування. Стандартний метод випробування для визначення залишкових напруг методом дифракції нейтронів
23	ДСТУ EN 1330-11:2022 (EN 1330-11:2007, IDT)	Неруйнівний контроль. Термінологія. Терміни, що використовуються в рентгенівській дифракції від полікристалічних і аморфних матеріалів.
24	ДСТУ EN ISO 16526-2:2022 (EN ISO 16526-2:2020, IDT; ISO 16526-2:2011, IDT)	Неруйнівний контроль. Вимірювання та оцінка напруги рентгенівської трубки. Частина 2. Перевірка сталості методом товстого фільтра
25	ДСТУ EN ISO 14096-1:2022 (EN ISO 14096-1:2020, IDT; ISO 14096-1:2005, IDT)	Неруйнівний контроль. Атестація систем оцифрування радіографічної плівки. Частина 1. Визначення, кількісні вимірювання параметрів якості зображення, стандартна еталонна плівка та контроль якості
26	ДСТУ EN 15856:2022 (EN 15856:2010, IDT)	Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Загальні принципи АЕ тестування для виявлення корозії в металевому оточенні, заповненому рідиною..
27	ДСТУ CEN/TR 16638:2022 (CEN/TR 16638:2014, IDT)	Неруйнівний контроль – тестування проникаючими речовинами та магнітними порошками за допомогою синього світла
28	ДСТУ CEN/TR 17108:2022 (CEN/TR 17108:2017, IDT)	Неруйнівний контроль – Освітлення під час проникнення та магнітопорошкового контролю, хороша практика
29	ДСТУ EN 14584:2022 (EN 14584:2013, IDT)	Неруйнівний контроль. Випробування на акустичну емісію. Перевірка металевого обладнання, що працює під тиском під час перевірки. Планарне розташування джерел АЕ
30	ДСТУ EN ISO 18490:2022 (EN ISO 18490:2015, IDT; ISO 18490:2015, IDT)	Неруйнівне випробування – Оцінка гостроти зору персоналу НК
31	ДСТУ EN 13477-2:2022 (EN 13477-2:2021, IDT)	Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Характеристика устаткування. Частина 2. Експлуатаційні показники – На заміну ДСТУ EN 13477-2:2016 (EN 13477-2:2010, IDT)
32	ДСТУ EN 13100-2:2022 (EN 13100-2:2019, IDT)	Неруйнівний контроль зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 2. Рентгенівський радіографічний контроль
33	ДСТУ EN 13100-3:2022 (EN 13100-3:2004, IDT)	Неруйнівний контроль зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 3. Ультразвуковий контроль
34	ДСТУ EN 13100-4:2022 (EN 13100-4:2012, IDT)	Неруйнівне випробування зварних з'єднань термопластичних напівфабрикатів. Частина 4. Випробування високою напругою
35	ДСТУ EN 16729-2:2022 (EN 16729-2:2020, IDT)	Залізничне застосування. Інфраструктура. Неруйнівний контроль рейок на коліях. Частина 2. Контроль рейок на колії за допомогою вихрових струмів



