

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.)

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

В.М. Учанін (заст. гол. ред.)

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

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

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар)

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

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.Л. Казакевич

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

О.М. Карпаш, П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

Й. Мірчев

Інститут механіки, Софія, Болгарія

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

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

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

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХП», м. Харків;

М.Г. Чаусов

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко, Міжнародна

Асоціація «Зварювання», м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

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

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/dtnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

МОН України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2024

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія/електронна версія: 1200 грн.

за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів

видавець журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

Академік Борис Євгенович Патон

До 105-річчя від дня народження..... 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ЛОБАНОВ Л.М., САВИЦЬКИЙ В.В., ШУТКЕВИЧ О.П., ШИЯН К.В.,

КИЯНЕЦЬ І.В. Неруйнівний метод визначення залишкових

напружень у зварних з'єднаннях на основі використання

імпульсів струму високої щільності та спекл-інтерферометрії.... 5

ВОРОНА Г.В., МАХНЕНКО О.В., МІЛЕНІН О.С. Ефек-

тивність розвантаження ділянки трубопроводу АЕС з

дефектом стоншення стінки при встановленні бандажу або

зварної муфти 11

ДЯДІН В.П., ДАВИДОВ Є.О. Утворення крайових хвиль від

напівпрозорих тріщин 20

НЕДОСЄКА С.А., НЕДОСЄКА А.Я., ЯРЕМЕНКО М.А.,

ОВСІЄНКО М.А., БОЙЧУК О.І. Багатоступенева фільтрація

та багатопараметрична кластеризація подій АЕ 26

МУРАВСЬКИЙ Л.І. Розвиток оптико-цифрових методів

неруйнівного контролю тонкостінних оболонкових

конструкцій авіакосмічної техніки (Огляд) 33

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

ПОСИПАЙКО Ю.М., АНДРЕЄВ А.М. Моніторинг техніч-

ного стану резервуарів на українській антарктичній станції

«Академік Вернадський» 42

ІНФОРМАЦІЯ

П'ята наукова конференція з неруйнівного контролю

литва, кованих і вальцьованих виробів 50

XX Міжнародний енергетичний бізнес-форум 51

Новини Українського товариства неруйнівного контролю

та технічної діагностики 53

Видання журналу підтримують:

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

I.Yu. Romanova (execut. secretary)

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

Krzysztof Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland;

Janez Grum

University of Ljubljana, Slovenia;

M.L. Kazakevich

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of NAS

of Ukraine, Kyiv;

O.M. Karpash, P.M. Raiter

Ivano-Frankivsk NTU of Oil and Gas, Ukraine;

Yordan Mirchev

Institute of Mechanics, Sofia, Bulgaria

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

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

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

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine;

Adriana Savin

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

V.O. Storozhenko

Kharkiv NU of Radio Electronics, Ukraine;

H.M. Suchkov

NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;

M.G. Chausov

NU of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv.

Executive Director – O.T. Zelnichenko, International

Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,

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

International Association «Welding» (Publisher)

Address

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

03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.

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

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved

by the Ministry of Education and Science of Ukraine

for the publication of works of applicants for academic

degrees in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration

of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2024

Subscription index 74475.

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

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

air postage and packaging included.

\$104, subscriptions for the electronic version.

Publisher is not responsible for the content of the

promotional material.

CONTENT

Academician Boris Paton

To the 105th anniversary of the birthday 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

LOBANOV L.M., SAVITSKY V.V., SHUTKEVYCH O.P., SHYAN K.V.,

KYANETS I.V. Nondestructive method of residual stress determi-

nation in welded joints based on application of high-density current

pulses and speckle-interferometry 5

VORONA G.V., MAKHNENKO O.V., MILENIN O.S. Effective-

ness of unloading a section of NPS pipeline with a pipe wall

thinning defect by mounting a band or welded sleeve 11

DYADIN V.P., DAVYDOV Ye.O. Formation of edge waves from

semi-translucent cracks 20

NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A.Ya., YAREMENKO M.A.,

OVSIIENKO M.A., BOICHUK O.I. Multistep filtering and multipara-

metral clustering of AE events 26

MURAVSKY L.I. Development of optical-digital methods

for non-destructive testing of aerospace thin-walled

shell structures (Review) 33

INDUSTRIAL

POSYPAIKO Yu.M., ANDREEV A.M. Tank technical condition

monitoring at the ukrainian antarctic station «Academik Vernadsky» 42

INFORMATION

5th Conference rolled forged casts 50

XX International energy business forum 51

News of the Ukrainian society for non-destructive testing 53

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,

Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78,

Association «OKO», LLC «Diagnostic devices»

АКАДЕМІК БОРИС ЄВГЕНОВИЧ ПАТОН

До 105-річчя від дня народження

Про наукову, організаційну та громадську діяльність видатного вченого в галузі зварювання, металургії, технології металів, матеріалознавства та громадського діяча, талановитого організатора науки, Президента Національної академії наук України, директора Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Бориса Євгеновича Патона написано багато. Сам він не написав мемуарів. Але ніколи не відмовляв журналістам, чесно відповідаючи на будь-які питання, розповідаючи про себе, погляди на світ, науку та людей, наставляючи молодь. Нижче представляємо висловлювання про його життя та діяльність, які запозичені з відомих публікацій, а також з його власних інтерв'ю.



Величезна особиста відповідальність Б.Є. Патона — організатора міжнародної наукової кооперації — підтверджується переліком керівних і почесних посад у різноманітних міжнародних наукових об'єднаннях, посад, які він не тільки обіймає, а й активно використовує для вироблення стратегії розвитку науки. Б.Є. Патон — президент Міжнародної асоціації академії наук, почесний президент Міжнародної інженерної академії, член Академії Європи, почесний член Римського клубу, Міжнародної академії технологічних наук, почесний член Центральноєвропейської академії природних наук і мистецтв, Міжнародної академії астронавтики, іноземний член академії та науково-технічних товариств багатьох країн. Він очолює Міждержавну наукову раду зі зварювання та споріднених технологій, входить до складу Міжнародного комітету з науково-технічного розвитку країн СНД, правління Міжнародної паливно-енергетичної асоціації, опікунської ради Міжнародного фонду ядерної безпеки (*акад. НАН України А.Г. Загородній*).

Одним з основних принципів, закладених Євгеном Оскаровичем Патоном при створенні Інституту й розвинених Борисом Євгеновичем, є проведення цілеспрямованих фундаментальних досліджень і тісний зв'язок

науки з виробництвом. Реалізація цієї системи дозволила створити унікальні конструкції, обладнання, матеріали, технології, використання яких сильно вплинуло на розвиток багатьох галузей промисловості — машинобудування, суднобудування, ракетно-космічний комплекс, авіабудування, енергетику, гірничопромисловий комплекс, металургію й хімічне виробництво, створення трубопровідного транспорту, будівельну індустрію. Борис Євгенович відрізняється винятковим умінням працювати з колективом: жодна корисна пропозиція, висловлена будь-яким співробітником, не залишиться без його уваги. Він завжди готовий підтримати цікаву ідею, належно оцінити виконану роботу. Його ентузіазм, рідкісна працездатність і увага до кожного працівника створюють в колективі здорову творчу атмосферу. Він любить працювати з молоддю, часто безпосередньо спілкується з тими, у кому бачить майбутнє Інституту. В ІЕЗ вирости сотні талановитих учених і інженерів (*акад. НАН України А.Г. Наумовець*).

Його метод навчання колег і співробітників зводиться до простого та ефективного методу: «Роби, як я». Слідувати повністю цьому закличу навіть приблизно я не міг зі зрозумілих для всіх причин, але намагався в міру своїх сил. Борис Євгенович, безсумнівно, є геніальною людиною у всіх областях: в науці, в організації масштабних державних науково-технічних робіт і навіть в управлінні своїм організмом і своєю нервовою системою. Відзначаю його високі морально-етичні правила, які він висуває у першу чергу до себе і яким незмінно слідує (*акад. НАН України В.Г. Бар'яхтар*).

Борис Євгенович Патон — лідер, борець, творча особистість, глибоко порядна і добра людина, з фантастичною енергією та працездатністю, величезним досвідом, глибокими знаннями в багатьох сферах, здатністю постійно вчитися. У нього широка натура, гострий аналітичний розум, він демократичний, доброзичливий, відкритий для спілкування, доступний, завжди готовий підтримати людину в біді, допомогти їй (*акад. НАН України І.К. Походня*).

Борис Євгенович Патон — яскрава особистість. Так, президент Національної академії. Так, найбільший вчений у галузі техніки, директор всесвітньо відомого Інституту електрозварювання. Так, громадський діяч, багаторічний член парламентів колишнього Союзу та України. І ще численних «рад», комітетів, комісій...

На всіх цих посадах та званнях — не просто «знаходиться» — працює. Безумовно — видатна людина. Про нього багато написано. Проте лишається питання — у чому джерело цієї феноменальної працездатності? Думаю, не тільки в генах, уроджених здібностях, інтелекті. Джерело — у характері, що він жорстко тренує все життя. А ще, можливо, якість душі. У її величі, якщо хочете. Його багатогранність та працездатність вражають. Тільки завдяки глибокому почуттю особистої відповідальності перед державою, народом, власною совістю він успішно працює та справляється з таким навантаженням. Допомогала йому у цьому хороша фізична форма, регулярне заняття тенісом, водними лижами, плаванням (акад. НАН України М.М. Амосов).

Принципи проведення цілеспрямованих фундаментальних досліджень й тісний зв'язок науки з виробництвом втілювалося Б.Є. Патонем все його творче життя. Наукові відділи інституту, дослідне конструкторсько-технологічне бюро, інженерні центри, експериментальне виробництво, дослідні заводи створювались протягом всієї історії Інституту — це невід'ємні ланки системи організації досліджень і втілення їхніх результатів у виробництво.

На відповідальному посту Президента Національної академії наук України розкрився талант Бориса Євгеновича Патона як видатного організатора. За його участю була розроблена нова структура Академії наук, її новий статут, що спрямований на найраціональніше використання наукових сил і засобів, їхню концентрацію при вирішенні найважливіших фундаментальних та прикладних наукових проблем, які мають важливе значення для економіки країни, створено десятки нових інститутів і установ, що розвинули і поглибили дослідження у найважливіших наукових напрямках (акад. НАН України І.В. Кривцун).

Борис Євгенович був серцем і мозком Національної академії наук України. Він сприяв становленню та успішному розвитку багатьох наукових напрямів і відповідних наукових установ. Він впровадив новий підхід у діяльності Академії, що включає проведення цілеспрямованих наукових досліджень з обов'язковим практичним використанням їх результатів у промисловості та економіці нашої держави. Завдяки незаперечному авторитету, багатому досвіду, мудрості Бориса Євгеновича Академія змогла не тільки вистояти у складних економічних умовах останніх десятиліть, але й ефективно працювати.

Борис Євгенович був видатним державним і громадським діячем. Впевнений, що саме таким людям повинна належати влада у державі. Наша країна не

зазнала б таких негараздів, що спостерігаються у теперішній час, якби у керма її управління стояла така людина, як Б.Є. Патон. Вражаюча ясність життєвого шляху Бориса Євгеновича, його надзвичайно плідна наукова, науково-організаційна та державна діяльність надихатимуть наступні покоління українських учених. Ім'я Бориса Євгеновича Патона назавжди залишиться серед імен видатних діячів світової науки (акад. НАН України Л.М. Лобанов).

Питання з інтерв'ю Дмитру Киянському «Патон, якого ми не знаємо», газета «Дзеркало тижня» 13 березня 1999 р.

Педантичність, порядність, неприйняття усіялих інтриг, підкилимної боротьби та недозволених прийомів — непорушні традиції вашої родини, що передаються від батьків дітям. Але подібні якості, властиві кращим представникам інтелігенції, були не дуже у честі за радянських часів, особливо у вищих ешелонах влади. Як у подібних умовах вам вдавалося залишатися в ладі зі своєю совістю та моральними принципами?

— У деяких ситуаціях я й справді відчував, якщо так можна сказати, моральний дискомфорт. Іноді на мене дивилися, як на чужинця з іншої планети. Але я сповідаю одне непорушне правило — ніколи не поступатися принципами через те, що так поведуться інші. Це, зрештою, справа їхньої порядності. Приказка: «З вовками жити — по вовчі вити» — мені не підходить. Я завжди, в будь-яких умовах, намагаюся чинити так, як велить моє сумління.

Якщо вас ображають, роблять по відношенню до вас низький вчинок, чи вважаєте ви можливим дати здачу?

— Іншими словами, чи підставляю я ліву щоку після того, як мене б'ють правою? Ні не підставляю! І здачі дати можу. Але у деяких випадках відбувається парадоксальне явище. Чим більше ви робите людині добра, тим раніше вона вас зрадить або зробити якусь капость. Можливо, тут спрацьовує психологічний механізм. Вашому опоненту неприємно згадувати, що своїми досягненнями, знаннями, науковими ступенями та іншим він завдячує не собі, а комусь іншому. Перенести це не може. Така реакція нерідко спостерігається з боку людей, які мають якісь фізичні чи моральні вади, часто приховані. Я в подібних випадках роблю так. Якщо ця людина нормально працює і потрібна для справи, говорю про себе: чорт з нею! Іншими словами, про його моральні якості знаю, але мирюся. І у відповідь на його низький вчинок не розраховуюся з ним тією ж монетою.

Природа наділила Бориса Євгеновича Патона фантастичною енергією та працездатністю, прагнучи постійно вчитися, невгамовною допитливістю. А величезний досвід, глибокі знання в багатьох галузях науки і техніки він все життя здобував сам. Спираючись на те, що вже досягли вчені, винахідники, новатори, він зробив величезний внесок у науково-технічний прогрес. Багато чого з того, що за 101 рік життя Бориса Євгеновича досягло людство, в тому числі і за його участю, не могли вигадати навіть фантасти.

Редакція журналу «Автоматичне зварювання»

НЕРУЙНІВНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ІМПУЛЬСІВ СТРУМУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ ТА СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

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

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: shutkevich1996@gmail.com

Створено методику неруйнівного визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях на основі використання імпульсів струму високої щільності та лазерної спекл-інтерферометрії. Проведено порівняння результатів вимірювання залишкових напружень у зварних з'єднаннях, отриманих розробленим методом і методом отворів. Бібліогр. 19, рис. 10.

Ключові слова: залишкові напруження, зварні з'єднання, імпульс струму високої щільності, спекл-інтерферометрія, електропластичний ефект, метод отворів

Вступ. Одним з важливих завдань при виробництві, проектуванні та експлуатації зварних конструкцій є контроль їхнього напруженого стану, оскільки залишкові напруження істотно впливають на ресурс конструкцій. Для визначення залишкових напружень широко розповсюджені неруйнівні методи такі як: рентгенівський, ультразвуковий, магнітний тощо, та механічні, що засновані на принципі релаксації напружень [1–3]. При визначенні залишкових напружень в елементах і вузлах конструкцій для їх пружного розвантаження використовують різні способи, наприклад, термічний вплив [4], пластичне вдавлення кульки [5], свердління отвору та ін. Найбільшого поширення для пружного розвантаження залишкових напружень отримав метод висвердлювання невеликих ненаскрізних отворів (діаметром 1,0...3,0 мм, завглибшки 0,5...3,0 мм). Вимірювання деформацій та переміщень навколо зони пружного розвантаження (навколо висвердленого отвору) виконуються з використанням різних методів експериментальної механіки, наприклад, електротензометрії, механічних тензометрів та оптичних методів, включаючи методи лазерної інтерферометрії [6–13].

Проте, незважаючи на досить широке використання методу отворів, він все ж таки є руйнівним. Це накладає ряд обмежень щодо його застосування. Наприклад, метод має обмежене використання при діагностиці реальних конструкцій у процесі їх експлуатації. У зв'язку з цим визначення залишкових напружень часто виконують на окремих макетах елементів і вузлів реальних конструкцій. Тому розробка та створення неруй-

нівних способів пружного розвантаження залишкових напружень натурних конструкцій є актуальною задачею.

Метою даного дослідження є створення неруйнівного методу визначення залишкових напружень, який має високу точність і достовірність, притаманну руйнівним релаксаційним методам. Для цього пропонується замінити процес свердління отворів для релаксації напружень, який порушує суцільність поверхні конструкцій, неруйнівним способом локальної релаксації напружень на основі використання імпульсів струму високої щільності $10^7...10^{10}$ А/м² (рис. 1) [14–16]. Вважається, що при введенні імпульсу струму формується зона, що має напівсферичний вигляд, у якій виникає електропластичний ефект та відбувається релаксація напружень навколо місця введення імпульсу. При цьому цілісність контрольованої ділянки матеріалу не порушується. Оскільки розмір ділянки, в якій відбувається релаксація напружень, заздалегідь не відомий і залежить від пара-

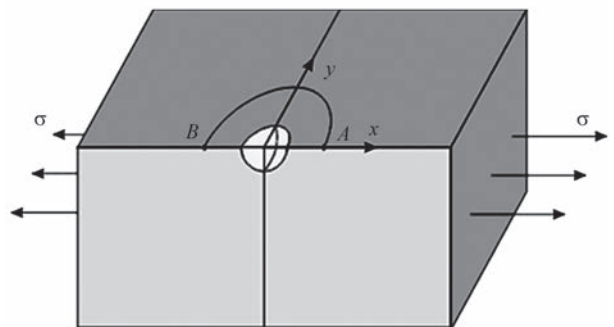


Рис. 1. Схема релаксації залишкових напружень після введення імпульсу струму

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

© Л.М. Лобанов, В.В. Савицький, О.П. Шуткевич, К.В. Шиян, І.В. Киянець, 2023

метрів електродної системи, необхідно оцінити ефективність релаксації залишкових напружень при введенні імпульсу струму.

Джерело імпульсного струму. В Інституті електродинаміки НАН України створено джерело імпульсного струму (ДІС), а в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблено два типи електродних систем ударно-імпульсного та імпульсного впливу, які використовуються для введення імпульсного струму в досліджувану ділянку об'єкта. У джерела живлення є широкі можливості регулювання основних електричних параметрів системи, що забезпечують необхідну форму імпульсів струму.

Електродна система імпульсної дії включає електрод e , вантаж P , що забезпечує необхідний контакт між електродом і точкою введення струму, джерело імпульсного струму (рис. 2). В електродній системі імпульсної дії індуктивність L котушки змінюється в діапазоні 4700...1900 мкГн, ємність C конденсаторної батареї – 3400...17000 мкФ, зарядна напруга – 50...186 В.

Створена електродна система дозволяє вводити імпульсний струм у досліджуваний матеріал, вплив якого призводить до виникнення переміщень навколо точки введення. Значення переміщень залежать від напруженого стану в точці введення імпульсу, а також від таких параметрів електродної системи як зарядна напруга на конденсаторному накопичувачі U , індуктивність L та ін. Для того, щоб визначити ефективні параметри електродної системи, необхідно оцінити ступінь релаксації напружень при введенні імпульсу струму в контрольовану ділянку досліджуваного елемента.

Вплив параметрів електродної системи на релаксацію напружень. Для визначення впливу

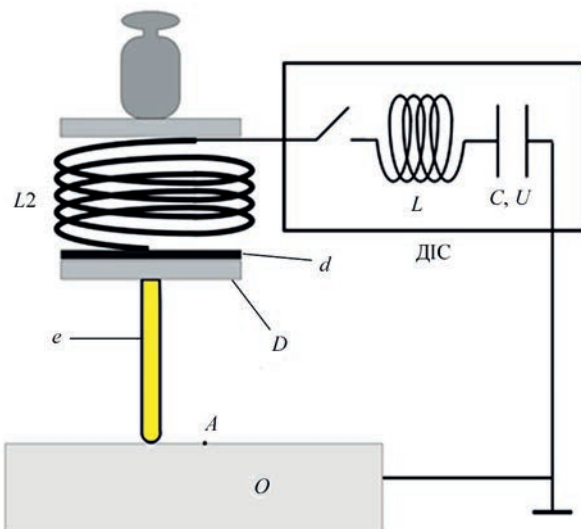


Рис. 2. Схема електродної системи ударно-імпульсного типу дії: L – котушка індуктивності; C – конденсаторна батарея із зарядною напругою U ; e – електрод; D – диск; O – об'єкт, в який вводиться імпульс струму; d – діелектрична прокладка; ДІС – джерело імпульсного струму

параметрів електродної системи на релаксацію напружень було розроблено та виготовлено механічний пристрій для навантаження тестових зразків (рис. 3, 4). У якості тестового зразка використовується балка рівного опору згину, оскільки напруження у всіх поперечних перерізах не будуть перевищувати наперед задані.

Розроблений в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона спекл-інтерферометричний прилад [11–13] дозволяє реєструвати переміщення точок поверхні в діапазоні 0,03...3 мкм. На рис. 5 представлені картини інтерференційних смуг, які містять інформацію про переміщення u_x , отримані після введення локального імпульсу струму в тестовий зразок під навантаженням (рис. 4). Інтерферограми показують, що зі збільшенням значень напружень σ_{xx} область збурень в околі точки введення імпульсу також збільшується.

У контрольовану ділянку тестового зразка в точках n_i з рівнем напружень σ_{xx} від –100 до 100 МПа вводився імпульс струму (рис. 4). У результаті локальної релаксації напружень в околі точки

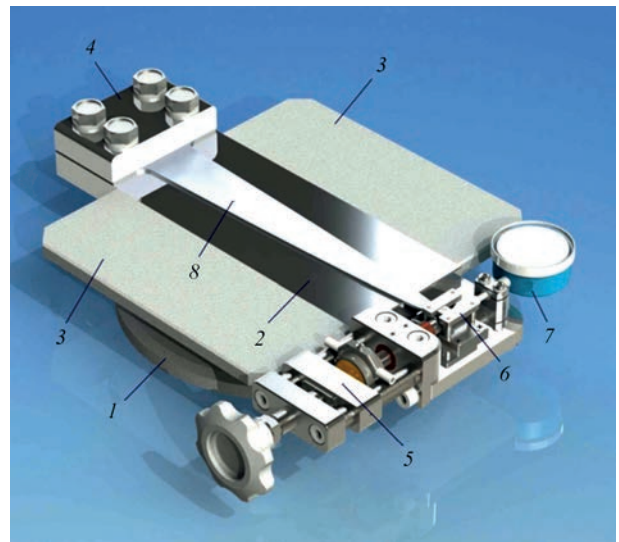


Рис. 3. Пристрій для навантаження тестових зразків: 1 – кругла пластина, на якій розміщено базову плиту для позиціонування зразка на пристрої; 2 – полірована пластина, на якій розташовано тестовий зразок; 3 – пластина для розміщення спекл-інтерферометра; 4 – притискний елемент для фіксації тестового зразка; 5, 6 – вузли навантаження тестового зразка; 7 – пристрій контролю переміщень балки (тестового зразка); 8 – балка рівного опору згину (тестовий зразок)

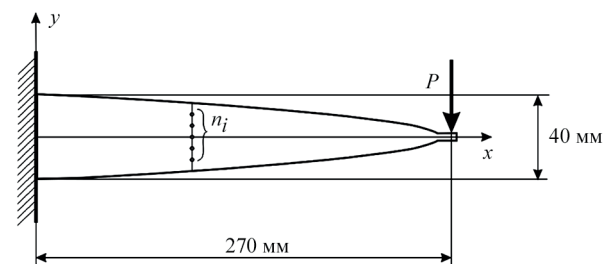


Рис. 4. Схема зразка рівного опору згину: n_i – точки, в яких вводився імпульс струму

введення імпульсу виникали переміщення, які реструвалися безконтактним методом електронної спекл-інтерферометрії.

На рис. 6 наведено графік залежності переміщень u_x від заданих напружень σ_{xx} . Даний графік демонструє, що виміряні переміщення u_x у точках A , розташованих на відстані 1,25 мм від місця введення імпульсу струму (рис. 1), лінійно залежать від напруженого стану у місці вимірювань.