36	ДСТУ EN 16729-4:2022 (EN 16729-4:2018, IDT)	Залізничне застосування. Інфраструктура. Неруйнівний контроль на рейках. Частина 4. Кваліфікація персоналу для неруйнівного контролю на рейках
37	ДСТУ EN 16910-1:2022 (EN 16910-1:2018, IDT)	Залізничне застосування. Рухомий склад. Вимоги до неруйнівного контролю ходової частини при технічному обслуговуванні залізниці. Частина 1. Колісні пари
38	ДСТУ CEN ISO/ASTM/TR 52906:2022 (CEN ISO/ASTM/TR 52906:2022, IDT; ISO/ASTM TR 52906:2022, IDT)	Адитивне виробництво – Неруйнівний контроль – Навмисне виявлення дефектів у металевих частинах
39	ДСТУ EN ISO 10893-2:2022 (EN ISO 10893-2:2011, IDT; ISO 10893-2:2011, IDT)/ Зміна № 1:2022 (EN ISO 10893-2011/ A1:2020, IDT; ISO 10893-2:2011/Amd 1:2020, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 2. Автоматизований вихрострумний контроль сталевих безшовних і зварних труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для виявлення дефектів
40	ДСТУ EN ISO 10893-3:2015 (EN ISO 10893-3:2011, IDT; ISO 10893- 3:2011, IDT)/Зміна № 1:2022 (EN ISO 10893-3:2011/A1:2019, IDT; (ISO 10893- 3:2011/Amd 1:2019)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 3. Автоматизований контроль методом розсіювання магнітного потоку по всій окружності безшовних і зварних труб з феромагнітної сталі для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів
41	ДСТУ EN ISO 10893-6:2022 (EN ISO 10893-6:2019, IDT; ISO 10893- 6:2019, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 6. Радіографічний контроль шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів – На заміну ДСТУ EN ISO 10893-6:2015 (EN ISO 10893-6:2011, IDT; ISO 10893-6:2011, IDT)
42	ДСТУ EN ISO 10893-7:2022 (EN ISO 10893-7:201, IDT; ISO 10893- 7:2019, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 7. Цифровий радіографічний контроль зварного шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів – На заміну ДСТУ EN ISO 10893-7:2015 (EN ISO 10893-7:2011, IDT; ISO 10893-7:2011, IDT)
43	ДСТУ EN ISO 10893-8:2015 (EN ISO 10893-8:2011, IDT; ISO 10893- 8:2011, IDT)/Зміна № 1:2022 (EN ISO 10893-8:2011/A1:2020, IDT; ISO 10893- 8:2011/Amd 1:2020, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 8. Автоматизований ультразвуковий контроль сталевих безшовних і зварних труб для виявлення дефектів розшарування
44	ДСТУ EN ISO 10893-9:2015 (EN ISO 10893-9:2011, IDT; ISO 10893- 9:2011, IDT)/Зміна № 1:2022 (EN ISO 10893-9:2011/A1:2020, IDT; ISO 10893- 9:2011/Amd 1:2020, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 9. Автоматизований ультразвуковий контроль для виявлення дефектів розшарування в смуговому/листовому металі, що використовується для виготовлення зварних сталевих труб
45	ДСТУ EN ISO 10893-10:2015 (EN ISO 10893-10:2011, IDT; ISO 10893- 10:2011, IDT)/Зміна № 1:2022 (EN ISO 10893-10:2011/A1:2020, IDT; ISO 10893- 10:2011/Amd 1:2020, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 10. Автоматизований ультразвуковий контроль по всій окружності безшовних і зварних сталевих труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів
46	ДСТУ EN ISO 10893-11:2015 (EN ISO 10893-11:2011, IDT; ISO 10893- 11:2011, IDT)/Зміна № 1:2022 (EN ISO 10893-11:2011/A1:2020, IDT; ISO 10893- 11:2011/Amd 1:2020, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 11. Автоматизований ультразвуковий контроль шва зварних сталевих труб для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів
47	ДСТУ EN ISO 10893-12:2015 (EN ISO 10893-12:2011, IDT; ISO 10893- 12:2011, IDT)/Зміна № 1:2022 (EN ISO 10893-12:2011/A1:2020, IDT; ISO 10893- 12:2011/Amd 1:2020)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 12. Автоматизований ультразвуковий контроль товщини по всій окружності безшовних і зварних сталевих труб (крім труб, отриманих дуговим зварюванням під флюсом)
48	ДСТУ EN 2002-16:2022 (EN 2002-16:2019, IDT)	Аерокосмічна серія. Металеві матеріали. Методи випробувань. Частина 16. Неруйнівний контроль. Випробування на проникнення
49	ДСТУ EN 4179:2022 (EN 4179:2021, IDT)	Аерокосмічна серія. Кваліфікація і атестація персоналу для неруйнівного контролю. – На заміну ДСТУ EN 4179:2017 (EN 4179:2017, IDT) прийнятого методом підтвердження
50	ДСТУ CEN ISO/TS 25107:2022 (CEN ISO/TS 25107:2019, IDT; ISO/TS 25107:2019, IDT)	Неруйнівний контроль. Наставови щодо програм навчання методам неруйнівного контролю. – На заміну ДСТУ CEN ISO/TR 25107:2015 (CEN ISO/TR 25107:2006, IDT; ISO/TR 25107:2006, IDT)
51	ДСТУ EN 12543-2:2022 (EN 12543-2:2021, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристики фокусних плям у промислових рентгенівських системах, які використовують у неруйнівному контролі. Частина 2. Метод радіографії із застосуванням мікроканальної камери. – На заміну ДСТУ EN 12543-2:2016 (EN 12543-2:2008, IDT)
52	ДСТУ EN 12681-1:2022 (EN 12681-1:2017, IDT)	Литво. Радіографічний контроль. Частина 1. Плівкові методи

53	ДСТУ EN 12681-2:2022 EN 12681-2:2017, IDT	Литво. Радіографічний контроль. Частина 2. Методи із застосуванням цифрових детекторів
54	ДСТУ EN 17290:2022 (EN 17290:2021, IDT)	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Дослідження на втрату товщини через ерозію та/або корозію із застосуванням методу TOFD
55	ДСТУ EN ISO 10675-1:2022 (EN ISO 10675-1:2021, IDT; ISO 10675-1:2021, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 1. Сталь, нікель, титан та їх сплави. – На заміну ДСТУ EN ISO 10675-1:2017 (EN ISO 10675-1:2016, IDT; ISO 10675-1:2016, IDT)
56	ДСТУ EN ISO 10675-1:2022 EN ISO 10675-2:2021, IDT (ISO 10675-2:2021, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 2. Алюміній та його сплави. – На заміну ДСТУ EN ISO 10675-2:2018 (EN ISO 10675-2:2017, IDT; ISO 10675-2:2017, IDT)
57	ДСТУ EN ISO 10863:2022 (EN ISO 10863:2020, IDT; ISO 10863:2020, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування дифракційно-часового методу (TOFD). – На заміну ДСТУ EN ISO 10863:2014 (EN ISO 10863:2011, IDT)
58	ДСТУ EN ISO 12718:2022 (EN ISO 12718:2019, IDT; ISO 12718:2019, IDT)	Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумний. Словник термінів. – На заміну ДСТУ EN ISO 12718:2016 (EN ISO 12718:2008, IDT, ISO 12718:2008, IDT)
59	ДСТУ EN ISO 15549:2022 (EN ISO 15549:2019, IDT; ISO 15549:2019, IDT)	Неруйнівний контроль. Вихрострумний контроль. Загальні вимоги. – На заміну ДСТУ ISO 15549:2015 (ISO 15549:2008, IDT)
60	ДСТУ EN ISO 16809:2022 (EN ISO 16809:2019, IDT; ISO 16809:2017, IDT)	Неруйнівний контроль. Ультразвукове вимірювання товщини. – Вперше
61	ДСТУ EN ISO 17640:2018 (EN ISO 17640:2018, IDT; ISO 17640:2018, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролювання та оцінювання. – На заміну ДСТУ EN ISO 17640:2018 (EN ISO 17640:2017, IDT; ISO 17640:2017, IDT) та ДСТУ EN ISO 17640:2019 (EN ISO 17640:2010, IDT; ISO 17640:2010, IDT)
62	ДСТУ EN ISO 17643:2022 (EN ISO 17643:2015, IDT; ISO 17643:2015, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Вихрострумний контроль зварних швів методом аналізу комплексної площини. – На заміну ДСТУ ISO 17643:2018 (ISO 17643:2015, IDT)
63	ДСТУ EN ISO 22232-1:2022 (EN ISO 22232-1:2020, IDT; ISO 22232-1:2020, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 1. Прилади. – Розроблення національного НД на заміну ДСТУ EN 12668-1:2015 (EN 12668-1:2010, IDT), прийнятого методом підтвердження
64	ДСТУ EN ISO 22232-2:2022 (EN ISO 22232-2:2020, IDT; ISO 22232-2:2020, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 2. Перетворювачі. – На заміну ДСТУ EN 12668-2:2015 (EN 12668-2:2010, IDT)
65	ДСТУ EN ISO 22232-3:2022 (EN ISO 22232-3:2020, IDT; ISO 22232-3:2020, IDT)	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 3. Комбіноване обладнання. – На заміну ДСТУ EN 12668-3:2015 (EN 12668-3:2013, IDT)
66	ДСТУ EN ISO 23243:2022 (EN ISO 23243:2020, IDT; ISO 23243:2020, IDT)	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль із застосуванням решіток. Словник термінів
67	ДСТУ EN ISO 3452-1:2022 (EN ISO 3452-1:2021, IDT; ISO 3452-1:2021, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи. – На заміну ДСТУ EN ISO 3452-1:2014 (EN ISO 3452-1:2013, IDT)
68	ДСТУ EN ISO 3452-2:2022 (EN ISO 3452-2:2021, IDT; ISO 3452-2:2021, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 2. Випробування пенетрантів. – На заміну ДСТУ EN ISO 3452-2:2014 (EN ISO 3452-2:2013, IDT)
69	ДСТУ EN ISO 9712:2022 (EN ISO 9712:2022, IDT; ISO 9712:2021, IDT)	Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю. – На заміну ДСТУ EN ISO 9712:2014 (EN ISO 9712:2012, IDT)
70	ДСТУ EN 12504-2:2022 (EN 12504-2:2021, IDT)	Випробування бетону в конструкціях. Частина 2. Неруйнівний контроль. Визначення числа відскоку