Проте використання даних про переміщення тільки в точці A є недостатнім для обчислення напружень σ_{xx} у реальних конструкціях, оскільки у цих точках виникатимуть переміщення також і внаслідок дії напружень σ_{xy} . Тому необхідно ввести новий параметр, який лінійно залежить від залишкових напру-

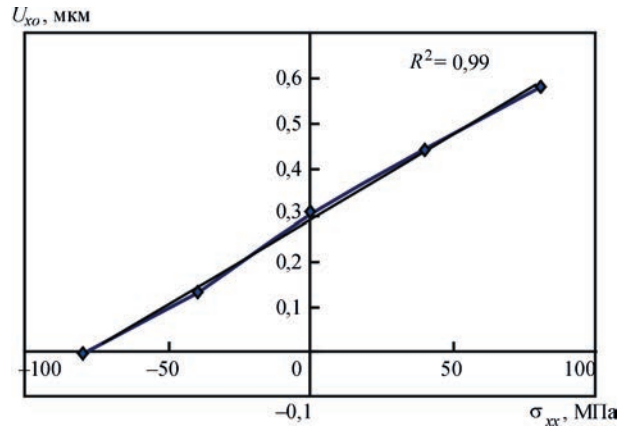


Рис. 6. Залежність переміщень u_{xo} , виміряних методом електронної спекл-інтерферометрії на відстані 1,25 мм від точки введення імпульсу струму високої щільності, від рівня заданих напружень σ_{xx} (величина вірогідності апроксимації $R^2 = 0,99$)

жень і переміщень та не залежить від розташування головних осей координат і виду напруженого стану.

Чисельні розрахунки. Припускаємо, що при введенні імпульсу струму відбувається релаксація напружень в області з віссю симетрії OZ , як при свердлінні отвору. У цьому випадку залежність переміщень u_r та u_θ , що виникають в результаті розвантаження напружень σ_{xx} , σ_{yy} і σ_{xy} , від кута θ на деякій відстані від центру отвору r у полярних координатах виражається наступними формулами [11–13, 17]:

$$u_r(r, \theta) = A\sigma_{xx} + B\sigma_{xx} \cos 2\theta \quad (1)$$

$$u_\theta(r, \theta) = C\sigma_{xx} \sin 2\theta \quad (2)$$

де коефіцієнти A , B і C залежать від граничних умов, розмірів області релаксації напружень тощо.

Вважаючи, що при введенні імпульсу струму не відбувається повної релаксації напружень, а також є початковий ефект (виникають переміщення після введення імпульсу струму в матеріалі без напружень), введемо наступні позначення:

$$\sigma_{xx}^{im} = b_{xx} + k\sigma_{xx} \quad (3)$$

$$\sigma_{yy}^{im} = b_{yy} + k_{yy}\sigma_{yy} \quad (4)$$

$$\tau_{xy}^{im} = k_{xy} + \tau_{xy} \quad (5)$$

де b_{xx} , b_{yy} і k_{xx} , k_{yy} , k_{xy} – константи, що характеризують відповідно початковий ефект і ступінь релаксації напружень порівняно з висвердленим отвором діаметром і завглибшки 1 мм.

Для плоского напруженого стану, використовуючи принцип суперпозиції напружень та вісесиметричність задачі, після перетворення рівнянь (1)–(2), отримаємо:

$$u_r(r, \theta) = A(\sigma_{xx}^{im} + \sigma_{yy}^{im}) + B[(\sigma_{xx}^{im} - \sigma_{yy}^{im}) \cos 2\theta + 2\tau_{xy}^{im} \sin 2\theta] \quad (6)$$

$$u_\theta(r, \theta) = C[(\sigma_{xx}^{im} - \sigma_{yy}^{im}) \sin 2\theta - 2\tau_{xy}^{im} \cos 2\theta] \quad (7)$$

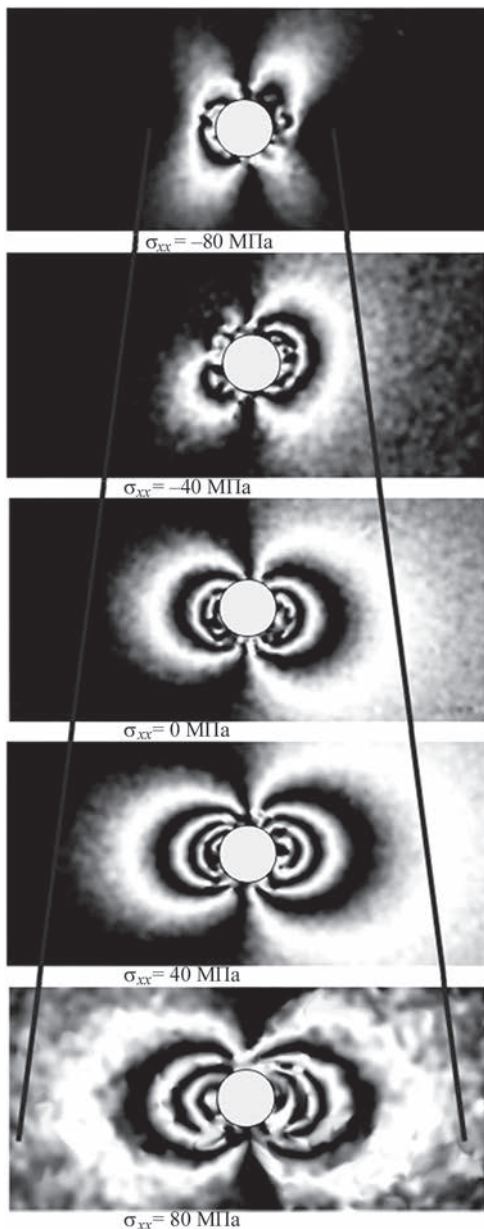


Рис. 5. Інтерферограми, одержані після введення імпульсу струму в ділянках з рівнем залишкових напружень. Параметри електродної системи: $L = 3,26$ мкГн, $U = 150$ В, $s = 0,5$ мм. Лінії позначають збільшення зони впливу релаксації напружень на переміщення при збільшенні напруженого стану

Важливою перевагою методу електронної спекл-інтерферометрії для реєстрації переміщень є можливість одночасного визначення переміщень у великій кількості точок. Це дає можливість отримати дані про переміщення u_x у точках, розташованих по колу радіусом r із центром у місці введення імпульсу струму (рис. 7).

У результаті попередніх досліджень встановлено, що з введенням імпульсу струму при використанні різних параметрів електродної системи на об'єкті виникає відбиток електрода діаметром 0,4...1,0 мм. Тому вибирається мінімальний радіус кола, у якому співвідношення «якість спекл-картини – значення переміщень» є оптимальним. Відомо, що при вимірюванні переміщень в околі висвердленого отвору методом електронної спекл-інтерферометрії оптимальним є використання відстані r , що дорівнює 2,5 радіусу отворів r_0 . Тому у подальших дослідженнях використовувалися дані про переміщення у точках, які розташовані на колі з радіусом 1,25 мм.

Для спрощення обчислень з рівнянь (6) і (7) виділимо компоненти-множники $F(\theta)$, $G(\theta)$ та $H(\theta)$ перед σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} , які залежать від кута θ та коефіцієнтів A , B і C , отримуємо наступну залежність:

$$u_x(r, \theta) = u_r(r, \theta) \cos \theta - u_\theta(r, \theta) \sin \theta \quad (8)$$

$$u_x(\theta) \Big|_{r=1,25 \text{ мм}} = F(\theta) \sigma_{xx}^{im} + G(\theta) \sigma_{yy}^{im} + H(\theta) \tau_{xy}^{im} \quad (9)$$

Вимірювання переміщень u_x у точках кола (більше трьох точок) дозволяє обчислити значення σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} методом найменших квадратів, використовуючи систему рівнянь:

$$\begin{bmatrix} F(\theta_1) & G(\theta_1) & H(\theta_1) \\ F(\theta_2) & G(\theta_2) & H(\theta_2) \\ F(\theta_3) & G(\theta_3) & H(\theta_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^{im} \\ \sigma_{yy}^{im} \\ \tau_{xy}^{im} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_x(\theta_1) \\ u_x(\theta_2) \\ u_x(\theta_3) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

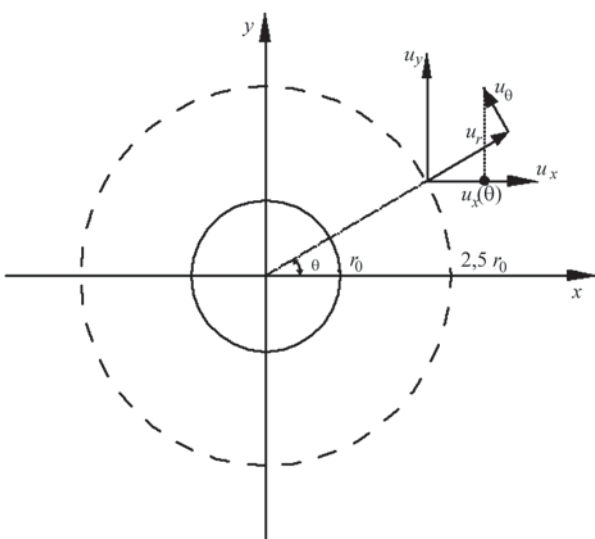


Рис. 7. Схема вимірювання переміщень в околі точки (місця) введення імпульсу струму високої щільності

Для того, щоб оцінити можливість застосування запропонованого алгоритму та використання σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} при визначенні залишкових напружень, побудуємо на основі даних про переміщення u_x , представлені на рис. 6, графік залежності σ_{xx}^{im} від заданого напруженого стану σ_{xx} . Як і у випадку з даними про переміщення u_x (рис. 6), залежність між σ_{xx}^{im} та σ_{xx} має лінійний характер (величина вірогідності апроксимації $R^2 = 0,99$). Даний графік характеризується кутом нахилу щодо осі OX , а також значенням у точці з нульовими напруженнями. З графіка можна визначити значення k_{xx} і b_{xx} , які відповідають даним параметрам електродної системи, і за формулою (3) обчислити значення залишкових напружень у точці введення імпульсу струму.

Таким чином, для визначення залишкових напружень у натурних об'єктах необхідне попереднє калібрування електродної системи на тестовому зразку з метою отримання залежності σ_{xx}^{im} від σ_{xx} (3). Для цього на балці рівного опору згину задаються напруження σ_{xx} і вводиться імпульс струму в області спостереження спекл-інтерферометра. На основі даних, отриманих методом спекл-інтерферометрії, про зміщення точок поверхні після введення імпульсу струму в метал, що знаходиться під впливом механічних напружень, із системи лінійних рівнянь (10) обчислюється значення σ_{xx}^{im} . За даними певних значень σ_{xx}^{im} у п'яти точках будується графік залежності σ_{xx}^{im} від σ_{xx} , за яким визначаються значення k_{xx} і b_{xx} відповідних параметрам даної електродної системи.

Отже, використовуючи значення σ_{xx}^{im} , обчислене на основі даних про переміщення, зареєстровані методом електронної спекл-інтерферометрії, і визначені з графіка значення k_{xx} і b_{xx} за формулою (3), можна визначити напружений стан в точці введення імпульсу струму.

Застосування функцій σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} є кращим порівняно з даними про переміщення u_x в точках A і B (рис. 1), оскільки в цьому випадку використання інформації про переміщення u_x в точках по всій довжині кола знижує відносну похибку і підвищує достовірність визначення залишкових напружень.

Експериментальні дослідження. За допомогою розробленої технології в стикових зварних з'єднаннях зі сплаву АМг5 визначалися залишкові напруження на основі використання імпульсів струму високої щільності. Результати вимірювання напружень, отриманих із застосуванням імпульсів струму, порівнювалися з даними, отриманими з використанням обладнання ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ на основі використання методу отворів у поєднанні зі спекл-інтерферометрією. Ефективність та точність вимірювання залишкових напружень цим приладом підтверджена ре-

зультатами Raund Robin теста, який проводився Міжнародним інститутом зварювання [18, 19]. На рис. 8 представлено схему зварного зразка із зазначеними перерізами, уздовж яких проводилися вимірювання.

На рис. 9 наведено результати визначення залишкових напружень із використанням імпульсів струму високої щільності уздовж перерізу

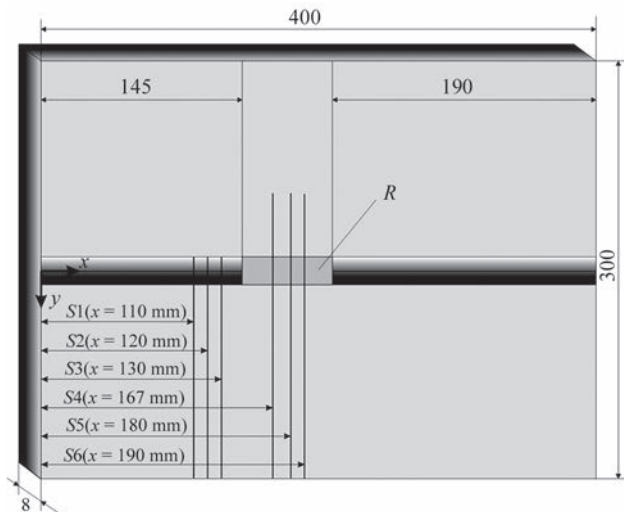


Рис. 8. Схема зварного зразка зі сплаву АМг5: S1-S6 – перерізи, в яких визначалися залишкові напруження; R – область, в якій видалено посилення зварного шва

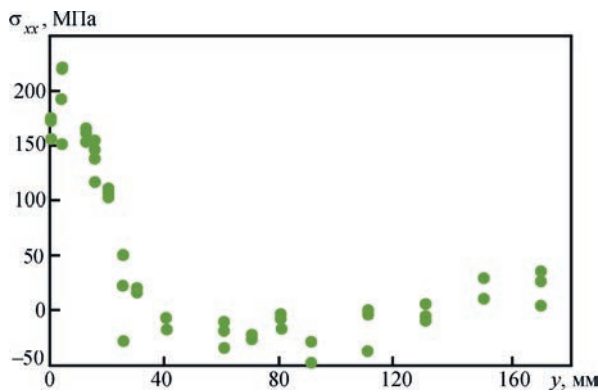


Рис. 9. Результати визначення залишкових напружень методом електронної спекл-інтерферометрії на основі використання для їх релаксації імпульсів струму високої щільності

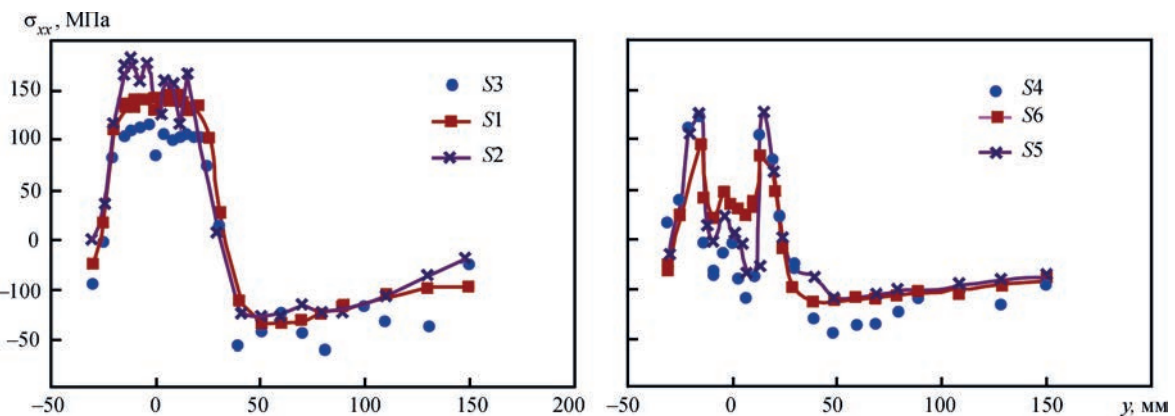


Рис. 10. Розподіл напружень σ_{xx} , що проходять через посилення зварного шва у перерізах S1-S3 (а), та після його видалення в перерізах S4-S6 (б)

S3. В експерименті реєструвалися дані про переміщення після введення імпульсів струму в точках, розташованих на однаковій відстані від центру зварного шва. Графік показує, що існує розкид отриманих експериментальних даних, тому для підвищення точності визначення напружень пропонується використовувати значення напружень усереднені за трьома точками.

Напруження визначалися двома методами в перерізах, що проходять як через посилення зварного шва (S1, S2 і S3), так і після його видалення (S4, S5 і S6) (рис. 8). Результати визначення залишкових напружень, отриманих на основі використання імпульсного методу (перерізи S3 та S4), порівнювалися з даними, отриманими методом висвердлювання отворів діаметром та завглибшки відповідно 1,0 мм (перерізи S1 і S6) та 0,5 мм (перерізи S2 і S5) (рис. 10).

Важливим є те, що результати визначення напружень в області зварного шва та пришовної зони з використанням створеного неруйнівного методу істотно ближчі до даних, отриманих методом отворів (висвердлювання отворів діаметром і завглибшки 0,5 мм), і відрізняються від даних, отриманих при використанні отворів діаметром та завглибшки 1,0 мм (рис. 10.) Це свідчить про те, що у зварному зразку існує градієнт напружень за товщиною пластин.

Криві напружень показують збіг результатів визначення залишкових напружень, отриманих запропонованим підходом та методом отворів, що свідчить про те, що розроблений неруйнівний метод визначення залишкових напружень на основі використання для їх релаксації імпульсів струму високої щільності дозволяє отримати достовірні дані про розподіл напружень уздовж обраного перерізу, не порушуючи при цьому суцільність досліджуваного матеріалу. Максимальне відхилення результатів визначення напружень неруйнівним методом порівняно з методом отворів (діаметром висвердлених отворів 0,5 мм) не перевищує 20 МПа.

Висновки

Розроблено новий неруйнівний метод визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях, який базується на використанні імпульсів струму високої щільності для локальної релаксації напружень та подальшої реєстрації переміщень методом лазерної спекл-інтерферометрії. Показано, що в результаті введення імпульсів струму відбувається часткова релаксація залишкових напружень, а величина вимірних переміщень залежить від рівня напружень у місці введення імпульсу. Експериментально підтверджено, що розроблений метод дозволяє визначити залишкові напруження з похибкою до 20 МПа порівняно з руйнівним методом отворів.

Запропонований підхід дозволяє визначення залишкових напружень безпосередньо на реальних конструкціях під час їх експлуатації, не порушуючи цілісності матеріалу. Це відкриває широкі перспективи застосування методу для моніторингу напружено-деформованого стану відповідальних зварних вузлів та конструкцій в енергетиці, авіаційній та ракетно-космічній галузях, суднобудуванні тощо. Використання запропонованого підходу дозволить підвищити надійність і безпеку експлуатації технічних об'єктів за рахунок своєчасного виявлення і усунення небезпечних напружень.

Список літератури/References

1. Kandil, F.A., Lord J.D., Fry, A.T., Grant P.V. (2001) *A review of residual stress measurement methods a guide to technique selection*. National Physical Laboratory, Teddington Middlesex, TW11 OLW, UK.
2. Vasudevan, M., Shanmugasundaram, P., Baksha Arivazhagan et al. (2014) Nondestructive assessment of residual stresses and distortion in austenitic stainless steel weld joints. *Materials Evaluation*, 72(12), 1509–1518.
3. Lasseigne, A.N., Olson, D.L. (2008) Development of nondestructive techniques for characterization of residual stresses in advanced materials. *Materials Evaluation*, 66(10), 1077–1083.
4. Robinson, A.F., Dulieu-Barton, Quinn S., R.L., Burguete, J.M. (2009) A review of residual stress analysis using thermoelastic techniques. *J. of Physics: Conference Series*, 181, 012029. DOI: <https://doi.org/0.1088/1742-6596/181/1/012029>
5. Hernandez, L.C., Ponce, L., Fundora, A. et al. (2012) Residual stress mapping in TiN coatings by nanoindentation technique. *Materials Evaluation*, 70(11), 1320–1325.

6. ASTM E837-20 *Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gages*. <https://www.astm.org/e0837-20.html>
7. (2010) *Measurement of residual stresses by the hole drilling strain gage method*. Technical Note TN- 503-6, Revision: 01-Nov-2010, Vishay Micro Measurements, Pennsylvania.
8. Makino, A., Nelson, D. (1994) Residual-stress determination by single-axis holographic interferometry and hole-drilling – Pt I. *Theory. Exp. Mech.*, 34, 66–78. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02328443>
9. Viotti, M.R., Kapp, W., Albertazzi, Jr.A. (2009) Achromatic digital speckle pattern interferometer with constant radial in-plane sensitivity by using a diffractive optical element. *Applied Optics*, 48(12), 2275–2281. DOI: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-48-12-2275>
10. Schajer, G.S. (1981) Application of finite element calculations to residual stress measurements. *J. of Engineering Materials and Technology*, 103(2), 157–163. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3224988>
11. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V. et al. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 8, 35–40.
12. Lobanov, L., Pivtorak, V., Savitsky, V., Tkachuk, G. (2013) Technology and equipment for determination of residual stresses in welded structures based on the application of electron speckle-interferometry. *Mat. Sci. Forum*, 768–769, 166–173. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.166>
13. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 24–29.
14. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Loginova Yu.V. (2005) Application of electric pulse treatment of structural elements to extend their service life. *The Paton Welding J.*, 11, 19–23.
15. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А. (2004) Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсами электрического тока высокой плотности. *Проблемы прочности*, 4, 60–67.
16. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I., Mameev, I.A. (2004) Nonstationary stress-strain state in long rod produced by pulses of high-density electric current. *Problemy Prochnosti*, 4, 60–67 [in Russian].
17. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Efficiency of electrodynamic treatment of welded joints of AMg6 alloy of different thickness. *The Paton Welding J.*, 3, 6–10.
18. Тимошенко С.П. (1972) *Курс теории упругости*. Киев, Наукова думка.
19. Timoshenko, S.P. (1972) *Course of theory of elasticity*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
20. Wohlfahrt, H., Dilger, K. (2008) *New results of the IIW Round Robin residual stress measurements*. Report on the experimental Round Robin Tests on residual stresses 2008, IIW Doc. XIII-2241-08/XV-1283-08.
21. Wohlfahrt, H., Nitschke-Pagel, T., Dilger, K. et al. (2012) Residual stress calculations and measurements – review and assessment of the IIW round robin results. *Weld World*, 56(9–10), 120–140. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03321387>

NONDESTRUCTIVE METHOD OF RESIDUAL STRESS DETERMINATION IN WELDED JOINTS BASED ON APPLICATION OF HIGH-DENSITY CURRENT PULSES AND SPECKLE-INTERFEROMETRY

L.M. Lobanov, V.V. Savitsky, O.P. Shutkevych, K.V. Shyan, I.V. Kyanets

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: shutkevich1996@gmail.com

A procedure was developed for nondestructive evaluation of residual stresses in welded joints based on application of high-density current pulses and laser speckle-interferometry. Comparison of the results of residual stress measurement in welded joints, obtained by the developed method and by hole-drilling method, was performed. 19 Ref., 10 Fig.

Keywords: residual stresses, welded joints, high-density current pulse, speckle-interferometry, electroplastic effect, hole-drilling method

Надійшла до редакції 04.10.2023

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗВАНТАЖЕННЯ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ АЕС З ДЕФЕКТОМ СТОНШЕННЯ СТІНКИ ПРИ ВСТАНОВЛЕНІ БАНДАЖУ АБО ЗВАРНОЇ МУФТИ

Г.В. Ворона, О.В. Махненко, О.С. Міленін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Утворення дефектів ерозійно-корозійного зношення в трубопроводах АЕС є однією з актуальних проблем атомної енергетики. При ремонті трубопроводу вирізають дефектну ділянку і встановлюють за допомогою зварювання нову котушку труби, що є досить трудомістким процесом, потребує зливу рідини, що транспортується. Для продовження ресурсу дефектну ділянку трубопроводу можна підсилувати встановленням ремонтної конструкції, наприклад, бандажу або зварної муфти. З метою обґрунтування доцільності використання при ремонті трубопроводу підсилюючих конструкцій проведено скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ерозійно-корозійного зношення під дією внутрішнього тиску, а також оцінку ефективності розвантаження дефектної ділянки у випадку використання при ремонті підсилюючої конструкції типу бандажа або зварної муфти. Результати аналізу показали високу ефективність використання таких конструкцій. Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні впровадження на АЕС України альтернативних технологій ремонту трубопроводів, переважно технологічних, особливо в тих випадках, коли ремонт традиційними способами не є можливим або доцільним за технічними або економічними причинами. Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: АЕС, трубопровід, ерозійно-корозійний знос, дефект стоншення стінки, підсилююча конструкція, бандаж, муфта, напружено-деформований стан, в'язке руйнування, метод скінченних елементів

Вступ. Утворення дефектів ерозійно-корозійного зношення (ЕКЗ) в трубопроводах атомних електростанцій (АЕС) є однією з актуальних проблем атомної енергетики [1, 2]. Ерозійно-корозійне зношення являє собою поєднання двох процесів – механічного зношення металу стінки трубопроводу внаслідок дії ерозії та хімічного руйнування внаслідок дії корозії [3–5]. Через комбінацію цих двох явищ відбувається зниження стійкості трубопроводу до навантажень, підвищується схильність до виникнення критичних дефектів та руйнування матеріалу [1, 6, 7].

На практиці у випадку виявлення ЕКЗ дефектну ділянку трубопроводу АЕС вирізають і встановлюють за допомогою зварювання нову котушку труби. Такий ремонт відбувається під час зупинки енергоблоку і при можливості зливу рідини, що транспортується. Існує альтернативна технологія, а саме, для продовження ресурсу дефектну ділянку трубопроводу можна підсилувати встановленням ремонтної конструкції, наприклад, бандажем або зварною муфтою [8, 9, 10, 15]. Бандажування трубопроводу – це підсилення по периметру його стінки металевими кільцями, стрічкою, дротом або неметалевими матеріалами. Можливі варіанти за способом встановлення бандажу у варіанті металевих кілець на дефектну ділянку трубопроводу зображені на рис. 1. Встановлення зварної муфти (рис. 2) використовується

для зміцнення дефектної ділянки та усунення витoku шляхом герметизації підсилюючої конструкції зварними швами. Ремонт із встановленням муфти або бандажу може бути доцільним, оскільки є менш трудомістким, ніж заміна цілої ділянки, не потребує зливу рідини із трубопроводу та може виконуватись навіть під час роботи енергоблоку.

Бандаж відрізняється від муфти тим, що встановлюється на трубопроводі без приварювання до несучої труби. Він забезпечує посилення дефектної ділянки та за потреби може бути досить легко демонтований для проведення капітального ремонту трубопроводу. Також бандаж може використовуватись багаторазово. Використання бандажу доцільно лише для тих дефектів, які не втратять герметичність ще за тривалий період експлуатації або як тимчасовий засіб до наступного планового ремонту [9].

Метою роботи є обґрунтування використання альтернативних ремонтних технологій трубопроводів з дефектами ЕКЗ для потреб атомної енергетики, розробка математичних моделей і проведення скінченно-елементного аналізу напружено-деформованого стану (НДС) прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ під дією внутрішнього тиску, а також оцінка ефективності розвантаження дефектної ділянки у випадку використання при ремонті підсилюючої конструкції типу бандажа або зварної муфти.

Ворона Г.В. – <https://orcid.org/0000-0002-9724-3759>, Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>,

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

© Г.В. Ворона, О.В. Махненко, О.С. Міленін, 2023

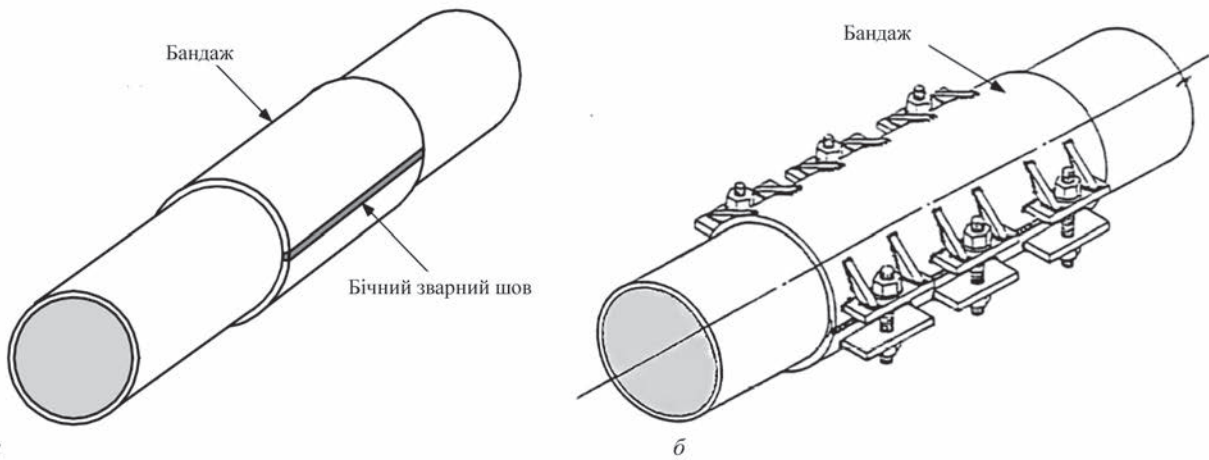


Рис. 1. Види бандажів за способом встановлення: а – зварний; б – на болтових з’єднаннях

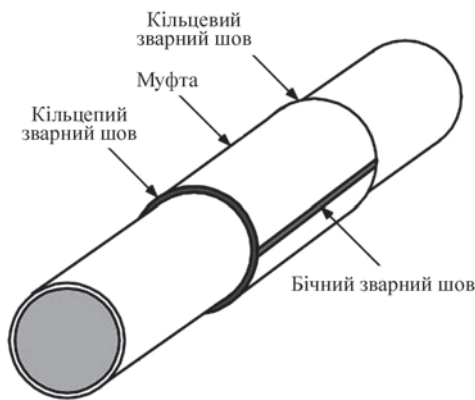


Рис. 2. Підсилення дефектної ділянки трубопроводу зварною муфтою

При оцінці допустимості ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ до подальшої експлуатації граничний стан трубопроводу оцінюється з точки зору в’язкого руйнування, наприклад, за результатами прогнозування інтенсивності пластичних деформацій в зоні дефекту. У роботі методом скінченних елементів досліджувався вплив геометричних параметрів підсилюючої конструкції (товщина, довжина та початковий проміжок між зовнішньою поверхнею трубопроводу та внутрішньою поверхнею підсилюючої конструкції) на роботоздатність прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ.

Постановка задачі. У якості прикладу розглядалася прямолінійна ділянка трубопроводу, яка має стандартні розміри та параметри навантаження для технологічних трубопроводів АЕС (матеріал – сталь 20): зовнішній діаметр $D = 630$ мм, товщина стінки $s = 25$ мм, проектний тиск $P = 11,8$ МПа, температура $T = 300$ °С.

Критичні, тобто недопустимі геометричні параметри дефекту стоншення стінки трубопроводу (рис. 3), визначені згідно з методикою МТ-Т.0.03.224-18 [11, 18], що регламентує процедуру

розрахункової оцінки допустимої товщини елементів трубопроводів АЕС з вуглецевих сталей, що піддаються дії ерозійно-корозійного зносу і яка введена в дію ДП НАЕК «Енергоатом» у 2019 р. Проведено експрес-оцінку допустимості до подальшої експлуатації ділянки трубопроводу з різними геометричними параметрами дефекту ЕКЗ, за результатами якої визначено розміри критичного дефекту стоншення стінки, а саме, ідеалізований дефект ЕКЗ напівеліптичної форми завдовжки $2L = 4s = 100$ мм, завширшки $2h = 2s = 50$ мм, завглибшки $a = 20$ мм (рис. 3).

Розміри підсилюючої конструкції типу бандаж та муфта були вибрані наступними (рис. 4): внутрішній діаметр $D = 630$ мм, напівдовжина $L_b = 630$ мм, товщина $s_b = s = 25$ мм. Геометричні моделі бандажу та зварної муфти відрізняються лише наявністю кільцевих зварних швів приєднання муфти до трубопроводу.

Розробка скінченно-елементної моделі. За вказаними параметрами побудовано геометричну та скінченно-елементну модель прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом стоншення (рис. 3). Враховуючи наявність двох площин, модель включає 1/4 частину даної ділянки трубопроводу з дефектом. Використано наступні механічні властивості матеріалу: модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$, границя текучості для сталі 20 при температурі $T = 300$ °С, $\sigma_T = 177$ МПа [12]. Аналогічно були створені скінченно-елементні моделі з використанням підсилюючих конструкцій типу бандаж та зварна муфта (рис. 4, 5).

Задача НДС ділянки трубопроводу розглядається в пружно-пластичній постановці, оскільки під дією внутрішнього тиску в зоні дефекту стоншення стінки можливо утворення і розвиток пластичних деформацій. Деформаційне зміцнення матеріалу в розробленій моделі пружно-пластичного деформування не враховується, що робить модель з точки зору визначення пластичних деформацій

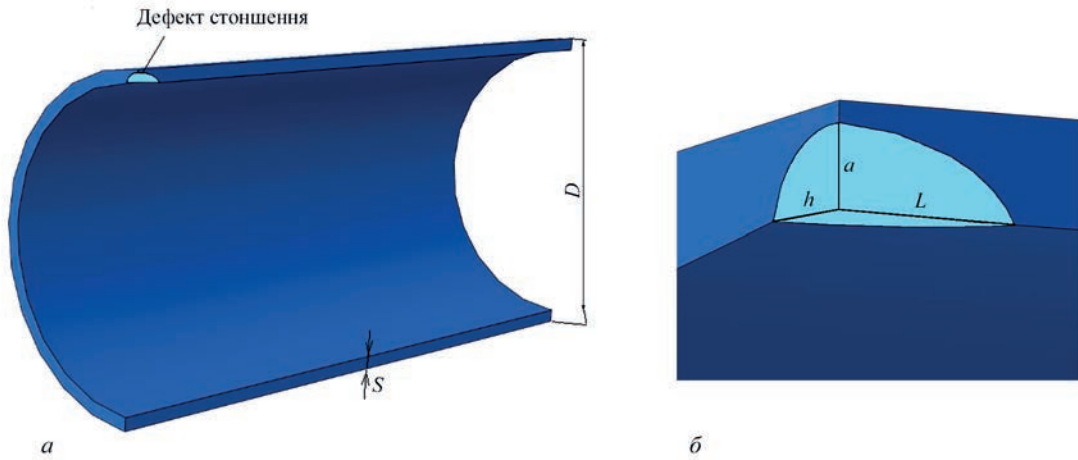


Рис. 3. Геометрична модель 1/4 прямолинійної дефектної ділянки трубопроводу (а) та внутрішнього напівеліптичного дефекту стоншення стінки (б)

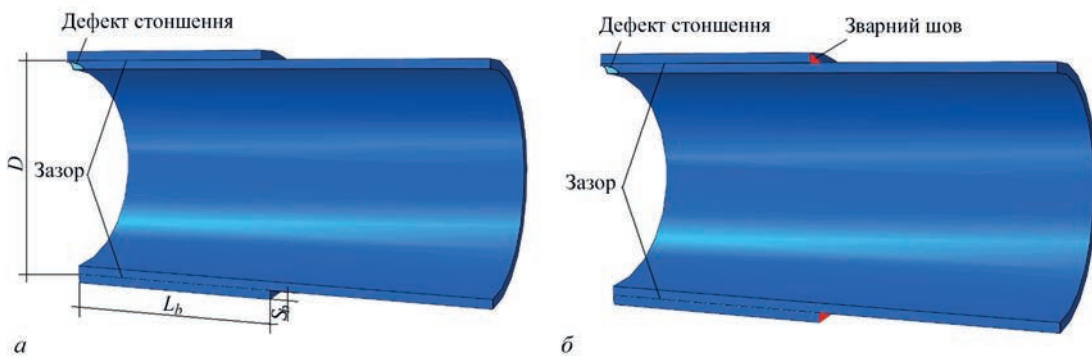


Рис. 4. Геометричні моделі прямолинійної ділянки трубопроводу, підсиленої бандажем (а) або зварною муфтою (б)

цій консервативнішою. На внутрішню поверхню трубопроводу та зону дефекту прикладено проектний тиск $P = 11,8$ МПа. На торцеву поверхню моделі додано граничні умови у вигляді осьових розтягуючих напружень σ_{zz} величиною [14]:

$$\sigma_{zz} = \frac{P \cdot D}{2s} \rightarrow \sigma_{zz} = 72,6 \text{ МПа} \quad (1)$$

Мінімальний розмір скінченного елемента (гексагональний об’ємний елемент) – 3 мм (рис. 5). Модель ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки складається з 149556 елементів, а модель з використанням ремонтної конструкції – з 213316

елементів. Мінімальний розмір елемента сітки було обрано з умови, що значення максимальної еквівалентної пластичної деформації змінюється менш ніж на 5 % при зменшенні розміру сітки в 2 рази.

Граничний стан типових конструкцій зазвичай визначається складними фізико-механічними явищами, такими як необоротна пластична деформація, тривісність напружень, докритичне пошкодження, взаємодія субкритичних дефектів, зародження та поширення макропошкоджень. Оскільки трубопроводи з виявленими ЕКЗ не характеризуються різкими геометричними концентраторами напружень, руйнування зумовлене в’яз-

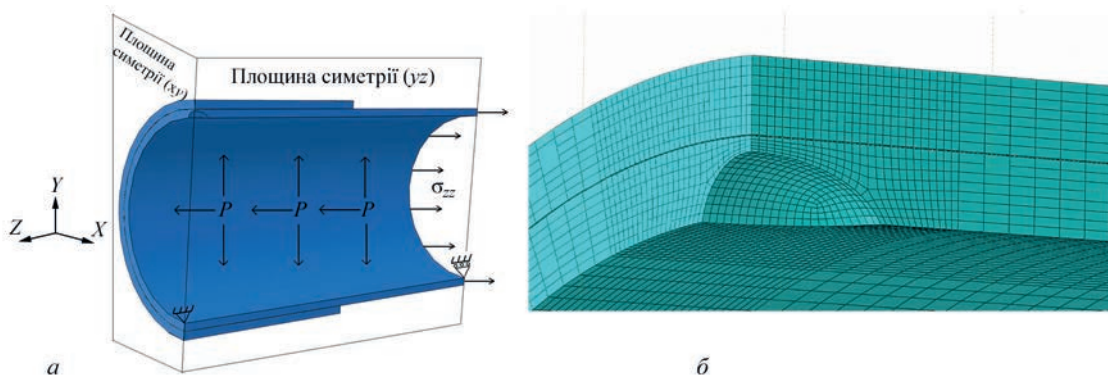


Рис. 5. Скінченно-елементна модель прямолинійної ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки та підсилюючою конструкцією: а – схема моделі; б – сітка скінчених елементів в зоні дефекту

ким механізмом. Для чисельного прогнозування критичного стану за механізмом в'язкого руйнування в матеріалі трубопроводу під внутрішнім тиском з ерозійною-корозійною втратою металу може бути використаний деформаційний критерій [13]:

$$\int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c} > 1, \quad (2)$$

де $d\varepsilon_i^p$ – приріст інтенсивності пластичних деформацій,

$$d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_{xx}^p - d\varepsilon_{yy}^p)^2 + (d\varepsilon_{yy}^p - d\varepsilon_{zz}^p)^2 + (d\varepsilon_{zz}^p - d\varepsilon_{xx}^p)^2 + \frac{3}{2}(d\varepsilon_{xy}^{p2} + d\varepsilon_{yz}^{p2} + d\varepsilon_{zx}^{p2})}$$

або в тензорній формі $d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}$, $d\varepsilon_{ij}^p$ – компоненти тензора приросту інтенсивності пластичних деформацій; ε_c – критичне значення пластичної деформації, що залежить від тривісності напружень, температури, неоднорідності матеріалу тощо.

Результати скінченно-елементного аналізу НДС. Результати чисельного аналізу НДС даної ділянки трубопроводу без підсилюючої конструкції показали, що під дією внутрішнього тиску $P = 11,8$ МПа в зоні дефекту стоншення виникають максимальні окружні напруження до 227 МПа (рис. 6), які перевищують границю текучості матеріалу (177 МПа) при заданій температурі $T = 300$ °С, а також, звісно, перевищують номінально допустиме напруження статичної міцності, що визначається згідно з ПНАЕ Г 7-002-86 [12] за наступної умови:

$$[\sigma] = \min \{ \sigma_B / 2,6; \sigma_T / 1,5 \} \quad (3)$$

Границя текучості та границя міцності для сталі 20 за температури $T = 300$ °С складають $\sigma_t = 177$ МПа та $\sigma_B = 363$ МПа відповідно. Згідно з (3) допустиме напруження дорівнює $[\sigma] = 118$ МПа.

Але такий підхід на основі порівняння діючих напружень у стінці трубопроводу від внутрішнього тиску з допустимими напруженнями статичної міцності для матеріалу трубопроводу на практиці використовують для вибору номінальних розмірів при проектуванні, а для оцінки граничного стану, що визначається розвитком в'язкого руйнування

металу трубопроводу з дефектом ЕКЗ, є занадто консервативним. Тому доцільнішим є приведений вище (2) підхід на основі аналізу результатів приросту інтенсивності пластичних деформацій в зоні дефекту.

Згідно з результатами скінченно-елементного моделювання максимальна інтенсивність пластичних деформацій в зоні дефекту ЕКЗ становить 0,0112 (1,12 %) (рис. 7, а), що перевищує «умовну» граничну деформацію $\varepsilon_c = 0,01$ (1 %) [13]. Це означає, що реалізуються умови зародження в'язкого руйнування матеріалу. З метою запобігання подальшим деформаціям і руйнуванню трубопроводу може бути встановлена ремонтна підсилююча конструкція типу бандажа зварної муфти. При цьому максимальні напруження (227 МПа) все одно перевищують допустимі напруження статичної міцності, але за рахунок встановлення підсилюючої конструкції максимальна інтенсивність пластичної деформації не перевищує граничну деформацію в 1 % (рис. 7, б).

Визначення мінімальної товщини стінки дефектних ділянок трубопроводів. Для перевірки коректності використання деформаційного підходу (2) оцінки граничного стану за критерієм в'язкого руйнування трубопроводу з дефектом ЕКЗ на основі аналізу приросту інтенсивності пластичних деформацій в зоні дефекту проведено порівняння для різних трубопроводів значень мінімальної товщини стінки дефектних ділянок, визначених за Методикою МТ-Т.0.03.224-18 [11] і за підходом (2) методом скінченно-елементного моделювання. Результати, наведені в табл. 1, показали, що мінімальні товщини стінок за Методикою в більшості варіантів приблизно дорівнюють результатам розрахунку за використаним деформаційним підходом. Тільки в одному варіанті трубопроводу 720×24 мм мінімальна товщина стінки згідно Методики на 30 % нижче, ніж розрахована за критерієм (2). Тобто результати використання підходу (2) оцінки критичного стану в'язкого руйнування трубопроводу з дефектом ЕКЗ узгоджуються з методикою МТ-Т.0.03.224-18 [11, 18]. Але ширші можливості скінченно-елементного моделювання з точки зору точності описання

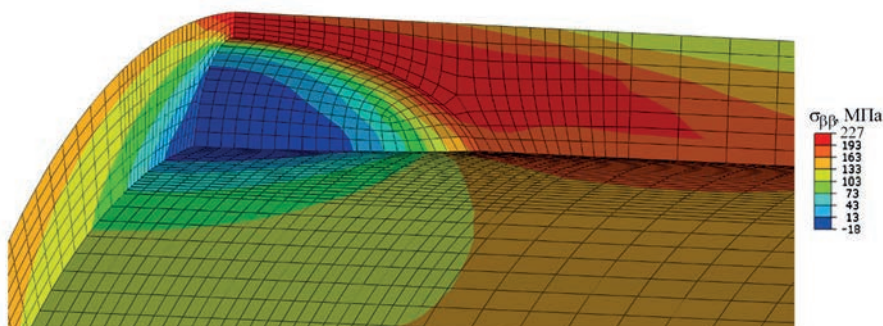


Рис. 6. Розподіл окружних напружень $\sigma_{\varphi\varphi}$ в зоні дефекту стоншення стінки трубопроводу без підсилюючої конструкції

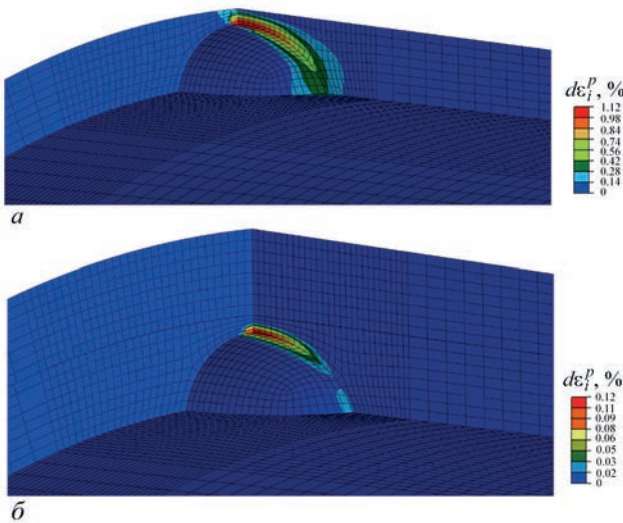


Рис. 7. Розподіл приросту інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_i^p$ ділянки трубопроводу з дефектом: *a* – без підсилюючої конструкції $d\varepsilon_i^p = 1,12\%$; *b* – з підсилюючою конструкцією $d\varepsilon_i^p = 0,12\%$ (на порядок нижче)

фізико-механічних процесів, що визначають надійність зварних конструкцій, робить його раціональним для використання, зокрема при плануванні ремонтно-відновлювальних робіт.

Вплив початкового зазору. На розвантаження дефектної ділянки трубопроводу суттєво впливає початковий зазор між трубопроводом і ремонтною конструкцією [15]. Надто велика величина проміжку може призвести до того, що розвантаження ремонтною конструкцією не відбуватиметься, а її встановлення буде не ефективним. Тому на практиці використовують спеціалізоване обладнання, для того щоб при встановленні притиснути підсилюючу конструкцію до трубопроводу і забезпечити мінімальний проміжок. Результати стосовно залежності величини приросту інтенсивності пластичних деформацій від величини проміжку зображено на рис. 8.

Результати чисельного прогнозування ступеня розвантаження зони дефекту трубопроводу при встановленні бандажу та зварної муфти показали, що дані ремонтні конструкції працюють на розвантаження зони дефекту стоншення стінки майже однаково. Різниця в осьових переміщеннях бандажу та муфти відносно трубопроводу не визначено. Але зварна муфта внаслідок наявності зварного з'єд-

нання ще додатково забезпечує герметичність у випадку розвитку дефекту до наскрізного. При збільшенні початкового проміжку між трубопроводом і ремонтною конструкцією величина максимальних пластичних деформацій збільшується. При величині проміжку в 0,2 мм і більше ремонтна конструкція перестає працювати на розвантаження даної ділянки, оскільки під дією внутрішнього тиску (11,8 МПа) в трубопроводі ($D = 630$ мм, $s = 25$ мм) виникають радіальні деформації, які становлять 0,22 мм, і трубопровід лише вибирає початковий проміжок, а бандаж або муфта не підсилюють дефектну ділянку. Тому такі технологічні параметри, як початковий проміжок, скидання внутрішнього тиску перед і підняття після встановлення підсилюючої конструкції, є важливими.

Вплив товщини та довжини підсилюючої конструкції. Було розглянуто вплив таких геометричних параметрів, як товщина та довжина ремонтної конструкції, на розвантаження пошкодженої ділянки трубопроводу. Також варто зазначити, що для полегшення аналізу дані моделі були побудовані без урахування проміжку між ремонтною конструкцією і трубопроводом, тобто ремонтна конструкція починає працювати на розвантаження відразу. Результати аналізу впливу зміни товщини при сталій довжині конструкції та зміни довжини зі сталою товщиною відповідно були зображені на графіках (рис. 9).