Технічним комітетам стандартизації України доручено визначити національні стандарти, положення яких суперечать положенням прийнятих відповідно з цим наказом європейських стандартів CEN/CENELEC, прийняти та надати до ДП «УкрНДНЦ» протоколи засідань щодо їх скасування, а також визначити гармонізовані національні стандарти, зміни та поправки до них, які необхідно скасувати.

*Підготував Андрій Шекеро*

## ПАМ'ЯТІ Ю.К. БОНДАРЕНКА



Дирекція та колектив Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики з глибоким сумом сповіщають, що 26 січня 2023 р. на 76-му році життя зупинилося серце нашого колеги і друга Юрія

Купріяновича Бондаренка, кандидата технічних наук, ветерана Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, провідного наукового співробітника лабораторії надійності зварних конструкцій, керівника сектору атестації, сертифікації та технічної експертизи, члена правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, члена-кореспондента Транспортної академії України, лауреата Державної премії України в галузі науки і техніки.

Ю.К. Бондаренко народився в м. Києві. Після закінчення в 1971 р. Київського політехнічного інституту незмінно працював в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. У 1986 р. захистив кандидатську дисертацію за фахом «Методи контролю в машинобудуванні». Займався дослідженнями, розробкою та впровадженням засобів забезпечення якості в галузях машинобудування, транспорту, нафтопроводів та хімічної промисловості. Він брав безпосередню участь у розробці і впровадженні систем неруйнівного контролю й забезпечення якості на провідних підприємствах: «Мостобуд» (м. Київ), Дрогобицький долотний завод, Харцизький трубний завод, Крюківський вагонобудівний завод, НВФ «Зонд» (м. Івано-Франківськ), ВО «Оріана» (м. Калуш), Виксунський і Бакинський металургійні заводи, Житомирський завод металоконструкцій, АТ «Дніпроазот» та на багатьох інших промислових підприємствах, керував роботами з технічної експертизи та організації випробувань зварних конструкцій, виробів, матеріалів, технологій, розробками систем управління якістю зварювального виробництва, досліджував проблеми

та методи забезпечення якості, технічної експертизи, управління ризиками у зварювальному виробництві, технологічних процесів зварювання та технічних послуг у галузі зварювання і неруйнівного контролю.

Ю.К. Бондаренко був одним з організаторів Національного атестаційного комітету України з неруйнівного контролю. Упродовж 32 років входив до складу правління Українського товариства НКТД, був членом товариства зварювальників України, головою атестаційної комісії персоналу з акредитації Національного агентства з акредитації України; членом технічних комітетів ТК-44, ТК-78 Національного органу стандартизації, аудитором із системи управління якістю «TUV Rheinland», аудитором із продукції та послуг в системі «УкрСЕПРО», одним з учасників розробки і гармонізації стандартів та інших НД у галузі зварювання, контролю і забезпечення якості у зварювальному виробництві, делегатом 5-ї комісії «Контроль і забезпечення якості» Міжнародного інституту зварювання, членом редакційних рад журналів «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» і «Сварщик», автором більше 200 наукових статей та 20 авторських свідоцтв і патентів. Він був нагороджений подякою «За заслуги» Держстандарту України, нагрудним знаком і сертифікатом Міжнародного інституту зварювання, грамотою «За особливий внесок у ліквідацію наслідків аварії на ЧАЕС» МНС України, почесною грамотою Київського міського голови «За вагомий особистий внесок у розвиток промисловості, багаторічну сумлінну працю і високий професіоналізм», відзнакою «Кращому дефектоскопісту» Українського товариства НКТД, Почесною грамотою Української асоціації якості «За сприяння розвитку руху за якість і досконалість в Україні».