Як видно з рис. 9, *a*, при зменшенні товщини ремонтної конструкції максимальне значен-

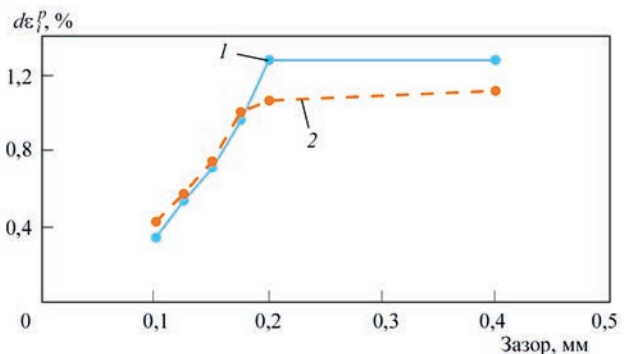


Рис. 8. Залежності максимальних значень приросту інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_i^p$ від початкового проміжку між трубопроводом і підсилюючою конструкцією: 1 – муфта; 2 – бандаж

Таблиця 1. Порівняння мінімальних товщин стінки дефектних ділянок трубопроводів за Методикою МТ-Т.0.03.224-18 і за підходом (2)

Параметри трубопроводу					МТ-Т.0.03.224-18		Підхід (2)		
D , мм	s , мм	L/h , мм	T , °C	P , МПа	s_{\min} , мм	$d\varepsilon_i^p$, %	s_{\min} , мм	$d\varepsilon_i^p$, %	
89	2,8	5,6/2,8	295	7,85	0,5	0,43	0,3	1,00	
325	16	32/16	150	9,8	4,5	0,07	4,05	1,01	
630	25	50/25	300	11,78	5	1,12	5,5	1,00	
720	24	48/24	150	10,8	3	1,94	4,6	0,95	

Примітка. s_{\min} – мінімально допустима товщина в зоні дефекту; $d\varepsilon_i^p$ – інтенсивність пластичних деформацій.

ня еквівалентної пластичної деформації зростає. Натомість при зменшенні напівдовжини ремонтної конструкції, як показано на рис. 9, б, з 630 мм до ≈ 300 мм інтенсивність пластичних деформацій майже не зростає, а при зменшенні до 150 мм їх значення найнижчі. З цього можна зробити висновок, що використання занадто довгої ремонтної конструкції не є доцільним, а зменшення її довжини до 300 мм дозволить зменшити витрати на ремонт пошкодженої ділянки трубопроводу.

Ефективність розвантаження за рахунок підсилюючої конструкції. Для перевірки ефективності ремонту розраховано навантаженість дефектної ділянки трубопроводу до ремонту та після встановлення підсилюючої конструкції. Коефіцієнт розвантаження за рахунок встановлення підсилюючої конструкції визначається за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{P_{ld}}{P_l} \quad (4)$$

де P_{ld} – граничний тиск в дефектній ділянці трубопроводу без підсилюючої конструкції; P_l – тиск, при якому досягається гранична пластична деформація $\epsilon_c = 0,01$ в дефектній ділянці трубопроводу з підсилюючою конструкцією.

Розраховані коефіцієнти розвантаження розглянутих типових варіантів трубопроводів занесені в табл. 2. Визначені значення коефіцієнтів розвантаження (0,43...0,51) дефектних ділянок при використанні підсилюючої конструкції типу бандаж з товщиною, що дорівнює товщині стінки, для трубопроводів різних типорозмірів показали досить високу ефективність використання таких конструкцій.

Прогнозування ресурсу дефектної ділянки після ремонту. Термін залишкового ресурсу де-

фектної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ можна оцінити [16]:

$$t_r = \frac{s_r - s_{min}}{w_{ЕКЗ}}, \text{ якщо } s_r > s_{min} \quad (5)$$

де s_r – залишкова товщина стінки в зоні дефекту, мм; s_{min} – розрахункова мінімально допустима товщина стінки, мм; $w_{ЕКЗ}$ – швидкість розвитку дефекту ЕКЗ, мм/рік.

Термін безпечної експлуатації дефектної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ після встановлення підсилюючої конструкції можна прогнозувати із умови розвитку дефекту стоншення стінки наскрізь. Якщо встановлюються бандаж або муфта однакової товщини з трубопроводом, тоді у випадку розвитку дефекту стоншення стінки наскрізь буде забезпечуватись міцність, а для муфти – ще і герметичність ділянки. Таким чином, якщо зробити припущення про постійну швидкість розвитку дефекту ЕКЗ, термін безпечної експлуатації t_r дефектної ділянки трубопроводу із встановленим бандажем або муфтою складає:

$$t_r = \frac{s_r}{w_{ЕКЗ}}, \quad (6)$$

Швидкість розвитку дефекту ЕКЗ $w_{ЕКЗ}$ можна визначити в першому наближенні на основі даних стосовно терміну експлуатації ділянки трубопроводу до ремонту t_E , рік, та різниці початкової s і залишкової s_r товщини стінки в зоні дефекту ЕКЗ на момент ремонту, мм:

$$w_{ЕКЗ} = \frac{s - s_r}{t_E} \quad (7)$$

Наприклад, для трубопроводу $D = 630$ мм, $s = 25$ мм, який працює під дією внутрішнього тиску 11,8 МПа вже 30 років, при плановому контролі

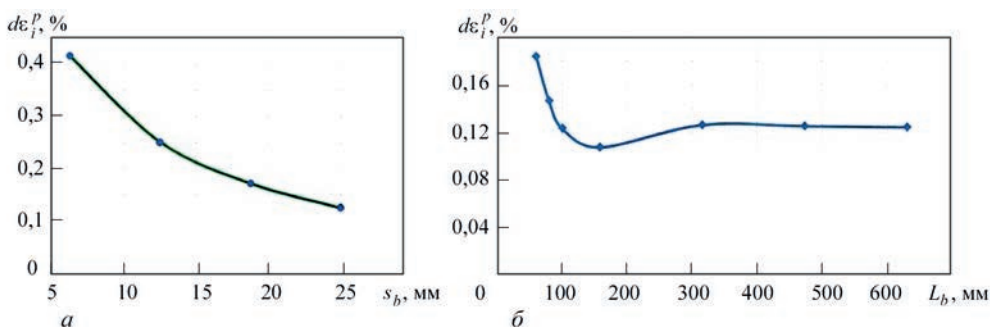


Рис. 9. Залежність максимальних значень приросту інтенсивності пластичних деформацій $d\epsilon_i^p$ в зоні дефекту ЕКЗ трубопроводу ($D = 630$ мм, $s = 25$ мм) від геометричних параметрів підсилюючої конструкції: а – товщини s_b ; б – напівдовжини L_b

Таблиця 2. Визначення коефіцієнтів розвантаження η ділянок трубопроводів при встановленні підсилюючої конструкції

D, мм	s, мм	P, МПа	T, °C	L/h/a, мм	s _{min} , мм	Критичний тиск P, МПа		η
						P _{ld}	P _l	
89	2,8	7,85	295	5,6/2,8/2,3	0,5	7,85	16	0,51
325	16	9,8	150	32/16/13,5	2,5	9,8	18	0,46
630	25	11,78	300	50/25/20	5	11,78	21	0,44
720	24	10,8	150	48/24/19,5	4,5	10,8	19	0,43
820	18	1,57	188	36/18/16	2,0	6	11	0,45

виявлено дефект ЕКЗ розміром 50×25 мм з мінімальною товщиною 5 мм. Тоді встановлення бандажу завтовшки $s_b = 25$ мм може подовжити термін експлуатації дефектної ділянки приблизно на:

$$t_r = \frac{s_r \cdot t_E}{(s - s_r)} = 5 \cdot 30 / (25 - 5) = 7,5 \text{ років.}$$

У випадку встановлення зварної муфти термін експлуатації дефектної ділянки може бути ще довшим, який можна порівнювати з терміном експлуатації ділянки після ремонту за традиційною технологією вставки нової котушки, але це потребує додаткового обґрунтування міцності кільцевих зварних з'єднань під дією внутрішнього тиску в порожнині між трубою і муфтою.

Чим більша залишкова товщина стінки трубопроводу в зоні ЕКЗ та нижча швидкість розвитку дефекту, тим доцільніше встановлювати ремонтну підсилюючу конструкцію, оскільки термін її використання до наступного ремонту буде тривалішим. Так, відповідно до вимог ГБН [17] встановлення бандажу на магістральний трубопровід виконують у тому випадку, коли максимальна глибина поодиноких дефектів або групових корозійних ушкоджень не перевищує 50 % від номінальної товщини стінки трубопроводу.

Висновки

За результатами проведеного аналізу НДС прямолинійної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ під дією внутрішнього тиску можна зробити висновок, що проводити оцінку граничного стану в'язкого руйнування трубопроводу з дефектом ЕКЗ на основі порівняння діючих напружень в стінці трубопроводу від внутрішнього тиску з допустимими напруженнями статичної міцності для матеріалу трубопроводу є занадто консервативним. Доцільнішим є використання підходу на основі аналізу утворення пластичних деформацій в зоні дефекту і допущення, що приріст інтенсивності пластичних деформацій не перевищує умовну граничну деформацію, наприклад, $\epsilon_c = 1$ %. Результати використання такого підходу оцінки граничного стану в'язкого руйнування трубопроводу з дефектом ЕКЗ добре узгоджуються з введеною в дію ДП «НАЕК «Енергоатом» в 2019 р. методикою МТ-Т.0.03.224-18, яка регламентує визначення допустимих товщин елементів трубопроводів АЕС з вуглецевих сталей під дією ерозійно-корозійного зносу.

З метою обґрунтування використання альтернативних ремонтних технологій трубопроводів для потреб атомної енергетики розроблено математичні моделі та засоби їх скінченно-елементної реалізації для визначення НДС і граничного стану дефектної ділянки трубопроводу при встановленні ремонтної підсилюючої конструкції типу бан-

даж або зварної муфти. Результати скінченно-елементного аналізу показали:

1. На розвантаження дефектної ділянки трубопроводу суттєво впливає початковий проміжок між трубопроводом і ремонтною конструкцією, оскільки при його наявності ремонтна конструкція починає розвантаження дефектної ділянки трубопроводу, лише коли даний проміжок буде вибраний трубопроводом внаслідок радіальної деформації під дією внутрішнього тиску при експлуатації. Доцільно використовувати спеціалізоване обладнання для притискання підсилюючої конструкції до трубопроводу під час її встановлення.

2. Ремонтні конструкції типу бандаж і зварна муфта працюють на розвантаження зони дефекту стоншення стінки однаково. Перевагою бандажу є низька трудомісткість його встановлення і можливість його багаторазового використання, а перевагою зварної муфти є забезпечення герметичності у випадку розвитку дефекту наскрізь.

3. У більшості випадків доцільно використовувати підсилюючі конструкції, товщина яких дорівнює товщині трубопроводу. При зменшенні товщини ремонтної конструкції ефективність розвантаження зони дефекту стоншення стінки суттєво знижується.

4. Використання ремонтної конструкції великої довжини не є доцільним, оскільки при зменшенні довжини до певного значення ефективність розвантаження не змінюється. Для локального дефекту стоншення стінки оптимальна довжина підсилюючої конструкції може дорівнювати половині діаметра трубопроводу. Використання ремонтної конструкції з оптимальною довжиною дозволить зменшити витрати на матеріал ремонтної конструкції та спростить її встановлення.

5. Дані результати можуть бути використані переважно при ремонті технологічних трубопроводів АЕС, особливо в тих випадках, коли ремонт за традиційними способами вирізки дефектної ділянки і вварювання нової котушки трубопроводу не є можливим або доцільним з різних причин.

6. Розрахований коефіцієнт розвантаження (0,43...0,51) дефектної ділянки при встановленні підсилюючої конструкції типу бандаж з товщиною, що дорівнює товщині стінки, для трубопроводів АЕС різних типорозмірів показав високу ефективність використання таких конструкцій.

7. Термін безпечної експлуатації дефектної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ після встановлення підсилюючої конструкції можна визначати з умови розвитку дефекту стоншення стінки наскрізь. Чим більша залишкова товщина стінки трубопроводу в зоні ЕКЗ та нижча швидкість розвитку дефекту, тим доцільніше встановлювати ремонтну конструкцію, оскільки термін її використання до наступного ремонту буде тривалішим.

Таким чином, ремонтні технології встановлення підсилюючих конструкцій типу бандаж або зварної муфти дозволяють ефективно посилювати ділянки трубопроводів АЕС з дефектами стоншення стінки, відновлювати їх несучу здатність, і можуть бути рекомендовані до впровадження на АЕС України, переважно при ремонті технологічних трубопроводів.

Список літератури

- Ageiev, S. (2021) Methodology for Assessing the Allowable Wall Thicknesses of Carbon Steel NPP Piping under Erosion-Corrosion Wear. *J. Nuclear and Radiation Safety*, **3**(91), 32–42, DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3\(92\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3(92).04)
- Ожигов Л., Митрофанов А., Крайнюк Є. та ін. (2013) Експлуатаційне зношування трубопроводів другого контуру енергоблоків ВВЕР-1000. *Вісник ТНТУ*, **69**(1), 55–62 (механіка та матеріалознавство).
- Gribok, A., Vivek Agarwal (2015) Flow-Assisted Corrosion in Nuclear Power Plants. No. INL/EXT-15-36611-Rev000. Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States).
- Poulson, Bryan (2014) Predicting and preventing flow accelerated corrosion in nuclear power plant. *Int. J. of Nuclear Energy*, **2014**, Article ID 423295. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/423295>
- NEA (2015) *CODAP Topical Report: Flow Accelerated Corrosion (FAC) of Carbon Steel and Low Alloy Steel Piping in Commercial Nuclear Power Plants*. OECD Publishing, Paris.
- Ворона Г.В., Анащенко М.С., Махненко О.В. (2023) Автоматизація процедури визначення допустимості ерозійно-корозійного зносу в трубопроводах АЕС. *Mech. Adv. Technol.*, **7**(1), 113–121. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.272443>
- Махненко В.И., Великоиваненко О.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2010) Совершенствование метода оценки риска разрушения в зоне утонений стенки магистральных трубопроводов. *Автоматическая сварка*, **5**, 16–21.
- Венгриянюк Т.П. (2010) Відновлення і зміцнення нафтогазопроводів. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, **2**(35), 136–139. DOI: <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/591>
- Jaske, Carl E., Brian O. Hart, William A. Bruce (2006) *Updated pipeline repair manual*. No. R2269-01R.
- Repair of Pressure Equipment and Piping. An American national standard*. ASME PCC-2-2018 (Revision of ASME PCC-2-2015).
- (2019) *Методика определения допустимых толщин элементов трубопроводов АЭС из углеродистых сталей подверженных действию эрозивно-коррозионного износа МТ-Т.0.03.224-18*. ГП НАЭК «Энергоатом».
- (1989) ПНАЭ Г-7-002-86. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Москва, Энергоатомиздат.
- Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **171**, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
- Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. (1966) *Пластинки и оболочки*. Москва, Наука.
- Махненко В.И., Великоиваненко О.А., Міленін О.С., Пивторак Г.П. (2012) Розрахункова методика оцінки ефективності постановки муфт (бандажів) у зоні стоншення стінки магистрального трубопроводу. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: сб. наук. статей*. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, сс.15–17.
- Кравченко В.П. (2017) Повышение безопасности и экономичности АЭС путем управления ресурсом трубопроводов второго контура. *Ядерная и радиационная безопасность*, **3**, 25–29. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2017.3\(75\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2017.3(75).04)
- (2011) ГБН В.3.1-00013741-12:2011. *Магістральні газопроводи, ремонт дуговим зварюванням в умовах експлу-*

атації. Київ, Міністерство енергетики та вугільної промисловості України.

- Orynyak, I., Ageiev, S., Radchenko, S., Zarazovskii, M. (2015) Local limit load analytical model for thick-walled pipe with axial surface defect. *J. of Pressure Vessel Technology*, **137**(5), 051204. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029523>

References

- Ageiev, S. (2021) Methodology for assessing the allowable wall thicknesses of carbon steel NPP piping under erosion-corrosion wear. *J. Nuclear and Radiation Safety*, **3**(91), 32–42, DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3\(92\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3(92).04)
- Ozhygov, L., Mytrofanov, A., Krainyuk, E. et al. (2013) Operational wear of pipelines of second circuit of WWER-1000 power units. *Visnyk TNTU*, **69**(1), 55–62 [in Ukrainian].
- Gribok, A., Vivek Agarwal (2015) Flow-Assisted Corrosion in Nuclear Power Plants. No. INL/EXT-15-36611-Rev000. Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States).
- Poulson, Bryan (2014) Predicting and preventing flow accelerated corrosion in nuclear power plant. *Int. J. of Nuclear Energy*, **2014**, 423295. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/423295>
- NEA (2015) *CODAP Topical Report: Flow Accelerated Corrosion (FAC) of Carbon Steel and Low Alloy Steel Piping in Commercial Nuclear Power Plants*. OECD Publishing, Paris.
- Vorona, G.V., Ananchenko, M.S., Makhnenko, O.V. (2023) Automation of procedure for determination of acceptance of erosion-corrosion wear in NPP pipelines. *Mech. Adv. Technol.*, **7**(1), 113–121 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.272443>
- Makhnenko, V.I., Velikoivanenko, O.A., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. (2010) Improvement of method for estimation of the risk of fracture within the thinning zone on walls of main pipelines. *The Paton Welding J.*, **5**, 10–14 [in Russian].
- Vengrynyuk, T.P. (2010) Restoration and strengthening of gas-and-oil pipelines. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, **2**(35), 136–139 [in Ukrainian]. DOI: <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/591>
- Jaske, Carl E., Brian O. Hart, William A. Bruce (2006) *Updated pipeline repair manual*. No. R2269-01R.
- Repair of Pressure Equipment and Piping. An American national standard*. ASME PCC-2-2018 (Revision of ASME PCC-2-2015).
- (2019) *MT-T.0.03.224-18 Procedure for determination of acceptable thicknesses of NPP pipeline elements from carbon steels subjected to erosion-corrosion wear*. NAEK Energoatom [in Russian].
- (1989) ПНАЭ Г-7-002-86. *Norms of strength analysis of equipment and pipelines of nuclear power plants*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
- Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **171**, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
- Timoshenko, S.P., Vojnovsky-Krieger, S. (1966) *Plates and shells*. Moscow, Nauka [in Russian].
- Makhnenko, V.I., Velykoivanenko, O.A., Milenin, O.S., Pivtorak, G.P. (2012) Computational assessment procedure of efficiency of couplings (bands) mounting in the zone of wall thinning of main pipeline. In: *Problems of service life and safety of structures, constructions and machines*. Kyiv, PWI, 15–17 [in Ukrainian].
- Kravchenko, V.P. (2017) Increase of safety and cost effectiveness of NPP by control of service life of secondary circuit pipelines. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost*, **3**, 25–29 [in Russian]. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2017.3\(75\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2017.3(75).04)
- (2011) ГБН В.3.1-00013741-12:2011. *Main gas pipelines, repair by arc welding in operating conditions*. Kyiv, Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine [in Ukrainian].
- Orynyak, I., Ageiev, S., Radchenko, S., Zarazovskii, M. (2015) Local limit load analytical model for thick-walled pipe with axial surface defect. *J. of Pressure Vessel Technology*, **137**(5), 051204. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029523>

EFFECTIVENESS OF UNLOADING A SECTION OF NPS PIPELINE WITH A PIPE WALL THINNING DEFECT BY MOUNTING A BAND OR WELDED SLEEVE

G.V. Vorona, O.V. Makhnenko, O.S. Milenin

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Formation of erosion-corrosion wear defects in NPS pipelines is one of the urgent problems of nuclear power engineering. At pipeline repair the defective section is cut out and a new pipe spool is mounted using welding, which is a rather labour-consuming process, and requires draining of the transported liquid. To prolong the service life, the defective pipeline section can be reinforced by mounting a repair structure, for instance a band or welded sleeve. In order to substantiate the rationality of application of reinforcing structures in pipeline repair, finite element analysis of the stress-strain state of the rectilinear pipeline section with a defect of erosion-corrosion wear under the impact of internal pressure was performed, as well as evaluation of the effectiveness of unloading the defective section in the case of application of a reinforcing structure of the type of a band or welded sleeve in repair. Analysis results showed the high effectiveness of application of such structures. Obtained results can be used in substantiation of introduction in the Ukrainian NPS of alternative technologies of repair of pipelines, predominantly technological ones, particularly in those cases when repair by traditional methods is not possible or rational for technical or economic reasons. 18 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: NPS, pipeline, erosion-corrosion wear, wall thinning defect, reinforcing structure, band, sleeve, stress-strain state, ductile fracture, finite element method

Надійшла до редакції 02.10.2023



Düsseldorf, Germany

join the best: 15 - 19 April 2024

Wire & Tube 2024

Міжнародні ярмарки проводів, кабелів і труб в Дюссельдорфі

15 – 19 квітня 2024 р., Messe Düsseldorf

Через п'ять місяців представники промисловості зустрінуться у виставковому центрі м. Дюссельдорф, Німеччина. Буде проведено трендові форуми, зустрічі експертів. У тематичних павільйонах буде представлено вироби та технології з нержавіючої сталі, водню та інших регенеративних носіїв енергії, сепарації та різання, пластикових труб і готової продукції для технологій виробництва кріпильних виробів і пружин.

Ярмарку Wire буде розміщено у залах №№9–17 і вона буде займати близько 66900 м² виставкової площі, з 1026 експонентами з 60 країн, що перевищить рівень до пандемії. На ярмарку будуть представлені машини та обладнання для виробництва та обробки дроту, готова продукція, інструменти та допоміжні засоби для технологічних процесів, матеріали, технології скловолокна, спеціальні дроти та кабелі, а також інноваційні технології датчиків, контролю та діагностики. Разом із виробниками дротяно-кабельного обладнання та продукції і технологій скловолокна, у залі №17 будуть представлені сучасні машини для зварювання дротяної сітки. У залі №16 буде представлено повний технологічний цикл створення кріплень і пружин: від сировини, машин і обладнання до кріплень, з'єднувачів і промислових пружин, гвинтів, кронштейнів, будівельних компонентів і фурнітури, усіх типів пружин і деталей для згинання дроту.

Ярмарку Tube представляє весь технологічний ланцюг виробництва у трубній промисловості: машини та обладнання для виробництва і обробки труб, а також сировину, пластикові труби, трубну продукцію та аксесуари, вживане обладнання, інструменти для технологічних процесів, допоміжні засоби, сенсорну техніку, техніку для контролю, вимірювання та контролю. Цю лінійку доповнює торгівля трубами, трубопроводами, профілем.

За майже 40 р. Wire і Tube Düsseldorf перетворилися на провідні торговельні ярмарки для своїх галузей – тепер також «народжуються» у різних регіонах, де вони є лідерами ринку та рушійними силами місцевої промисловості та мають високий потенціал зростання. Аналогічні заходи в Туреччині, Єгипті, Мексиці, Китаї, Таїланді та Індії вже є невід'ємною частиною зростаючого портфоліо Metal and Flow Technologies від Messe Düsseldorf.

УТВОРЕННЯ КРАЙОВИХ ХВИЛЬ ВІД НАПІВПРОЗОРИХ ТРИЩИН

В.П. Дядін, Є.О. Давидов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: davudov7764@gmail.com

Стаття розглядає особливості утворення хвиль дифракції на краях тріщин, внутрішня порожнина яких заповнена рідиною. Актуальність такого дослідження продиктована практикою застосування методу TOFD. Зазвичай поверхня промислових об'єктів досить часто контактує з різними рідинами. Наприклад, до таких об'єктів відноситься практично все нафтохімічне та теплоенергетичне обладнання. Частина обладнання в робочому циклі змащується маслом або просто працює в умовах атмосферних опадів або в умовах, коли змочування поверхні не можна виключити. Тому питання про те, як впливає рідина на утворення крайових хвиль від тріщин, заповнених рідиною, становить певний інтерес. Бібліогр. 6, рис. 13.

Ключові слова: крайова хвиля, дифракція хвиль, метод TOFD, тріщина

Вступ. Фізичний опис проблеми. Термін «дифракція», «дифракція хвиль» має різні фізичні трактування, які на перший погляд суттєво відрізняються один від одного. Тож для розуміння самої проблеми доцільно якісно пояснити фізичний механізм дифракції. Спочатку явище дифракції трактувалося як огинання хвилею перешкоди, тобто проникнення хвилі в область геометричної тіні (рис. 1). З променевої моделі поширення світла (історично так, а у широкому значенні – поширення збурювання) впливає, що промені *I*, що падають на екран *3* перпендикулярно, не можуть потрапляти в область тіні *2*. Границя між світлом і тінню є завжди різкою. Якщо розглядати похідну амплітуди у напрямку поперек поширення променів, то на межі світло-тінь вона дорівнюватиме нескінченності. Нескінченність – це математична абстракція, а на практиці це означає досягнення границі моделі, що розглядається, і необхідність зрозуміти та запропонувати новий механізм або нову модель, яка правдоподібно пояснює реальність за досягнутою межею. Крім того, відносно прості спостереження та експерименти доводять, що за екран в область тіні проникає збурення, яке не можна списати на різні помилки експерименту.

Першу хвильову теорію явища дифракції надано Томасом Юнгом. Юнг припустив, що є передача амплітуди коливань, поперечна до напрямку поширення хвилі, тобто хвиля поширюється не тільки перпендикулярно хвильовому фронту (променю), а й вздовж нього. Швидкість цієї передачі (потік амплітуди) є пропорційним довжині хвилі та відмінності в амплітуді (градієнту) по фронту. За Юнгом дифрагована хвиля виникає локально у певній області границі геометричної тіні за краєм перешкоди. Цілком симетрично дифрагована хви-

ля утворюється і в «освітленій» області простору, тобто край перешкоди є джерелом циліндричних хвиль [1]. Спрощену геометричну інтерпретацію сказаного вище показано на рис. 2.

Крайові хвилі на рис. 2 показані як кола. Їх утворення можна пояснити вже з моделі Гюйгенса-Френеля, де хвильову картину утворює кожне вторинне джерело випромінювання, тобто границя екрану стає граничною точкою, від якої і виходить крайова хвиля. Насправді джерелом крайової хвилі є фронт, обірваний екраном. На рис. 2 таких фронтів два – 4.1 та 4.2 і від кожного з країв

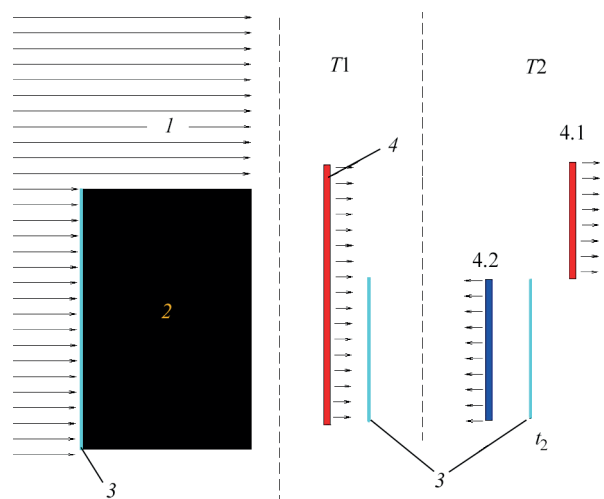


Рис. 1. Утворення тіні за екраном у промєневій моделі поширення світлових хвиль (загалом – будь-яких хвиль). Передбачається, що відбита хвиля 4.2 має протилежну фазу в порівнянні з падаючою хвилею 4 (м'яка, вільна границя або гранична умова Діріхле), що зазначено на рисунку кольором: *I* – промені поширення світла (збурення); *2* – тінь від екрану, де відсутні промені; *3* – непрозорий екран; *4* – фронт падаючої хвилі; *T1* – момент падіння фронту *4* на екран *3*; *T2* – фронт хвилі *4* після падіння на екран *3* – частина фронту 4.1 без будь-яких змін продовжує рух у попередньому напрямку, а частина фронту 4.2 відбивається в протилежному напрямку

В.П. Дядін – <https://orcid.org/0000-0002-2061-8436>, Є.О. Давидов – <https://orcid.org/0000-0003-3470-2329>
 © В.П. Дядін, Є.О. Давидов, 2023

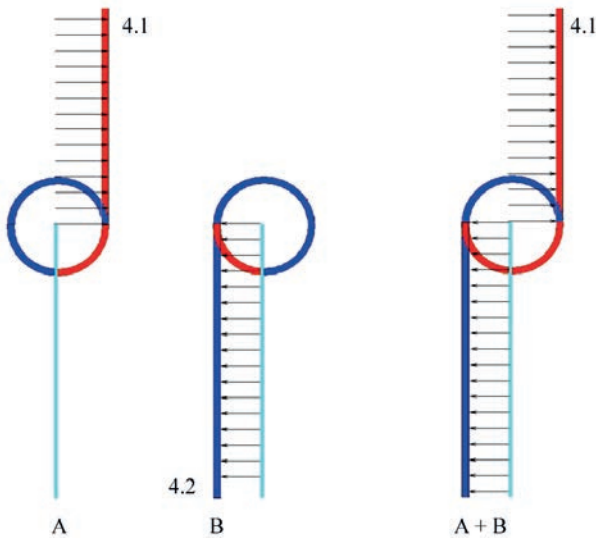


Рис. 2. Геометрична інтерпретація утворення крайової хвилі, кольором позначені фази хвиль: А – утворення дифрагованої хвилі від краю фронту, що пройшов за екран фронту 4.1; В – утворення дифрагованої хвилі від краю відбитого від екрану фронту 4.2; А+В – результат падіння фронту хвилі 4 на екран (рис. 1)

виходить дифрагована хвиля. При цьому частина енергії падаючої хвилі трансформується в енергію крайової або крайових хвиль з урахуванням, що на межі розривів фронтів 4.1 та 4.2 утворюються дві крайові хвилі. Фізична природа цього явища була вказана Юнгом, а її спрощений математичний виклад можна уявити наступним чином:

Розглянемо плоску хвилю $u = A(x, y, z) \cdot \exp(-i(\omega t - kz))$, де A – амплітуда хвилі; x, y, z – координати; ω – кругова частота; k – хвильове число; t – час.

Якщо у хвильове рівняння $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = c^2 \cdot \Delta u$ підставити формулу плоскої хвилі, то отримаємо наступне рівняння:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - \frac{i\lambda}{4\pi} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = \frac{i\lambda}{4\pi} \cdot \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right)$$

Для плавної зміни A , принаймні починаючи з деякого значення λ , можна знехтувати другим членом у лівій частині рівняння:

$$\frac{\partial A}{\partial z} \approx \frac{i\lambda}{4\pi} \cdot \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

Це рівняння, яке називають рівнянням Леонтовича, показує зв'язок градієнта амплітуди за напрямом поширення хвилі з амплітудою фронту (амплітуда фронту на момент його перебування у точці z описується координатами x, y). Можна уявити координату $z = c \cdot t$ та отримати рівняння (1) у вигляді (2), яке добре відоме як рівняння дифузії.

$$\frac{\partial A}{\partial t} \approx \frac{i\lambda c}{4\pi} \cdot \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = D \cdot \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Тому часто крайову хвилю називають наслідком поперечної дифузії амплітуди із місця розриву фронту хвилі. При цьому слід звернути увагу на те, що дифузія в область тіні створює хвилю в області світла, протилежну за амплітудою. На рис. 2 цю особливість відзначено кольором. Для хвиль напруги сказане є практично очевидним: у місці утворення хвилі стиснення має утворитися хвиля розтягування, сила дії дорівнює силі протидії. Кількісну залежність дифрагованих хвиль від окремої межі світло-тінь можна визначити, наприклад, таким чином [2]:

$$u_{\text{диф}} = \pm u^r W \left(\vartheta \sqrt{\frac{kr}{\pi}} \right) \cdot e^{i(\omega t - kr)}$$

де u^r – амплітуда хвилі у місці розриву фронту; k – хвильове число; ω – кругова частота; t – час; ϑ, r – циліндричні координати розглянутої точки щодо краю екрана (вершини тріщини), кут ϑ відраховується від напрямку первинної хвилі.

$W(z) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \Psi \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{i\pi z^2}{2} \right)$, де $\Psi \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{i\pi z^2}{2} \right)$ – вироджена гіпергеометрична функція. Графік функції $W(z)$ показаний на рис. 3.

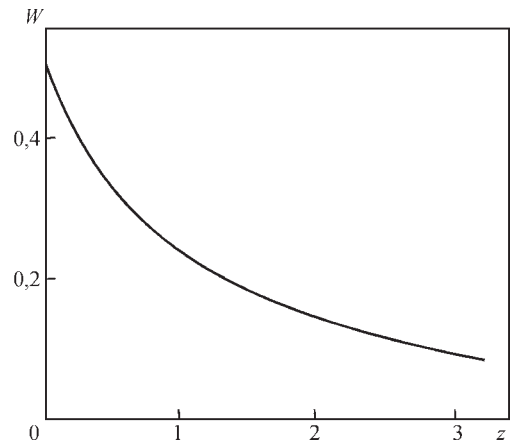


Рис. 3. Кількісне визначення функції $W(z)$

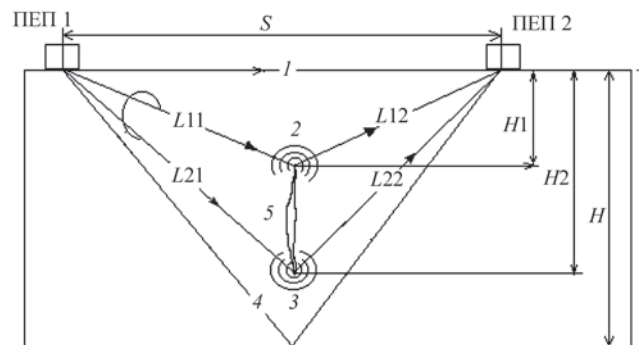


Рис. 4. Схема контролю за методом TOFD: 1 – поздовжня поверхнева хвиля; 2, 3 – крайові хвилі від меж тріщини 5; 4 – променевий шлях «донної» хвилі; 5 – тріщина; ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач; $L_{11}, L_{21}, L_{12}, L_{22}$ – відстані від вершин тріщини до перетворювачів; $H_1 = f(L_{11}, L_{12}, S)$, $H_2 = f(L_{21}, L_{22}, S)$

На рис. 4 представлено типову схему методу TOFD.

Для успішної роботи за методом TOFD достатньо вміти виявляти крайові хвилі від вершин тріщини. Амплітуда сигналів має значення лише з погляду їх достовірного виявлення та вимірювання часу приходу (див. [3–5]). Як було розглянуто вище, амплітуда хвилі від краю екрана має цілком певну кількісну залежність, яку можна було б використовувати для сепарування сигналів та їх точнішої ідентифікації, але поки що такий підхід не реалізовано. Частково це пояснюється тим, що тріщини не є аналогом екрана або клину в розрахункових моделях. Реальні тріщини досить сильно відрізняються від своїх математичних моделей. Наприклад, на рис. 5 показано тріщину, яка утворилася внаслідок силового впливу. Насправді така гілляста тріщина може виникати тільки за особливих умов і не є типовою. Зазвичай втомні тріщини мають чітко виражені межі.

Для аналізу та оцінки геометрії тріщин корисно уявляти, хоча б якісно, як змінюються хвилі дифракції від тріщин, які відрізняються від розрахункових еталонних моделей. Найпоширенішою відмінністю є тріщина, заповнена рідиною. Таких тріщин досить багато, тому

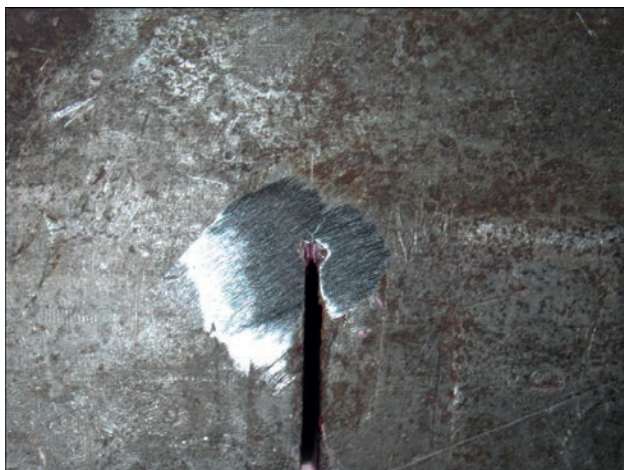


Рис. 5. Приклад тріщини, яка не відповідає розрахунковим математичним моделям

що рідина, одного разу потрапивши в тріщину, може зберігатися там дуже довго. Рідина утримується всередині тріщини силами поверхневого натягу, а процес випаровування без спеціальних умов відбувається повільно. З погляду розглянутого механізму дифракції така тріщина є напівпрозорою, де фронт розриву матиме менший градієнт проти тріщини без рідини. Якісно це можна пояснити так. За відсутності механізму дифракції падіння плоскої хвилі на ідеальний екран (рис. 2) створювало б градієнт амплітуди хвилі в точці екрана, що дорівнює нескінченності, але в реальності, як впливає з рівнянь (1)–(2), наявність градієнта викликає поперечну дифузію і цим купірується розрив поля. Градієнт матиме певне значення, а величина градієнта характеризуватиме швидкість поперечної дифузії і, власне, амплітуду крайової хвилі. У тому випадку, коли екран напівпрозорий, спочатку градієнт має кінцеве значення і тому дифузія не така значна в порівнянні з непрозорим екраном. Очевидно, що в граничному випадку (для екрана, що повністю прозорий), ніякої дифракції відбуватися не буде і крайова хвиля не виникне.

Виходячи з цього пояснення, можна зрозуміти, що утворення крайової хвилі відрізнятиметься від випадків тріщини без рідини та з рідиною. Зрозуміло, що за наявності рідини похідна dA/dz матиме меншу величину, ніж без рідини. На рис. 6 показано результати проходження хвилі через шар рідини [6].

На рис. 6 $q = \rho_2 \cdot c_2 / \rho_1 \cdot c_1$; де ρ_1, ρ_2 – густини середовища та шару відповідно; c_1, c_2 – швидкості в середовищі та шарі відповідно; h – товщина шару; λ_2 – довжина хвилі у шарі.

Як впливає з рис. 6, амплітуда хвилі, що пройшла, залежить від тріщини шару h і тому є також фактором, від якого залежить кінцевий результат – утворення хвилі дифракції.

Опис моделі дослідження. Моделювання утворення крайових хвиль виконувалося на наступній моделі. Геометрію моделі показано на рис. 7. Тріщину імітував клин із розкриттям 0,02 мм та за-

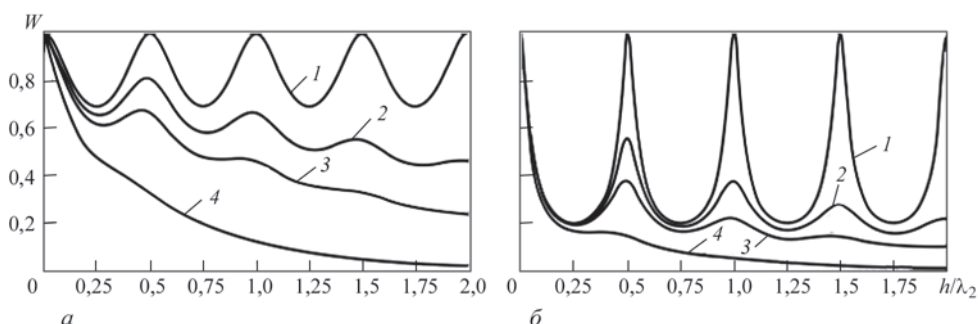


Рис. 6. Залежність модуля коефіцієнта проходження звуку через шар з поглинанням від товщини хвильової шару h/λ_2 при нормальній падінні хвилі: 1 – 0; 2 – 0,05; 3 – 0,1; 4 – 0,3; а – $q = 2,5$; б – $q = 10$; δ – просторовий коефіцієнт згасання

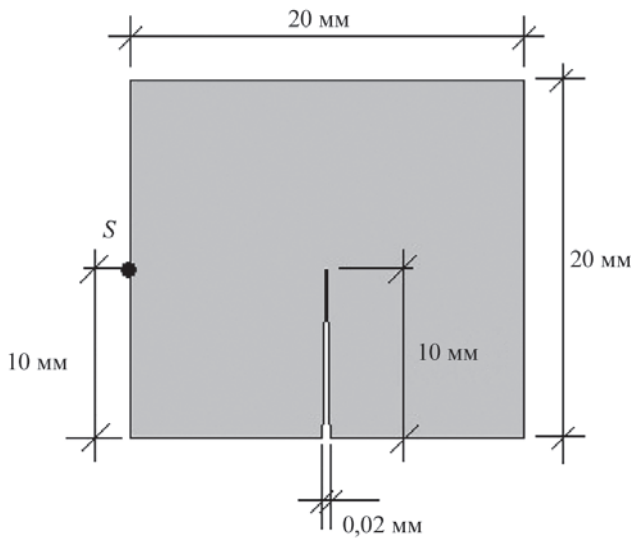


Рис. 7. Геометричні характеристики досліджуваної моделі: S – точкове джерело випромінювання з основною частотою 3 МГц, форма дії показана на рис. 8

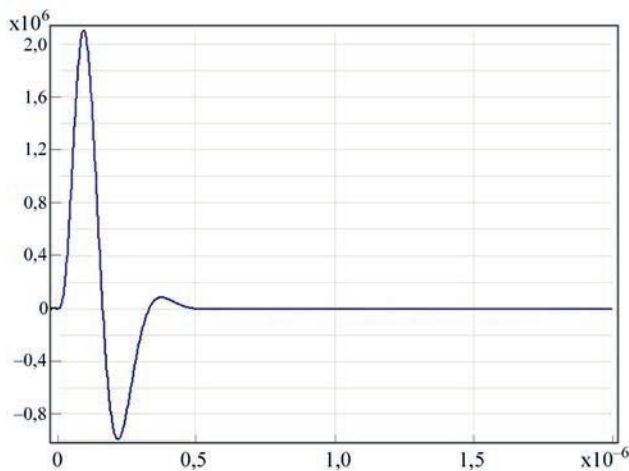


Рис. 8. Збуджуючий вплив задано зміщенням у точці S

вишки 10 мм. Точкове джерело випромінювання розташовувалося на відстані 10 мм від вершини клину. У точці розташування джерела S задавалося зміщення (імпульс) вздовж напрямку вектора X , зміщення задавалося залежністю згідно з графіком на рис. 8. Середовище поширення було встановлено типовими параметрами конструкційної сталі чи води. На границях задавалося умова демпфирования, яка суттєво зменшувала відображення хвиль, що дозволило зменшити геометричні розміри моделі.

Спочатку розглянемо спрощений випадок утворення крайової хвилі на повітряному клині у рідині, де можуть існувати лише хвилі дилатації, що полегшує аналіз хвильової картини. Результат розрахунку наведено на рис. 9.

Наступний розрахунковий приклад для конструкційної сталі – дифракція на клині, заповненому повітрям. На рис. 10 показано момент, коли від падаючої поздовжньої хвилі вже сформовані дві крайові хвилі: поздовжня та наступна за нею поперечна. Амплітуда поздовжньої крайової хвилі має явну залежність від напрямку та в далеких зонах від розриву фронту може відрізнятись від падаючої на два порядки.

Випадок заповнення клину водою (рис. 11) має явні відмінності від повітряного клина. У даному випадку амплітуда крайової хвилі дещо менша, але головна відмінність у тому, що акустична хвиля, що пройшла через клин, обганяє крайову хвилю та має приблизно таку саму амплітуду. Фактично первинна хвиля в деяких зонах маскує дифраговану. Для схерми TOFD методу (рис. 4) фактор, що маскує, буде не таким значним, але принципово буде присутнім і ускладнювати процес контролю.

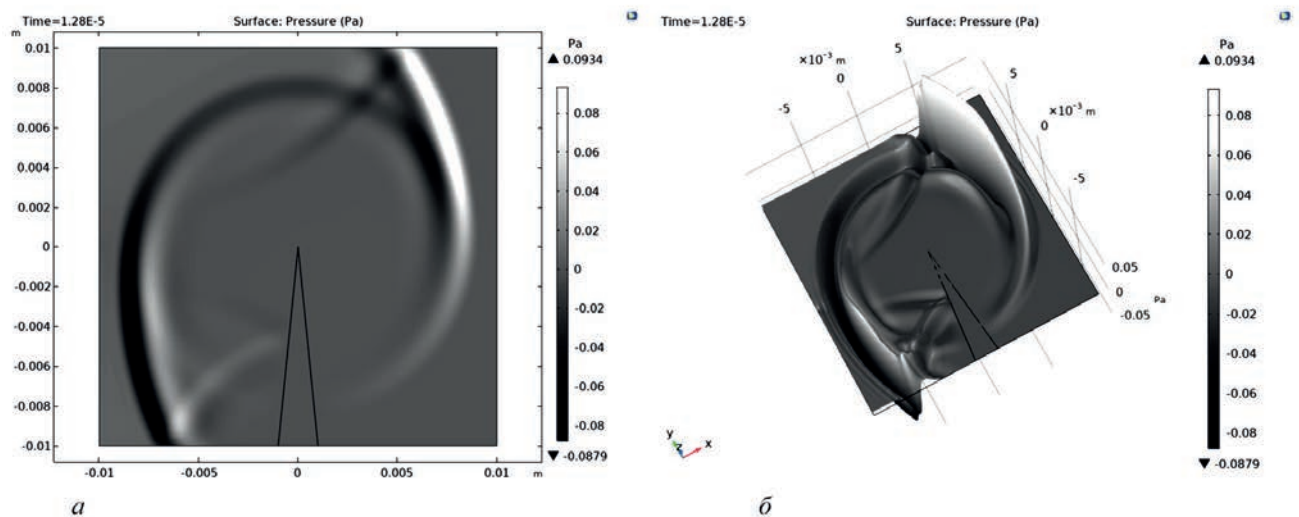


Рис. 9. Дифракція на повітряному клині у воді. Показано розподіл тиску поблизу клина: a – звичайна двовимірна візуалізація, b – псевдо тривимірне уявлення, що дозволяє чіткіше оцінити залежність амплітуди дифракційної хвилі від напрямку поширення

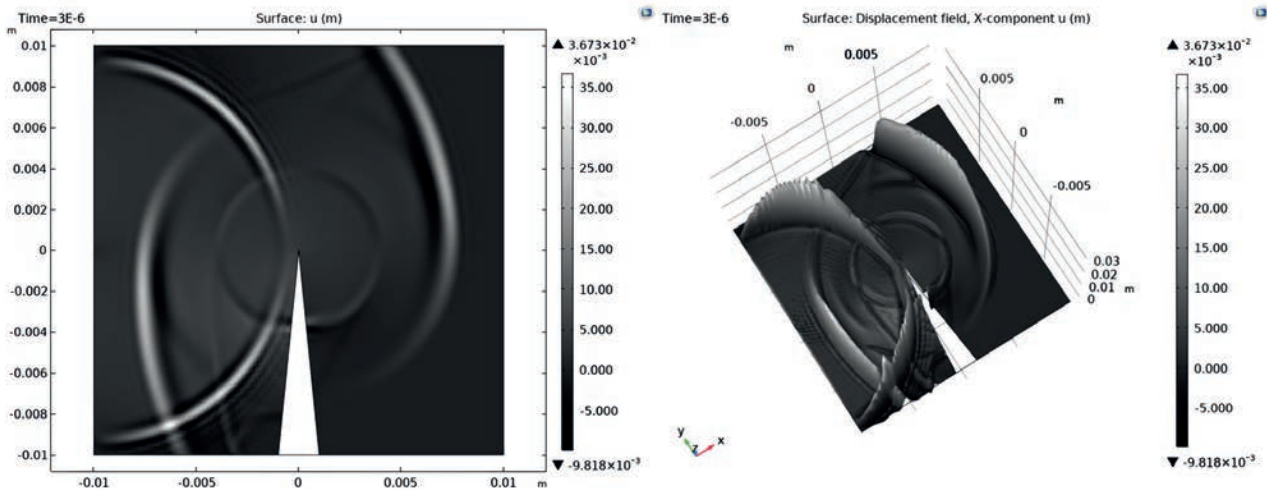


Рис. 10. Дифракція на повітряному клині у сталі. Показано момент падіння поперечної хвилі на клин