Юрій Купріянович Бондаренко був світлою людиною і яскравою особистістю, незаперечним професіоналом в галузі неруйнівного контролю і технічної діагностики, людиною компетентною і доброзичливою. Прекрасні людські якості, висока ерудиція і комунікабельність здобули йому авторитет і заслужену повагу дефектоскопічної спільноти України.

Світла пам'ять про нього назавжди залишиться в серцях усіх, хто його знав.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
Українське товариство НКТД  
Редакція журналу



## КОНФЕРЕНЦІЇ, ВИСТАВКИ – 2023

08.05 – 11.05.2023 Berlin/Germany	Pipeline Technology Conference 2023	EITEP
09.05 – 11.05.2023 New Orleans/USA	Digital Imaging for NDE	ASNT
09.05 – 11.05.2023 Nuremberg/Germansy	Sensor+Test 2023	AMA Service GmbH
09.05 – 11.05.2023 Johannesburg/South Africa	Africa Automation Fair 2023	Reed Exhibitions South Africa
09.05 – 12.05.2023 Stuttgart/Germansy	Control 2023	P. E. Schall GmbH & Co. KG
11.05-12.05.2023 Київ/Україна	Конференція-виставка «Неруйнівний контроль 2023»	OKOndtGROUP
16.05-17.05.2023 Київ/Україна	XXII Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи»	КПІ ім. Ігоря Сікорського
18.05 – 20.05.2023 Guangzhou/China	Tube & Pipe Industry Exhibition 2023	Guangzhou Julang Exhibition Design Co., Ltd.
30.05 – 01.06.2023 Київ/Україна	XXI Міжнародний промисловий форум – 2023	Міжнародний виставковий центр
06.06 – 08.06.2023 Marseille/France	The Cofrend Days 2023	COFREND
19.06 – 23.06.2023 Niagara Falls/Canada	VIII PANNDT – The 8 <sup>th</sup> Pan-American Conference for Nondestructive Testing – verschoben auf Juni 2025 – postponed to June 2025	CINDE
21.06.2023 Hamburg/Germany	MSR-Spezialmesse Hamburg 2023	MEORGA
26.06 – 30.06.2023 Columbus/OH/USA	31 <sup>st</sup> Research Symposium	ASNT
27.06 – 29.06.2023 Shenzhen/China	IAMD Shenzhen 2023	Deutsche Messe AG
27.06 – 29.06.2023 Sheffield/UK	NDE in Nuclear 2023	NUGENIA
03.07 – 07.07.2023 Lisbon/Portugal	ECNDT 2023 13 <sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing	FSEND-RELACRE
05.07 – 07.07.2023 Seoul/Korea	Smart Sensor Korea 2023	Nano Technology Research Association
16.07 – 21.07.2023 Long Island/NY/USA	Fully 3D Conference – 17 <sup>th</sup> International Meeting on Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine	Stony Brook University
18.07 – 22.07.2023 Qingdao/China	Industrial Automation Technology And Equipment Exhibition 2023	Qingdao Jinnoc Exhibition Co., Ltd.
15.08 – 17.08.2023 Dübendorf/Switzerland	17 <sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials	ASNT
11.09 – 15.09.2023 Essen/Germany	SCHWEISSEN & SCHNEIDEN	Messe Essen
12.09 – 14.09.2023 Northampton/UK	19 <sup>th</sup> International Conference on Condition Monitoring and Asset Management	NDT
13.09 – 15.09.2023 Tokyo/Japan	Sensor Expo Japan 2023	Fuji Sankei Business i. (The Nihon Kogyo Shimbun Co., Ltd.)
20.09 – 23.09.2023 Frei Caneca Conventio Center, São Paulo/Brazil	CONAENDI & IEV 2023 The 39 <sup>th</sup> Non-Destructive Testing and Inspection Conference and Exhibition	ABENDI
21.09 – 22.09.2023 Київ/Україна	Міжнародна спеціалізована виставка Енергозберігаюче обладнання та альтернативні джерела енергії «ISTWE 2023»	Міжнародний виставковий центр
18.10 – 20.10.2023 Тернопіль/Україна	7-а Міжнародна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування» (VII International Conference «In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction»)	Тернопільський НТУ ім. Івана Пулюя
18.10.2023 Landshut /Germany	MSR-Spezialmesse Landshut 2023	MEORGA
27.11.2023 Київ/Україна	Сучасні напрями розвитку адитивних технологій	ІЕЗ ім. Є.О. Пагона НАН України
28.11 – 30.11.2023 Brescia/Italy	ART'23 14 <sup>th</sup> International Conference on non destructive investigations and micronanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage	AIPnD Italian Society for NDT
27.05 – 31.05.2024 Incheon/Korea	20 <sup>th</sup> World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2020)	KSNT