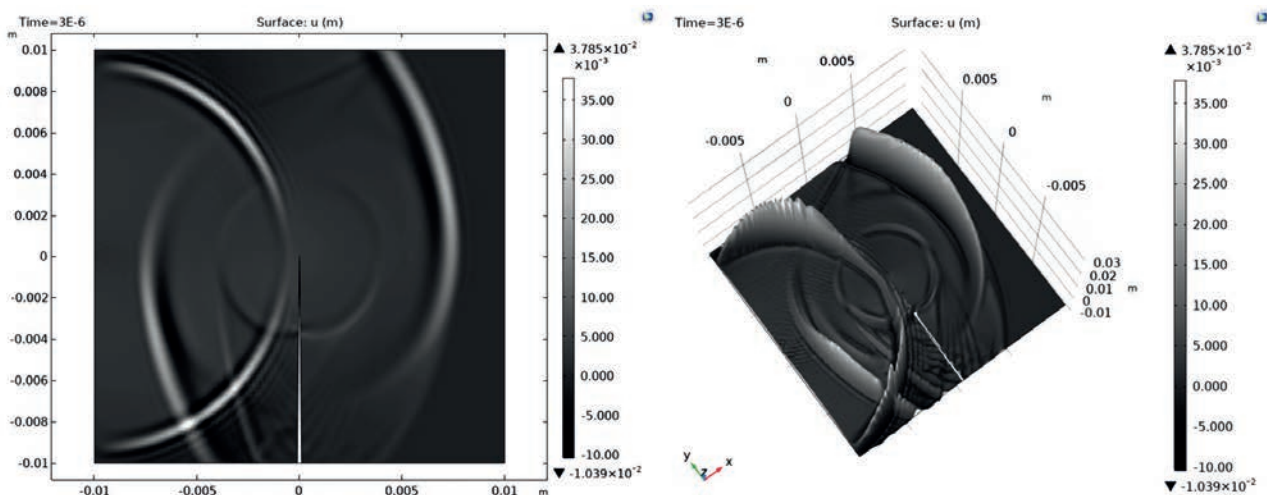


Рис. 11. Дифракція на водяному клині у сталі

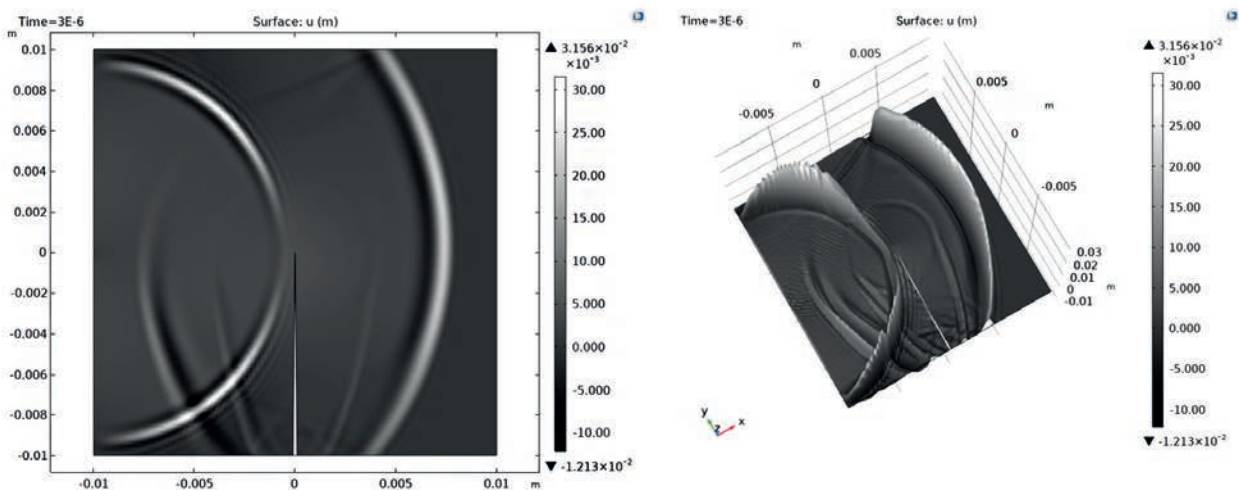


Рис. 12. Дифракція на ртутному клині у сталі

На рис. 12 з метою наочності представлено випадок дифракції хвиль на клині, заповненому ртуттю. Через близькість акустичних імпедансів (відмінність в імпедансах між сталлю і ртуттю приблизно вдвічі, а між сталлю і водою – близько 30) фронт хвилі не зазнає суттєвого розри-

ву на клині і тому кількісно поперечна дифузія невелика, що є наслідком практично повної відсутності поздовжньої хвилі дифракції.

Дифракційна хвиля буде зменшуватися із зменшенням розкриття тріщини, а коли шар має нульову товщину, відсутні причини утворення дифракційної

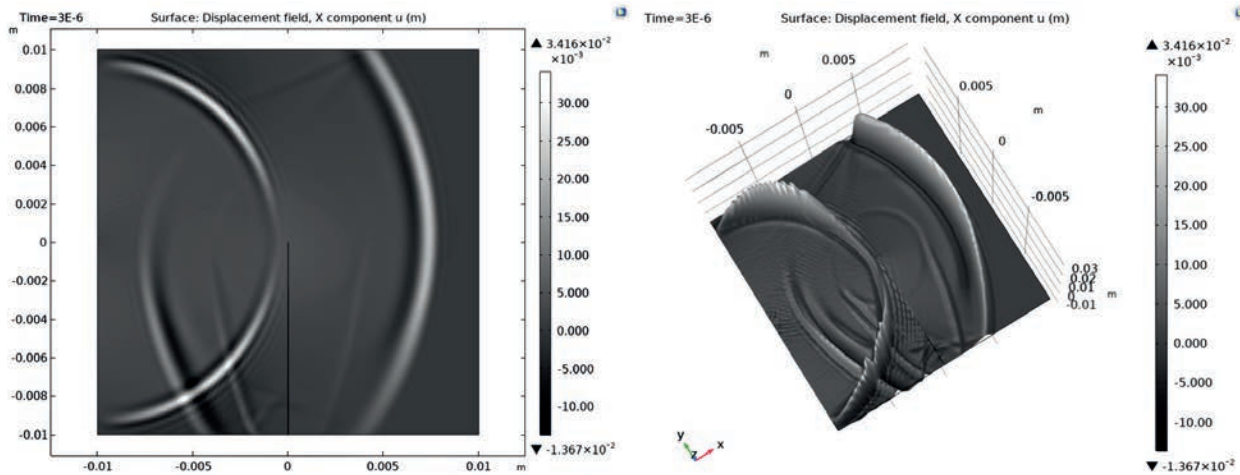


Рис. 13. Дифракція на водному клині у сталі при розкритті 0,01 мм

хвилі. Так, компресійні тріщини можуть мати дуже невеликі параметри розкриття – мікрони або навіть частки мікрон. На рис. 13 показано результат моделювання утворення крайової хвилі на клині з розкриттям 10 мкм, заповненим водою. За такого розкриття фактично дифракційна хвиля відсутня.

Висновки

Амплітуда хвиль, що виникають через явища дифракції на краях тріщини, значною мірою залежать від наявності у тріщині рідини (води). Наявність рідини, як мінімум, маскує крайову хвилю, що не дозволяє точно визначити момент її приходу, а при невеликих значеннях розкриття амплітуда хвилі додатково помітно зменшується так, що її достовірне виявлення стає неможливим.

Мабуть, подібний ефект буде відбуватися для незаповнених рідиною тріщин з невеликим розкриттям. Якщо розкриття тріщини менше за довжину хвилі, то хвиля зможе проходити з одного боку тріщини на іншу і тим самим зменшувати амплітуду крайової хвилі та головне – ускладнювати виявлення крайової хвилі.

Список літератури

1. Малюжинец Г.Д. (1960) *Дифракция волн. В: Физический энциклопедический словарь* (гл. ред. Б.А. Введенский). Т.1. Москва, Советская энциклопедия.
2. (1981) *Сейсморазведка. Справочник геофизика*. Гурвич И.И., Номоконова В.П. (ред.). Москва, Недра.
3. ISO 10863:2020 *Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD)*.
4. ДСТУ EN ISO 15626:2019 *Неруйнівний контроль зварних швів. Дифракційно-часовий метод (TOFD). Рівні приймання (EN ISO 15626:2018, IDT; ISO 15626:2018, IDT)*.
5. *ASME секції VIII розділ II п. 7.5.5.2*.
6. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. (2007) *Основи акустики*. Київ, Наукова думка.

References

1. Malyuzhinets, G.D. (1960) *Wave diffraction. B: Physical encyclopedic vocabulary*. Ed. by B.A. Vvedenskij, Vol. 1. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya [in Russian].
2. (1981) *Seismic prospecting. Refer. book of geophysicist*. Ed. by I.I. Gurvich, V.P. Nomokonova. Moscow, Nedra [in Russian].
3. ISO 10863:2020 *Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD)*.
4. DSTU EN ISO 15626:2019 *Non-destructive testing technique. Time-of-flight diffraction (TOFD). Acceptance levels (EN ISO 15626:2018, IDT; ISO 15626:2018, IDT)*.
5. *ASME Sections VIII, Chapter II, p. 7.5.5.2*.
6. Grinchenko, V.T., Vovk, I.V., Matsypura, V.T. (2007) *Fundamentals of acoustics*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].

FORMATION OF EDGE WAVES FROM SEMI-TRANSLUCENT CRACKS

V.P. Dyadin, Ye.O. Davydov

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: davudov7764@gmail.com

The paper deals with the features of diffraction wave formation on the edges of cracks, where the inner cavity is filled with liquid. The urgency of such research is dictated by practice of TOFD method application. The surface of industrial facilities quite often is in contact with different liquids. Such facilities include, for instance, practically all the petrochemical and thermal power equipment. Part of the equipment in the working cycle is lubricated with oil, or just operates under the conditions of precipitation, or when surface wetting cannot be avoided. Therefore, the question of the influence of liquid on formation of edge waves from liquid-filled cracks is of a certain interest. 6 Ref., 13 Fig.

Keywords: edge wave, wave diffraction, TOFD method, crack

Надійшла до редакції 22.09.2023

БАГАТОСТУПЕНЕВА ФІЛЬТРАЦІЯ ТА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ПОДІЙ АЕ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.І. Бойчук

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

Застосування методу акустико-емісійного контролю та систем технічної діагностики сімейства ЕМА на відповідальних промислових об'єктах дозволило не тільки оперативно отримувати інформацію щодо їх технічного стану, але й на базі отриманих даних удосконалювати методологічні підходи до обробки даних, а також обладнання контролю та його програмне забезпечення. У даній статті представлено результати проведеного аналізу проблеми фільтрації та оптимальних параметрів кластеризації даних АЕ та перевірки ефективності вибраних методів кластеризації на зразках і елементах конструкцій. Бібліогр. 5, рис. 17.

Ключові слова: акустична емісія, кластеризація, зміна параметрів, елементи конструкції

Вступ. Широке розповсюдження методу акустичної емісії (АЕ) на потенційно небезпечних об'єктах промисловості, зокрема використання систем АЕ контролю типу ЕМА на конструкціях, що працюють при високих температурах, мають високий рівень зашумованості [1] та деякі додаткові складнощі процесів періодичного контролю та безперервного моніторингу, змушують розробників вказаних систем, з урахуванням досвіду експлуатації та рекомендацій персоналу підприємств-користувачів, доопрацьовувати вимірювальне обладнання та програмне забезпечення до нього. У даній роботі представлено деякі вдосконалення, що дозволяють підвищити якість оцінки стану матеріалу контрольованих конструкцій за рахунок багатоступеневої фільтрації даних (апаратної, цифрової та програмної) і багатопараметричної кластеризації вже сформованих подій АЕ.

Мета досліджень – короткий опис багатоступеневої фільтрації даних АЕ; визначення оптимального набору параметрів для проведення кластеризації даних, отриманих при проведенні АЕ досліджень матеріалів, для удосконалення оцінювання стану матеріалів конструкцій під час проведення АЕ контролю та моніторингу.

Обладнання для проведення досліджень. У роботі використовували випробувальний стенд на базі розривної машини з гідравлічним приводом Р-20, тензометричну станцію для вимірювання параметрів навантаження, систему АЕ діагностики ЕМА-3, зразки матеріалів спеціальної форми [2].

Використання особливих засобів фільтрації даних АЕ та їх багатопараметрична кластеризація є особливо актуальними для об'єктів, що працюють в умовах високих шумів і високих температур. Це, наприклад, об'єкти теплоенергетичного комплексу (рис. 1). Покажемо результати кластеризації даних, отриманих з паропроводів гарячого проміжного перегріву (ГПП).

Коротка технічна характеристика об'єктів АЕ контролю: марка матеріалу – 15Х1МФ; 12Х1МФ; товщина стінки – 25 мм, 18 мм; діаметр зовнішній – 630 мм, 377 мм, 426 мм; робочий тиск – 3,7 МПа; робоча температура – 545 °С; робоче середовище – пара. Труби знаходяться під шаром ізоляції, що потребує спеціальних засобів встановлення давачів АЕ за допомогою хвилеводів.

У процесі попередніх випробувань і дослідної експлуатації у режимі моніторингу були виділені певні ділянки, на яких АЕ активність є підвищеною,

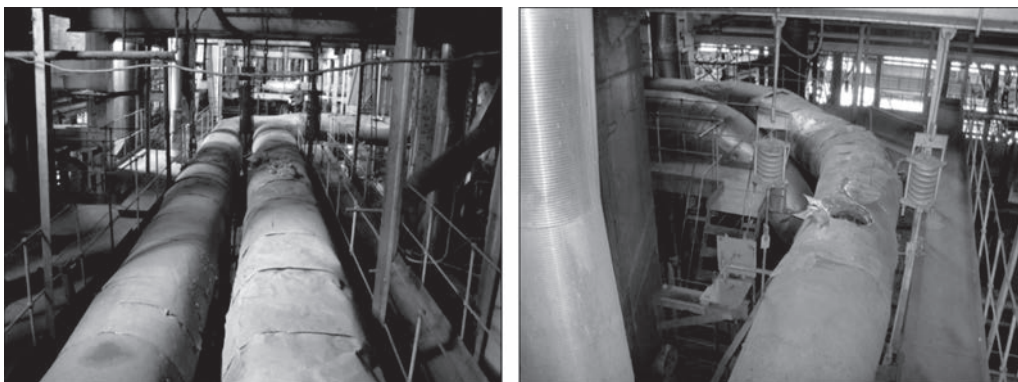


Рис. 1. Окремі ділянки об'єкту АЕ моніторингу ГПП

А.Я. Недосека – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, С.А. Недосека – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, М.А. Яременко – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, М.А. Овсієнко – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>, О.І. Бойчук – <https://orcid.org/0000-0001-5800-1549>

© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.І. Бойчук, 2023

що потребувало додаткового контролю (рис. 2). Виконаний контроль декількома неруйнівними методами показав, що відзначені ділянки справді є більш пошкодженими, а ті, що позначені рожевим кольором, вимагають оперативного ремонту.

У приладах ЕМА останнього покоління використовується три типи частотної фільтрації вхідних даних – аналоговий на апаратному рівні, цифровий на основі програм першого, проміжного ступеня, які обробляють вхідні дані одразу після надходження на прилад, і програмний, якій виконується програмою ЕМА-3.92 вже щодо тих даних, які не були відфільтровані приладом.

На деяких підприємствах продовжують працювати системи типу ЕМА-3. На приладах цих систем не передбачено використання смугових цифрових фільтрів, тому завданням є коректне використання аналогових і програмних типів фільтрів. Загалом, це завдання виконане для системи моніторингу трубопроводу ГПП.

Для покращення візуального подання даних АЕ моніторингу було створено спеціальний візуальний інтерфейс (рис. 2) для схематичного від-

творення трубопроводів ГПП у програмі ЕМА-3.92. Відповідне вікно дозволяє відображувати кожну з трьох ліній трубопроводів ГПП окремо або разом, вибирати колір відображення труб, датчиків АЕ та їх номерів. На показаній схемі видно кілька напівпрозорих кіл, що відображують кластери – центри АЕ активності. Їх також можна за необхідності приховувати. Колір кластера показує ступінь небезпеки – від зеленого безпечного до жовтого, помаранчевого, небезпечного червоного та особливо небезпечного – чорного (при появі цих кольорів попереджень проводиться екстрений аналіз ситуації, що виникла). Над схемою трубопроводів розташована таблиця прогнозу руйнівного навантаження для кожної з труб. Попередження про небезпеку [3, 4] відбувається згідно з ДСТУ 4227-2003 [5] і залежить від кількості подій АЕ за вибраний проміжок часу.

Особливістю роботи трубопроводів ГПП є великий шумовий фон, що потребує особливих підходів до опрацювання АЕ інформації. На рис. 3 показано вікно програми ЕМА-3.92, що контролює трубопроводи ГПП, з відключеною фільтрацією даних АЕ та кластеризацією лише за координатною ознакою.

Як бачимо, індикатори небезпеки при відсутності фільтрації і при стандартній кластеризації по координатах показують навіть чорний колір (максимальний рівень небезпеки), при цьому справжній стан труб ГПП на даний момент контролю не є небезпечним. Такі приклади можна отримати неодноразово (рис. 4). При цьому шумовий фон також є досить великим. Найбільшого значення він досягає на останньому датчику кожної з труб №№ 1, 2 завдовжки 120 м і на трубі № 3, яка контролюється лише двома датчиками.

Максимальна величина шумового фону може сягати до 50 дБ. При цьому виникають хибні події АЕ, які підраховуються відповідним алгоритмом, видають хибне попередження щодо небезпеки і, відповідно, неточний прогноз руйнівного навантаження. Якщо не вживати заходів щодо коректної фільтрації та умов кластеризації, система моніторингу буде майже весь час показува-

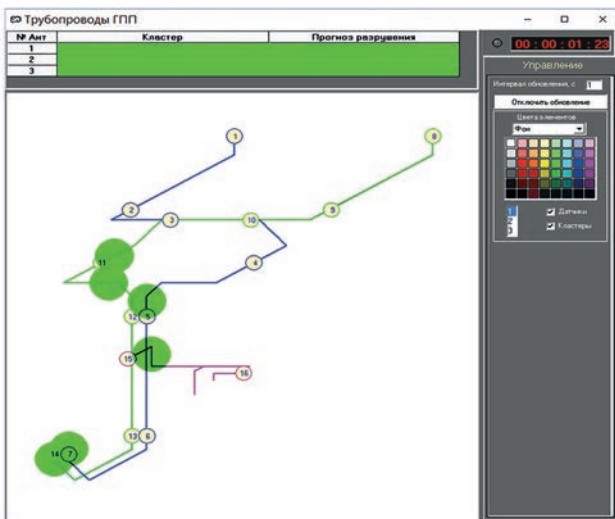


Рис. 2. Спеціальний інтерфейс для відображення ділянок ГПП у програмі АЕ моніторингу

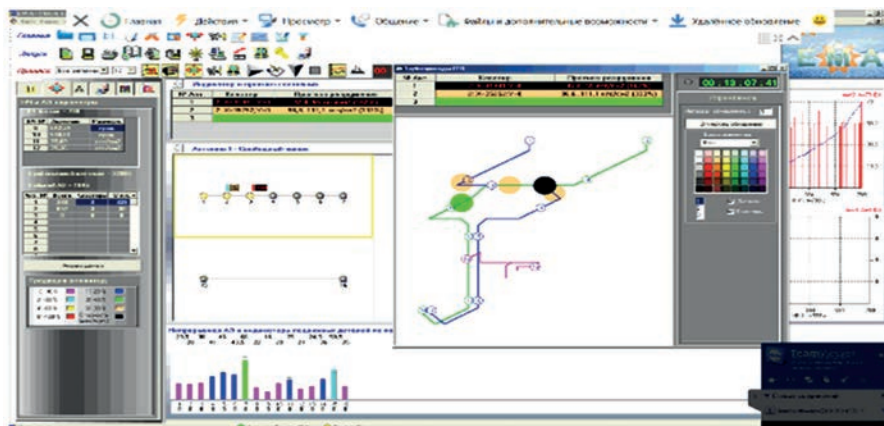


Рис. 3. Вікно програми ЕМА-3.92, що контролює ГПП, з відключеною фільтрацією даних АЕ

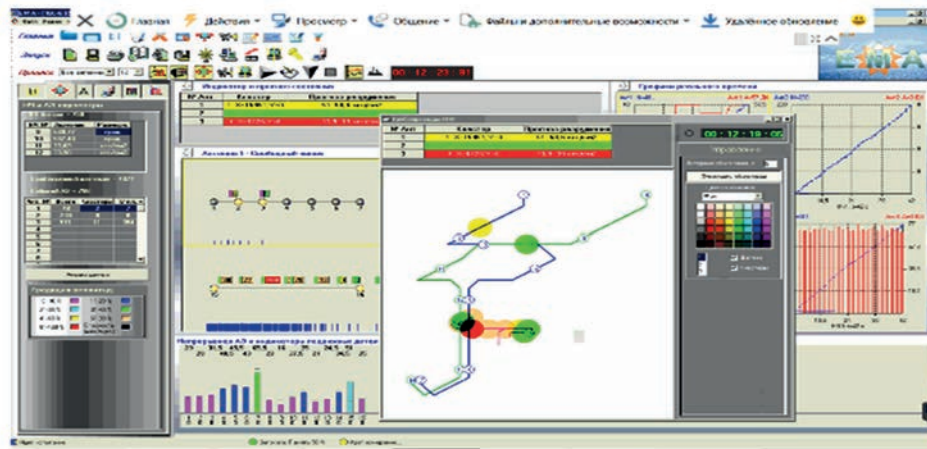


Рис. 4. Приклад вікна програми ЕМА-3.91 з відключеною фільтрацією даних АЕ

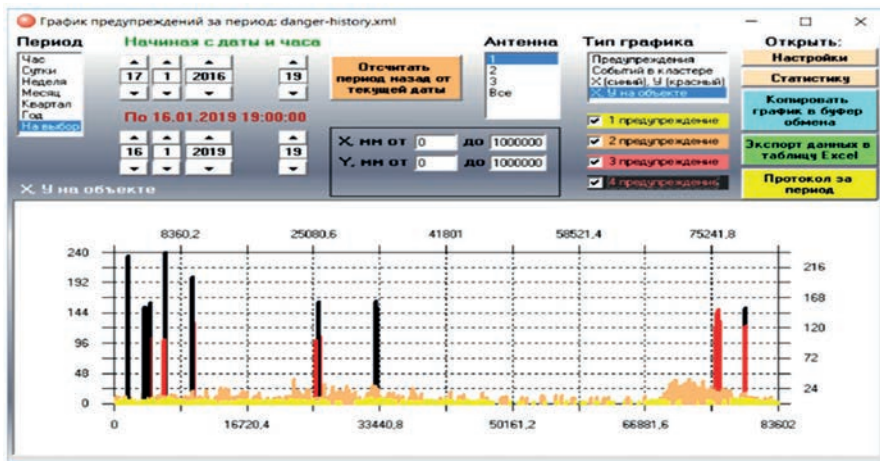


Рис. 5. Вікно статистики для програм типу ЕМА з координатами небезпечних джерел. Кольором показано ступінь небезпеки, висота стовпчика – кількість подій у кластері за заданий період за ДСТУ 4227-2003

ти небезпеку, дезорієнтуючи персонал підприємства. Для систем типу ЕМА створено спеціальні службові програми, зокрема ті, що показують статистику попереджень за певний період часу. На графіках таких програм можна відстежувати не тільки час виникнення та рівень попередження, але й координату джерела АЕ, яке його викликало. Вікно статистики попереджень для ГПП за відсутності фільтрації та коректної кластеризації даних показано на рис. 5.

Звичайно, використання даних без відповідної фільтрації дає похибку у визначенні стану конструкції. На приладах типу ЕМА-3 не передбачені смугові цифрові фільтри, тому їх заміна виконується програмно. Насамперед задається так званий строб, тобто час, який відраховується від початку події АЕ, за який інші дані по каналах, що створили подію, не приймаються.

Надалі задаються параметри фільтрації вхідних та оброблених даних АЕ. Оскільки на приладах типу ЕМА-3 не передбачено наявності смугових цифрових фільтрів, їх завдання виконується програмно. Прилади типу ЕМА-4 [5] мають вбудовану смугову фільтрацію частот у діапазоні 30...1000 кГц (рис. 6) і вирішують цю проблему.

Можливим є завдання смуги пропускання та параметри кластеризації по кожному з 11-ти параметрів даних АЕ подій (координати, амплітуда, час наростання амплітуди до максимального значення, затримка, тривалість, осциляції, середня швидкість, шум, енергія, середня частота). Зазвичай більше виникає потреба використовувати нижню границю смуги, оскільки, згідно з досвідом, саме у нижній частині значень параметрів АЕ подій сконцентровані хибні дані. Дані випробувань зразків з відповідного металу (15Х1МФ), а також результати безперервного моніторингу показали, що встановлення комбінованої смуги фільтрів навіть з невеликими нижніми границями може вирішити проблему відбракування хибних сигналів АЕ. Ці сигнали мають, як правило, некоректні параметри, не є властивими до процесів накопичення пошкоджень і руйнування. Наприклад, сигнали з нульовим часом наростання однозначно відносяться до технологічних шумів, оскільки процеси виникнення та розвитку пошкоджень мають, як правило, певний ненульовий час зростання амплітуд сигналів до максимуму. Те ж саме стосується й малої тривалості події АЕ та кількості осциляцій. Комбінування смуг фільтра-

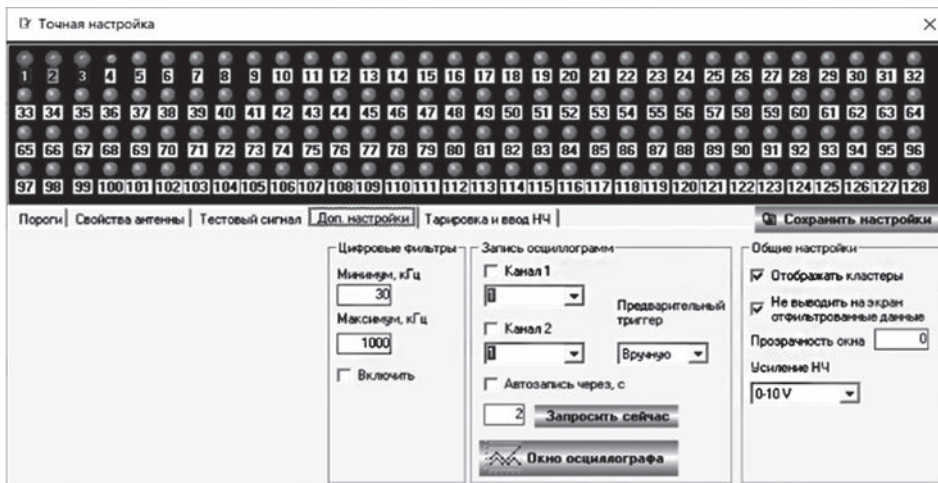


Рис. 6. Вікно програми ЕМА-3.92 з налаштуванням смугової частотної фільтрації

ції відбувається, як правило, експериментальним шляхом, на основі обробки великого обсягу даних, отриманих під час випробувань та експлуатації об'єктів контролю. Результати коректного використання програмних смугових фільтрів наведені на рис. 7, 8.

Особливу цікавість представляє те, що на рис. 7 і 8, на відміну від рис. 3 і 5, відсутні попередження 3-го та 4-го рівня, які позначаються відповідно червоним та чорним кольорами. Програма фільтрація даних АЕ надає необхідні умови для отримання достовірної інформації в умовах високих технологічних шумів.

Виділення інформативної складової не обмежується лише питанням відкидання зайвої інформації. Важливим залишається ще й спосіб обробки інформації, що залишається після попередньої фільтрації даних. На прикладі зразка зі сталі 17ГС покажемо (вибірково) результати багатопараметричної кластеризації даних.

Багатопараметрична кластеризація АЕ даних дозволяє:

- різними способами аналізувати та групувати дані АЕ подій;

- виділяти найоптимальніші смуги кластеризації, так звані радіуси, для точнішого отримання координат подій АЕ з певними характеристиками;
- детально аналізувати структуру матеріалу після точно проведеного кластерного аналізу.

Обробку даних було виконано з використанням програми ЕМА-3.92. Відстань між центрами датчиків становила 110 мм, контрольована зона – 140 мм (по 70 мм ліворуч і праворуч від центру зразка). Дані обробляли з використанням кластерного аналізу в процесі випробувань і при післяекспериментальній обробці. Події АЕ, що пройшли відбракування за координатною ознакою, об'єднували у кластери. Різні типи кластеризації показали зовсім інші розподіли подій АЕ, що дозволило відстежувати центри локалізації АЕ з певними характеристиками за довжиною зразка в межах контрольованої зони. Реєстрували сигнали АЕ у діапазоні 100...1000 кГц.

Типову діаграму випробувань зразків наведено на рис. 9. Умовні позначення даних на графіках та рисунках: P – навантаження, кг; A – амплітуда, дБ; A_v – шум, дБ; N – кількість подій АЕ; F – частота, Гц; Osc – кількість осциляцій; W – тривалість події АЕ, мкс; R – час наростання до мак-

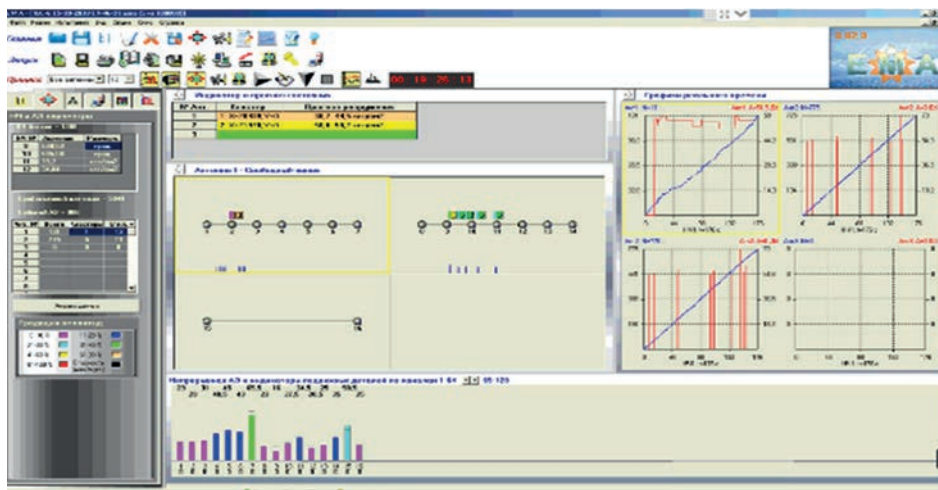


Рис. 7. Дані з труб ГПП після програмної фільтрації. Видно попередження 2-го рівня та прогноз руйнування по трубі № 1, попередження 1-го рівня та прогноз руйнування по трубі № 2. Активність АЕ на трубі № 3 відсутня

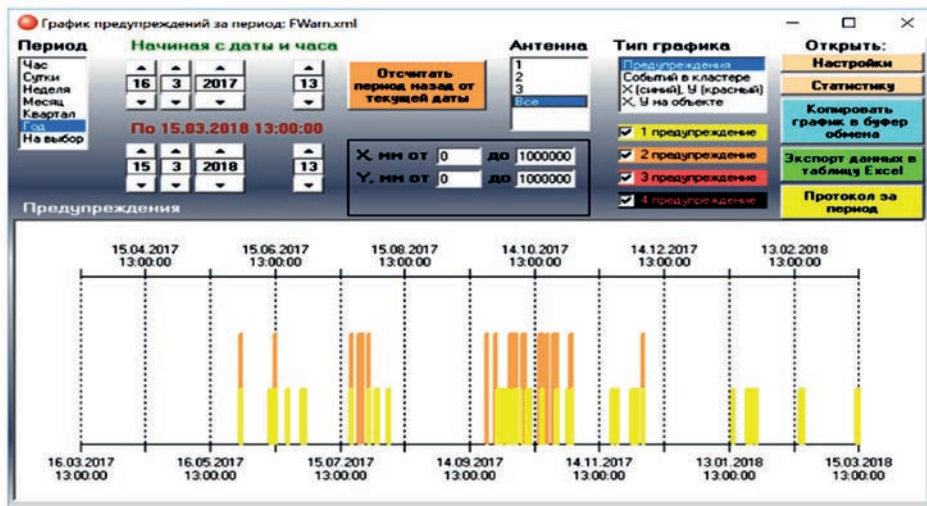


Рис. 8. Дані статистики попереджень після застосування фільтрації. Попередження про небезпеку 3-го та 4-го рівнів відсутні симуму амплітуди, мкс; X – координата події АЕ або кластера, мм.

Усі параметри на графіку (рис. 9), окрім активності N , надані згладженими для більшої наочності тенденції розвитку накопичення пошкоджень та зміни при цьому параметрів АЕ. Розподіл параметрів АЕ за довжиною зразка (координата X) є нерівномірним, що й стало основою для введення і дослідження багатопараметричної кластеризації. На рис. 10–17 показано результати кластеризації за різними параметрами для того ж самого випробування зразка. На рисунках наведено екрани локації координат джерел АЕ програми ЕМА-3.92 з відображенням подій АЕ та результатів їх кластеризації. Розташування самих подій АЕ показано маленькими стовпчиками під схемою локаційної антени датчиків АЕ. Над схемою датчиків стовпчиками зі смугами різного кольору (різні діапазони амплітуди АЕ) показано кластери, сформовані за певною ознакою. Прапорець угорі кожного стовпчика показує кількість подій АЕ. Колір прапорця відображує ступінь безпеки у даній області кластеризації – від безпечного зеленого до критично небезпечного червоного.

Руйнування зразків відбувалося посередині, у послабленій частині зразка. Цей факт дозволяє аналізувати ефективність того чи іншого набору параметрів АЕ для кластеризації. Смуги, у межах яких відбувалася кластеризація (радіуси кластеризації), підбиралися шляхом експериментів з комп'ютерним повтором вже отриманих результатів випробувань. Підбір виконували таким чином, щоб забезпечити максимальну показовість та інформативність того чи іншого способу кластеризації. Найпершим подано традиційний варіант кластеризації за координатною ознакою, далі – деякі з отриманих даних за одиночними та комбінованими параметрами (всі перебрані та проаналізовані комбінації представити у рамках однієї статті неможливо).

До варіантів кластеризації, що показують максимальну небезпеку, віднесено:

- за координатною ознакою (два кластери, 34 і 37 подій АЕ відповідно у кожному);
- за часом наростання сигналу (1 кластер, 22 події);
- за найменшою ненульовою затримкою (1 кластер, 26 подій);
- за кількістю осциляцій (1 кластер, 32 події);

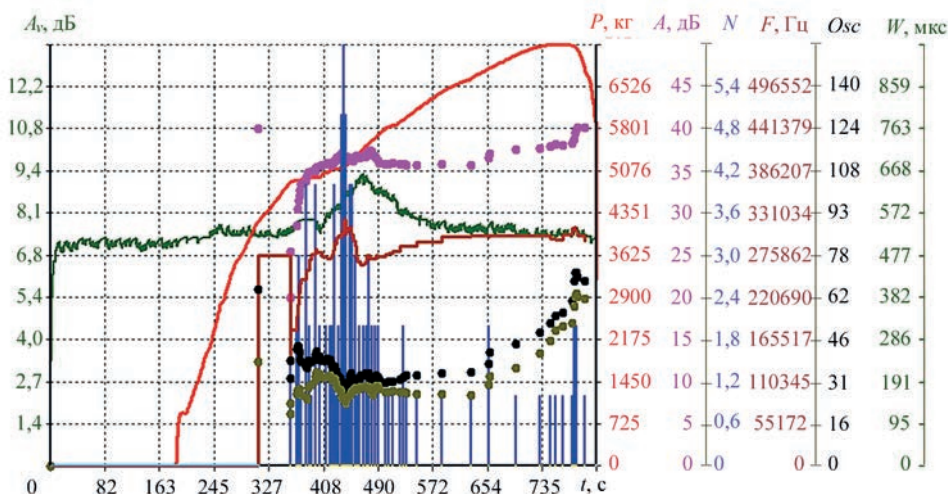


Рис. 9. Типова діаграма випробування зразка

- за середньою швидкістю звуку (з кластери, 9, 14, 18 подій);
- за рівнем неперервної АЕ (1 кластер, 106 подій);
- за амплітудою та мінімальною затримкою (2 кластери, 8 і 17 подій);
- за амплітудою та тривалістю сигналу (1 кластер, 11 подій);
- за амплітудою та кількістю осциляцій (3 кластери, 13, 10, 19 подій);
- за амплітудою та умовною енергією (1 кластер, 13 подій).

Інші варіанти кластеризації показали лише максимальне попередження другого рівня і тому не можуть бути прийняті як рекомендовані до використання. Як бачимо, найкращим результатом кластеризації є варіант рівня неперервної АЕ.

Вибрано найоптимальніші варіанти кластеризації з точки зору розташування координат біля місця руйнування:

- за координатною ознакою (34 події АЕ);
- за амплітудною ознакою (26 подій);
- за часом наростання сигналу (22 події);
- за найменшою ненульовою затримкою (26 подій);
- за кількістю осциляцій (32 події);
- за рівнем неперервної АЕ (106 подій);
- за рівнем умовної енергії (101 подія);
- за амплітудою та мінімальною затримкою (17 подій);
- за амплітудою та кількістю осциляцій (19 подій);
- за амплітудою та швидкістю хвиль АЕ (10 подій).

Як бачимо, частина з двох переліків перетинається, і в обох випадках найточніші дані отримано шляхом кластеризації за поточним рівнем неперервної АЕ у сигналі. Відзначимо одразу, що:

- даний результат слід вважати не загальним, а характерним для конкретного типу випробувань і певного металу;
- оптимальність варіанту кластеризації за поточним рівнем неперервної АЕ була для авторів досить неочікуваною;
- «класичний» варіант кластеризації лише за координатною ознакою дає задовільні результати, хоча й не найкращі з отриманих.

Висновки

На основі аналізу даних, що надходять з промислових об'єктів з високим рівнем шуму при

проведенні їх безперервного моніторингу, запропоновано підходи до послідовності та налаштування фільтрації параметрів сигналів АЕ, що надходять від датчиків, на різних стадіях – від безпосереднього отримання від приладу до обробки після формування подій АЕ.

Реалізовано можливість налаштування багато-параметричної кластеризації сформованих подій АЕ з вільним комбінуванням параметрів і смуг. Вивчено найперспективніші варіанти комбінування критеріїв кластеризації, проведено їх аналіз. Показано, що є оптимальні варіанти комбінування.

Результати проведених досліджень реалізовано у програмному забезпеченні ЕМА-3.92 щодо можливості налаштування цифрових програмованих фільтрів і можливостей встановлення та керування їх налаштуванням, завдання параметрів програмної фільтрації та багатопараметричної кластеризації.

Список літератури

1. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій*. Науково-технічний посібник. У 3-х томах. Київ, Наукова думка.
2. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А. та ін. (2022) Оцінка можливості застосування зміни розподілу параметрів акустичної емісії для удосконалення визначення стану матеріалів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 31–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.03>
3. 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.
4. (2022) *Система технічної діагностики ЕМА-4*. Керівництво користувача. Київ, Индпром.
5. ДСТУ 4227-2003 *Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки*.

References

1. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) Acoustic emission diagnostics of structural elements: Sci-Tekhn. Manual. In: 3 Vol., Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
2. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A. et al. (2022) Evaluation of the possibility of applying a change in the distribution of acoustic emission parameters to improve determination of material state. *Tekh. Diahnost. ta Neruivniv. Kontrol*, **1**, 31–38 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.03>
3. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*: Manual. 5th ed. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
4. (2022) *System of technical diagnostics EMA-4. User guide*. Kyiv, Indprom [in Ukrainian].
5. DSTU 4227-2003 *Guidelines for conducting acoustic-emission diagnostics of objects of increased danger* [in Ukrainian].

MULTISTEP FILTERING AND MULTIPARAMETRAL CLUSTERING OF AE EVENTS

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko, O.I. Boichuk

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

Application of acoustic emission testing method and technical diagnostics systems of EMA family in critical industrial facilities allowed not only quickly obtaining information on their technical condition, but also improving the methodological approaches to data processing, based on the derived data, as well as control equipment and its software. This paper presents the results of the conducted analysis of the problem of filtering and optimal parameters of AE data clustering and verifying the effectiveness of the selected clustering methods on samples and structure elements. 5 Ref., 17 Fig.

Keywords: acoustic emission, clustering, parameter change, structure elements

Надійшла до редакції 26.06.2023

РОЗВИТОК ОПТИКО-ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ АВІАКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ (Огляд)

Л.І. Муравський

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

Описано низку досліджень із діагностики та неруйнівного контролю напружено-деформованого стану тонкостінних циліндричних оболонкових конструкцій авіакосмічної техніки оптико-цифровими методами, зокрема методами тривимірної (3D) цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) та лазерної фотограмметрії, які виконувались і постійно вдосконалювались протягом останніх десятиліть. Розглянуто результати експериментальних досліджень композитних і металевих оболонкових структур методами 3D ЦКЗ. Проаналізовано переваги методів 3D ЦКЗ під час синхронних вимірювань полів переміщень і деформацій поверхні за допомогою декількох цифрових кореляторів зображень, розташованих навкруги оболонкової конструкції, над тими методами 3D або 2D ЦКЗ, які забезпечують одночасну реєстрацію лише ділянки досліджуваної поверхні за допомогою одного корелятора. Показано ефективність цих методів для неруйнівного контролю динаміки зміни процесів деформування та руйнування поверхні за осьових і радіальних навантажень, а також для оцінювання коефіцієнта втрати стійкості оболонкової конструкції. Бібліогр. 44, рис. 3.

Ключові слова: оболонкова конструкція, 3D цифрова кореляція зображень, цифровий корелятор зображень, композитна циліндрична оболонка, металева циліндрична оболонка, коефіцієнт втрати стійкості, осьові навантаження, радіальні навантаження

Вступ. Діагностика та неруйнівний контроль напружено-деформованого стану циліндричних оболонкових конструкцій є важливою ланкою усього процесу побудови літальних апаратів авіакосмічної техніки. Одна з основних ідей цих досліджень полягає в оцінюванні коефіцієнта втрати стійкості (КВС) оболонки, який визначають як відношення критичного навантаження реального циліндра, яке призводить до втрати його стійкості під час поздовжнього вигину, до критичного навантаження ідеального циліндра, а також у виборі оптимальних шляхів підвищення КВС.

Експериментальні дослідження механічних характеристик тонкостінних оболонок паливних баків космічних літальних апаратів під дією динамічних і статичних осьових навантажень виконувались в рамках космічних проектів НАСА починаючи з 50-х років 20-го століття. Зокрема, були розроблені методичні рекомендації NASA SP-8007 для попереднього проектування тонких і помірно товстих циліндричних оболонок під дією осьових стискальних навантажень [1]. У рекомендаціях було запропоновано оцінювати стійкість реального циліндра за допомогою КВС.

Вказані рекомендації ініціювали низку експериментів із композитними та металевими циліндричними оболонками, під час яких використовували оптико-цифрові методи для оцінювання геометричних параметрів оболонок за дії на них осьових та інших типів навантажень. Зокрема,

автори [2] вивчали тонкостінні армовані вуглецевим волокном полімерні шаруваті циліндричні оболонки за комбінованого та торсійного навантаження. Шаруваті композитні циліндри серії Z заввишки 510 мм, радіусом 250 мм і завтовшки 1,25 мм (товщина кожного шару становила 0,125 мм, орієнтація волокон кожного шару відрізнялась від орієнтації волокон сусідніх шарів) було виготовлено в Інституті композитних структур і адаптивних систем (ІКСАС) Німецького аерокосмічного центру [3, 4]. Для оцінювання геометричних параметрів дев'яти композитних циліндрів (Z18, Z23, Z25, Z28–Z33) виконували їх фотограмметричні вимірювання до прикладання навантажень, а під час прикладання осьових навантажень здійснювали неруйнівний контроль поперечних відхилень циліндричних стінок, викликаних поздовжнім згином, за допомогою методу проектування муарових смуг [2]. Проведені експерименти показали, що ексцентриситет у розподілу міцності оболонки має великий вплив на величину осьового згинального навантаження, а при комбінованих навантаженнях цей ефект послаблюється.

На початку 21-го століття методичні рекомендації NASA SP-8007 вже не враховували потенційні можливості нових матеріалів, зокрема їхні механічні та фізичні характеристики. Отримані відмінності між теоретичними і експериментально отриманими КВС були досить значними [5–9]. Численні дослідження в результаті давали великий розкид КВС, що пояснювалось багатьма факторами, зокрема недосконаlostями реаль-

них оболонкових конструкцій (локальних дефектів, вигинів, ямок, пошкоджень шарів у композиті тощо) [6, 9]. При цьому основну увагу звертали на осьові навантаження, у той час як радіальні (поперечні) практично не враховували [10]. Крім того, існуючі методи та засоби були неспроможні контролювати весь процес зміни напружено-деформованого стану поверхні оболонкових конструкцій від початку прикладання до них навантажень і аж до їх повного руйнування. Пошуки нових швидкісних підходів до досліджень полів переміщень і деформацій поверхні оболонкових конструкцій по всьому полю одночасно призвели до запровадження в практику експериментальних досліджень гібридних оптико-цифрових методів реєстрації, обробки та аналізу великих дво- і тривимірних інформаційних масивів, зокрема методів цифрової кореляції зображень (ЦКЗ).

Використання ЦКЗ для неруйнівного контролю оболонкових конструкцій. В останні роки дослідники звертають особливу увагу на покращення технічних характеристик оболонкових структур, зменшення їх ваги та вартості, що зрештою веде до підвищення КВС. Одним із ключових факторів досягнення високих значень КВС стало використання оптико-цифрових методів і систем неруйнівного контролю тестових і реальних оболонкових конструкцій ракетно-космічної техніки. Серед них особливо важливу роль почали відігравати методи тривимірної (3D) ЦКЗ, оскільки за їх допомогою можна відтворювати повну картину переміщень і деформацій поверхні одночасно по всій оболонці під час її навантаження. Водночас експерименти, які виконували такими методами, поєднували з комп'ютерним моделюванням, зокрема з методами скінченних елементів (МСЕ), які враховують різноманітні недосконалості оболонок. Результати таких комплексних досліджень дали змогу обчислювати КВС для різних типів оболонкових конструкцій.

Ефективність використання ЦКЗ під час навантажень оболонкових конструкцій зумовлена, у першу чергу, можливістю реєстрації великих площ поверхні об'єкта дослідження в реальному часі та спроможністю забезпечити високу точність побудови полів нормальних і тангенціальних поверхневих переміщень і деформацій. Завдяки використанню високопродуктивних алгоритмів обробки зображень поверхні можна досягти такої похибки обчислення відтвореного поля переміщень, яка сумірна з 0,01 пікселя у матричному відеосенсорі цифрової камери [11]. ЦКЗ базується на кореляційному порівнянні розподілів інтенсивностей спекл-зображень оптично шорстких поверхонь, дифузних середовищ або зображень гладких поверхонь із випадково розміщеними плямами, на-

несеними розпиленням барвника або отриманими іншими методами. У ЦКЗ лише інтенсивність світлового поля є носієм інформації, а втрата фазової інформації компенсується ширшим діапазоном вимірювання переміщень і деформацій поверхні порівняно з цифровою спекл-інтерферометрією, ширографією та цифровою голографією. Формування полів переміщень або деформацій за допомогою ЦКЗ виконується шляхом кореляційного порівняння (m, n) -го фрагмента зображення деформованої поверхні з відповідним (m, n) -м фрагментом зображення цієї ж поверхні, що перебуває у попередньому або початковому стані. З цією метою два зображення реєструють цифровою камерою, після чого в комп'ютері їх розбивають на $M \times N$ квадратних або прямокутних фрагментів, що містять непарну або парну кількість пікселів, наприклад 15×15 ; 16×16 ; 31×31 ; 64×64 тощо. Розрізняють двовимірну (2D) ЦКЗ, у якій визначають поля тангенціальних (площинних) переміщень і деформацій, та 3D ЦКЗ, у якій визначають тривимірні поля переміщень і деформацій, тобто одночасно як тангенціальних, так і нормальних. Методам 2D і 3D ЦКЗ та їх використанню в різних прикладних дослідженнях присвячено тисячі наукових праць. Для поглибленого вивчення цих методів можна звернутись, наприклад, до [11–18].