## ПОВІДОМЛЕННЯ



### 13-а Європейська конференція з неруйнівного контролю – ECNDT 2023

3–7 липня 2023 року,  
Лісабон, Португалія

Європейська конференція з неруйнівного контролю (ECNDT) вважається головною міжнародною подією для EFNDT та її товариств-членів. Подія демонструє важливість цього сектору, представляючи момент, коли спільнота НК (академії, інспекційні компанії, акредитовані лабораторії, промисловість та постачальники обладнання) демонструє різноманітність своєї діяльності та компетентність для забезпечення безпеки. Це також можливість налагодити контакти та познайомитися з сучасним науково-дослідницьким процесом і обладнанням європейського та світового співтовариства НК. Конференція ECNDT 2023 ретельно спланована, щоб охопити широкий спектр тем, з особливим акцентом на технічних і наукових аспектах. Програма містить найновіші досягнення в галузі досліджень і розробок, а також застосування неруйнівного контролю (NDT) у різних галузях промисловості. Паралельно проходитиме виставка, яка тісно пов'язана з конференцією. Виставка демонструє обладнання та інструменти, які використовуються в промисловості, підкреслюючи зв'язок між дослідженнями та розробками та практичним застосуванням.

*Правління УТ НКТД вивчає можливість організації участі українських спеціалістів в Європейській конференції з НК і пропонує усім бажаючим прийняти в ній участь. Звертатись до віце-президента УТ НКТД Казакевича М.Л. (e-mail: kazakevich.m@gmail.com).*



### 7-а Міжнародна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування»

18–20 жовтня 2023 року на базі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя відбудеться 7-а Міжнародна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування» (VII International Conference «In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction»).

Організатори заходу – Європейське товариство з цілісності конструкцій (ESIS), Українське товариство з механіки руйнуван-

ня матеріалів, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України та Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Наукові напрями конференції: методи оцінювання, прогнозування та виявлення пошкодження матеріалів, неруйнівний контроль, методи оцінювання деградації та запобігання руйнуванню, проблеми впливу середовища на руйнування і міцність матеріалів, довговічність, цілісність та подовження терміну служби конструкцій.

Робоча мова: англійська.

Форма участі у конференції: очна, онлайн. Кінцевий термін реєстрації учасників – 1 вересня 2023 року. Тези доповідей приймаються до 1 вересня 2023 року.

Виголошені доповіді після рецензування буде опубліковано у спецвипуску «Procedia Structural Integrity», що індексується базами «Scopus» і «WoS».



### 19-та Міжнародна конференція з моніторингу технічного стану

12–14 вересня 2023 року,  
Нортгемптон, Велика Британія

Конференцію організовує BINDT у тісному партнерстві з Міжнародним товариством моніторингу стану (ISCM) і Товариством США з технології запобігання відмовам машин (MFPT). Таке поєднання зусиль цих провідних організацій створює одну з найбільших подій такого роду на дійсно міжнародному рівні та базується на дуже успішних 18-и міжнародних конференціях з моніторингу стану, організованих BINDT, Першому Всесвітньому конгресі з CM у 2017 році, організованому BINDT та ISCM та 71-й щорічній конференції, організованій Товариством MFPT.

Щорічна конференція Інституту з моніторингу стану дає можливість усім, хто займається моніторингом стану, зустрітися в комфортній обстановці, повчитися у видатних людей у своїй галузі та обмінятися новинами та думками з колегами, водночас є час для відновлення дружби та створення нових знайомств. Завдяки численним паралельним технічним презентаціям, постерним сесіям і громадським заходам з місцевим колоритом, бізнес і відпочинок поєднуються, щоб гарантувати, що справді знайдеться щось для кожного.