Існує декілька підходів до формування 3D полів переміщень і деформацій об'єктів досліджень методами ЦКЗ. Серед них найпоширеніший належить групі М. Саттона [14, 19], згідно з яким ту саму ділянку поверхні реєструють двома цифровими камерами з двох точок простору і, використовуючи стереоскопічний ефект, вимірюють усі три ортогональні компоненти переміщень. Ними ж розроблено метод кутових переміщень [19], де оптичні осі двох камер перетинаються на об'єкті дослідження. Метод є досить гнучким і його реалізують за допомогою простої оптичної системи. Проте тут більша частина об'єкта дослідження знаходиться за межами глибини різкості проектувальних об'єктивів, що призводить до спотворення зображення його поверхні через розфокусування частини цього зображення. Щоб позбутися такого розфокусування, використовують умову Шаймпфлуга [20], яка покращує зображення, хоча не усуває повністю геометричні спотворення. Праці групи М. Саттона стали основою для створення оптико-цифрових систем (ОЦС) 2D і 3D ЦКЗ, тобто цифрових кореляторів зображень, включаючи і відповідне програмне забезпечення. Серед них можна виокремити безконтактні системи 3D цифрової кореляції зображень ARAMIS (виробник Trilion Quality Systems) [21], які у поєднанні з програмним забезпеченням VIC-3D [22] дають змогу відтворювати поля динамічних пе-

реміщень і деформацій поверхні різноманітних об'єктів під час їх навантаження.

Методи ЦКЗ дають змогу також здійснювати вимірювання деформацій 360°-ї площі поверхні циліндричних оболонкових конструкцій, що мають відносно велику кривизну. Розрізняють два основних підходи до дистанційного моніторингу таких конструкцій:

1. синхронні вимірювання полів переміщень і деформацій поверхні за допомогою декількох 3D цифрових кореляторів зображень, розташованих навкруги оболонки або на ділянці, де руйнування оболонки найімовірніше;

2. вимірювання поверхневих полів переміщень і деформацій лише одним 3D або 2D цифровим корелятором зображень, який реєструє або серію спекл-зображень циліндричної поверхні під час її обертання, або частину поверхні, яку вона охоплює.

Перший підхід застосовували у більшості праць, присвячених даній тематиці, оскільки він дає можливість синхронно реєструвати переміщення і деформації поверхні по 360°-ій площі оболонки і є швидкісним, причому швидкість кадрів можна змінювати у широкому діапазоні в залежності від умов експерименту. Другий підхід вимагає набагато менших матеріальних затрат, проте він менш ефективний, оскільки дає можливість охопити одночасно лише частину усєї поверхні оболонкової конструкції [23–27]. Іноді його застосовують, поєднуючи із першим підходом і використовуючи при цьому декілька цифрових кореляторів для точнішого аналізу вибраної ділянки поверхні, що містить локальні недосконалості та дефекти [5, 6].

Неруйнівний контроль композитних оболоноквих структур авіакосмічної техніки. Найімовірніше вперше для дослідження навантажень на оболонкові структури ракетно-космічного призначення 3D ЦКЗ було використано у [5], а отримані результати доповнено в [6]. Основна мета полягала у встановленні реалістичнішої нижньої граничної спадної експоненціальної залежності KDF від відношення радіуса R циліндричної оболонки до її товщини t , тобто від R/t , яка би перевищувала такі ж традиційні залежності [25, 28, 29] або залежності KDF від параметра Батдорфа [7–9]. Для проведення експериментів використовували шість полімерних армованих вуглепластиковими волокнами шаруватих циліндричних оболонок Z07–Z12 заввишки 510 мм і радіусом 250 мм, які виготовили в ІКСАС [30]. Циліндри містили чотири шари завтовшки 0,125 мм з різною орієнтацією волокон; загальна товщина циліндрів становила 0,5 мм. Для оцінювання якості виготовлених внутрішньої і зовнішньої поверхонь цилін-

дрів до прикладання навантажень, у тому числі для виявлення технологічних локальних пошкоджень, недосконалостей і дефектів, здійснювали їх неруйнівний контроль ультразвуковим ехо-імпульсним та фотограмметричним методами. При цьому розшарування виявляли ехо-імпульсним методом, а неоднорідності поверхні – фотограмметричним за допомогою вимірювальної системи ATOS [31]. До циліндричних зразків приклали осьові стискальні навантаження за допомогою гідравлічної машини, призначеної для осьового стиску зразків [32]. Вимірювання 3D полів деформацій під час статичних і динамічних навантажень оболонок здійснювали за допомогою чотирьох 3D цифрових кореляційних систем ARAMIS [21]. Кожна система містить дві швидкісні цифрові камери розмірністю 1280×1024 пікселів і максимальною частотою кадрів 920 Гц, які реєструють приблизно 100° сегменту поверхні оболонки, а чотири системи охоплюють усі 360° поверхні (рис. 1). Деформації оболонок визначали за переміщеннями їхніх поверхонь відносно початкового стану до прикладання навантажень. Для досягнення швидкої реєстрації локальних динамічних полів переміщень поверхні під час її деформування усі чотири системи ARAMIS розташовували у вибраній ділянці циліндра Z07, де його руйнування найімовірніше, охоплюючи при цьому висоту 450 мм і кут поля зору ~40° (рис. 2), та реєстрували цю ділянку зі швидкістю 3680 Гц. Показано, що деформації поверхні за динамічного навантаження починаються від місця розташування точкового вигину в центрі ділянки, супроводжуються змінними картинами поля переміщень під час поздовжнього згину і закінчуються стабільною картиною поля переміщень після втрати стійкості ділянки циліндра. Тут також розглянуто процедури неруйнівного контролю поверхні та внутрішніх шарів циліндрів до прикладання навантажень з метою виявлення технологічних локальних пошкоджень, недосконалостей і дефектів. Контроль здійснювали ехо-імпульсним методом, а також фотограмметричним методом за допомогою ОЦС ATOS [31].

Дві послідовності розподілів переміщень для цього ж циліндра у ненавантаженому і навантаженому станах отримані авторами [30] за допомогою чотирьох систем ARAMIS по всій площі оболонки. Подібні дослідження зі зразками чотиришарових композитних циліндричних оболонок Z15U500, Z17U500, Z18U500, Z20U500 і Z22U500 (висота 500 мм, радіус 250 мм, товщина 0,5 мм, орієнтація шарів [+24°/-24°/+41°/-41°] описано в [33].

Логічним продовженням неруйнівних випробувань виготовлених в ІКСАС тестових цилін-

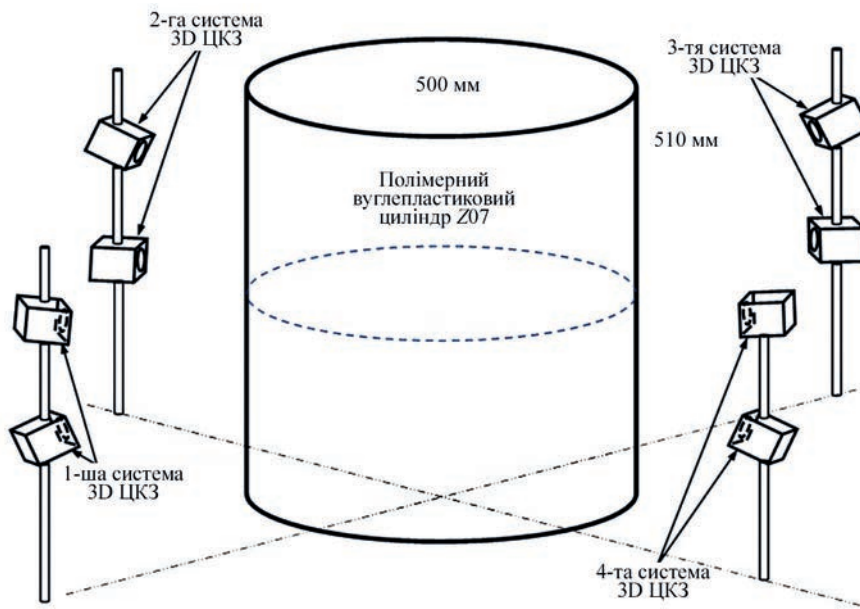


Рис. 1. Одночасна реєстрація 3D полів деформацій усієї зовнішньої поверхні циліндра під час його статичних і динамічних навантажень за допомогою чотирьох систем 3D ЦКЗ ARAMIS

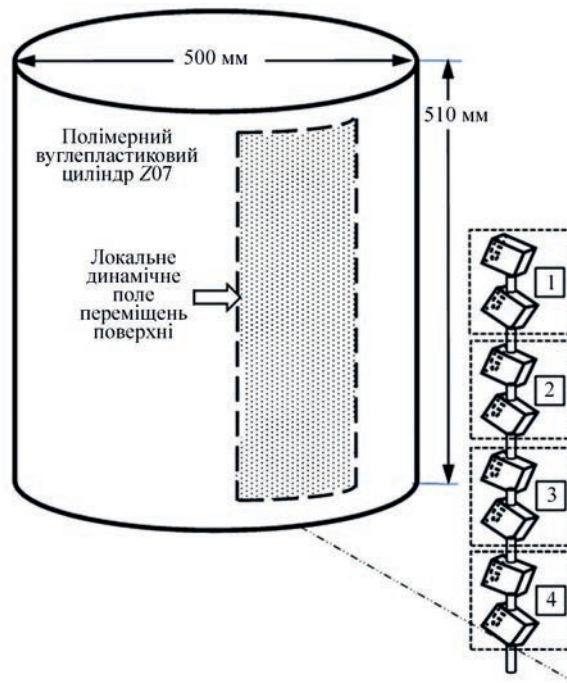


Рис. 2. Одночасна швидкісна реєстрація локального поля переміщень поверхні (кут поля зору $\sim 40^\circ$) під час статичних і динамічних навантажень циліндра за допомогою чотирьох систем 3D ЦКЗ ARAMIS: 1 – перша система; 2 – друга система; 3 – третя система; 4 – четверта система

дричних оболонок із використанням ОЦС стала робота [10]. Досліджували два тестові циліндричні зразки Z36 і Z37, виготовлені з шаруватого вуглепластикового композиту, армованого вуглецевим волокном (послідовність укладки шарів [34/-34/0/0/53/-53]), заввишки 800 мм, радіусом 400 мм і завтовшки 0,75 мм, діючи на них осьовим стискальним та поперечним (радіальним) навантаженнями. Осьовий стиск виконували за допомогою спеціально виготовленого обладнання для випробувань, а поперечні навантаження – за допомогою пристрою, що містить магніти, які ді-

ють у радіальному напрямі. Спочатку прикладали постійне поперечне навантаження, а потім – монотонно зростаюче стискальне. Поперечні навантаження 0...20 Н прикладали у трьох радіальних напрямках під кутами 30° , 150° і 210° для зразка Z36 та під кутом 30° для зразка Z37. За допомогою сканувальної фотограмметричної системи ATOS виділяли в тестових циліндрах початкові геометричні недосконалості, у тому числі поверхневі та внутрішні дефекти і пошкодження, застосовуючи для цього процедуру оптимальної підгонки (оптимального наближення) для усунення

руху твердого тіла з результатів вимірювань [34]. Поля просторових деформацій поверхні циліндрів визначали за допомогою тензодавачів. Крім тензодавачів використовували також 3D кореляційну систему ARAMIS Adjustable 12M [35] для дослідження просторових деформацій поверхні. З цією метою на поверхню циліндра наносили плями-структуру, щоб імітувати спекл-зображення на вході двох цифрових камер системи. Отримані поля переміщень дали змогу виявляти поверхневі виймки, опуклості, ямки та інші відхилення від ідеальної циліндричності під час стискання тестових циліндрів як до, так і після появи поздовжнього згину зразків. Паралельно з експериментами використовували МСЕ, який базувався на програмному продукті Abaqus Standard 6.14 (Implicit). За допомогою МСЕ встановлювали залежності між осьовим навантаженням поздовжнього згину та поперечним збурювальним навантаженням для ідеальної моделі циліндра та моделі циліндра із внутрішніми недосконаlostями, зокрема місця з відхиленнями товщини шару та зі змінами об'ємної частки вуглецевих волокон. Показано, що результати розрахунку просторового розподілу переміщень поверхні моделі циліндра із внесеними недосконаlostями досить добре корелюють з результатами експериментів зі зразком Z36, які здійснювали за допомогою сканера ATOS та ультразвукового широкосмугового сканера.

У зв'язку з необхідністю зменшення ваги конструкційних елементів авіакосмічної техніки проблема виготовлення адаптерів корисного навантаження та проміжних ступенів ракети-носія із композитних матеріалів є досить актуальною. Для її вирішення в [36] запропоновано використати методологію застосування МСЕ, щоб передбачити поведінку оболонкової структури під час її поздовжнього вигину та порівняти результати моделювання з експериментальними даними, які отримували за допомогою 3D цифрових кореляційних систем і тензометрів, розташованих на поверхні циліндрів. Для імітації реальних розмірів циліндричних оболонок авіакосмічної техніки було запропоновано нову методологію аналітичного масштабування. Методологію використали для проектування композитного циліндра зменшеного розміру, який має такі ж характеристики під час втрати стійкості, що і повнорозмірний багатошаровий композитний циліндр. Таке проектування включало насамперед зіставлення безрозмірних параметрів масштабованої конструкції з повномасштабною [37]. За результатами проектування було виготовлено тестовий циліндр NDL-1 із шарів вуглецевого волокна, з'єднаних епоксидним матеріалом діаметром 800 мм, заввишки 1200 мм та з послідовністю укладки ша-

рів композиту [23/0/-23]. Конструкція NDL-1 була зменшеною версією багатошарового композитного циліндра СТА8.1 діаметром 2,4 м, який був розроблений та випробуваний як частина проекту НАСА «SBKF» («Shell Buckling Knockdown Factor») [38]. Неруйнівний контроль тестового циліндра NDL-1 здійснювали методами та засобами фотограмметрії та 3D ЦКЗ. Для оцінювання наявних недосконаlostей і відхилень від циліндричності до прикладання до тестового зразка NDL-1 осьових навантажень виконували оптичне сканування внутрішньої і зовнішньої поверхонь фотограмметричним методом. Під час експериментів у Дослідницького центру НАСА в Ленглі (Хемптон, Вірджинія), переміщення і деформації поверхні вимірювали системою прикріплених до циліндра тензодатчиків і 3D цифровими кореляторами зображень. Щоб зареєструвати штучні спекл-зображення методом 3D ЦКЗ, на світлу поверхню циліндра наносили випадково розташовані чорні овали і круги розмірами 4,5...6,0 мм. Осьові стискальні навантаження до 3000 кН виконували за допомогою спеціально розробленої тестової навантажувальної установки. На початковому етапі експерименту використовували чотири системи 3D ЦКЗ з повільною швидкістю реєстрації спекл-зображень, що дорівнює 1 кадр/с. Камери розташовували під кутами 90° одна відносно одної. Зі збільшенням стискального осьового навантаження під час розвитку процесу поздовжнього згину і до втрати стійкості циліндра використовували чотири швидкісні системи 3D ЦКЗ, швидкість реєстрації спекл-зображень у яких становила 20 000 кадрів/с. Порівняльний аналіз деформацій поверхні циліндра під час навантажень, отриманих з одного боку системами 3D ЦКЗ, а з другого – за допомогою МСЕ з використанням програмного продукту Abaqus 2017, засвідчив задовільну збіжність даних експерименту та моделювання. Зокрема, на початковій стадії аксіальні навантаження, обчислені за допомогою МСЕ, відрізняються від експериментальних на 0,04 %, а передбачуваний коефіцієнт жорсткості – на 1 % від виміряного експериментально. Проте відмінність між цими даними збільшилася під час поздовжнього вигину матеріалу циліндра. Поведінка поверхні після втрати стійкості під час експерименту була схожа на її поведінку, передбачену МСЕ. Проте пошкодження під час поздовжнього вигину та після втрати стійкості, які були зареєстровані експериментально, не враховувались у МСЕ, що і призвело до відмінностей між даними моделювання та експериментальними даними. Отримані результати засвідчили можливість використання запропонованого авторами

підходу до дослідження повномасштабних циліндричних оболонкових структур.

Неруйнівний контроль металевих оболонкових структур авіакосмічної техніки. Паралельно з композитними оболонковими структурами досліджували також металеві, виготовлені з алюмінієвих сплавів. Починаючи з 2011 р. в НАСА в рамках проектування та створення надважкої ракети-носія Space Launch System (система космічних запусків (СКЗ)) для пілотованого космічного корабля виконувалась програма досліджень з метою вдосконалення процедур оцінювання КВС повномасштабних зразків металевих оболонкових конструкцій, виготовлених із алюмінієвих сплавів [39]. Зокрема, корпорація Correlated Solutions, Inc. на своєму веб-сайті подала інформацію про успішне випробування повномасштабного циліндричного тестового зразка діаметром 27,5 футів (8,38 м) і завдовжки 242 дюймів (6,15 м), виготовленого з Al–Li сплаву 2195, у березні 2011 р. в Центрі космічних польотів (ЦКП) НАСА ім. Маршалла [40]. Зразок імітував паливний бак СКЗ і був аналогом зовнішнього паливного бака космічного корабля Space Shuttle. Побудову полів переміщень і деформацій усієї поверхні під час прикладання осьових, радіальних та інших типів навантажень здійснювали за допомогою 3D цифрових кореляторів зображень разом із програмним забезпеченням VIC-3D, розроблених і виготовлених у Correlated Solutions, Inc. На зовнішню білу поверхню зразка наносили випадково розподілені чорні овали і круги заданих розмірів, що імітували спекл-структуру. В експерименті використали сім 3D цифрових кореляторів зображень, які охоплювали усю поверхню від 0 до 360° і контролювали її практично неперервно. Зразок поступово навантажували до більш ніж 800000 фунтів, а цифрові камери систем 3D ЦКЗ реєстрували поля переміщень поверхні зі швидкістю 3000 кадрів/с аж до моменту повного руйнування циліндра.

Вичерпнішу інформацію про результати подальших досліджень із повномасштабними циліндричними зразками та зі зразками меншого масштабу у ЦКП НАСА ім. Маршалла відображено в [41, 42]. Дані про створення двох металевих повномасштабних 27,5-футових тестових циліндричних оболонок і глибоке дослідження їх поведінки під час прикладання осьових стискальних навантажень, комбінованих навантажень та внутрішнього тиску порядку 1 psi (6895 Па) наведено в роботі [41]. Тут автори повідомляють про розроблення і створення восьми маломасштабних циліндрів діаметром 8 футів (2,44 м) і заввишки 6,5 футів (1,98 м), а також двох повномасштабних циліндрів ЕТТА1 і ЕТТА2. Усі вони були виготовлені з Al–Li сплаву 2195. Циліндри ЕТТА1 і ЕТТА2

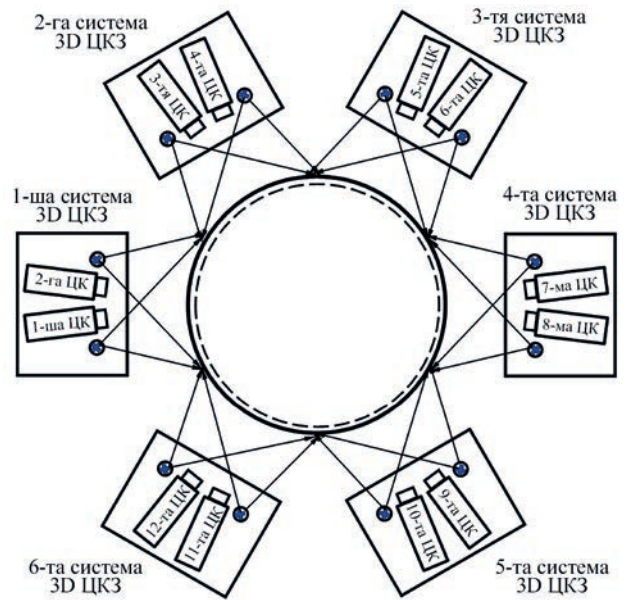


Рис. 3. Схема експериментального обладнання для випробувань металевих повномасштабних циліндрів, що містить шість систем 3D ЦКЗ, кожна з яких містить дві цифрові камери (ЦК) і два джерела освітлення ділянки поверхні, яку реєструють

складались із восьми панелей, зварених між собою вздовж осьового напрямку методом тертя з перемішуванням. Панелі містили підсилені ребристі ділянки, зони зварних швів і перехідні ділянки між зонами зварних швів і підсиленими ділянками. ЕТТА1 був призначений для оцінювання процесу втрати стійкості під дією осьового рівномірного стиску і тому панелі в ньому мали мале підсилення. ЕТТА2 був призначений для оцінювання цього ж процесу за комбінованого навантаження на стиск і згин. Тому він містив як панелі, присутні в ЕТТА1, та і значно жорсткіші панелі.

Під час випробувань повномасштабних циліндрів використовували датчики лінійних переміщень, тензодатчики, датчики тиску, фото/відеосистеми та системи 3D ЦКЗ. До ЕТТА1 прикріплювали 842 тензодатчики, до ЕТТА1 – 1168 тензодатчиків. Тривимірні поля переміщень і деформацій зовнішньої поверхні вимірювали за допомогою шести швидкісних систем 3D ЦКЗ, розташованих по колу навколо циліндрів (рис. 3). Системи здійснювали моніторинг перехідних процесів поздовжнього згину поверхні та втрати стійкості циліндрів під час їх навантажень. Для просторової прив'язки цих систем на поверхні циліндрів наносили маркери у вигляді літери L, яку формували за допомогою множини випадково розподілених чорних квадратів, що мали приблизно такі ж розміри, що й чорні круги та овали на білій поверхні зразків. Системи 3D ЦКЗ вимірювали також локальні переміщення та деформації між парами маркерів. Результати вимірювань за допомогою цих систем дали можливість оці-

нити вплив локального вигину елементів зовнішньої обшивки циліндра та зварних швів на процес втрати стійкості циліндрів ЕТТА1 і ЕТТА2. Зокрема показано, що вигин і жолоблення обшивки, що прилягає до осьових зварних швів у зразках, призводить до нелінійної реакції навантаження на осьову деформацію при нижчих рівнях навантаження, ніж передбачалося.

У [42] наведено результати досліджень двох маломасштабних 8-футових тестових циліндричних оболонок ТА07 та ІТА02, виготовлених із Al-Li сплаву 2195. Кожен такий циліндр містив три 120°-ні дугові сегменти, зварені між собою тертям із перемішуванням. Конфігурації елементів жорсткості вибирали на основі конструкції циліндра ракети-носія НАСА з розгінного блока Ages 1. Для багатоканального контролю даних переміщень і деформацій поверхні навантажень використовували датчики лінійного переміщення та тензодатчики. Проте основну увагу звертали на відтворення тривимірних полів переміщень і деформацій поверхні, вимірювання яких виконували за допомогою чотирьох двокамерних 3D ЦКЗ. Ця система містила вісім камер і вісім джерел світлового випромінювання, розташованих навкруги циліндричних оболонок. Цифрові камери з розмірністю матричних відеосенсорів 2448×2048 пікселів були розташовані під кутами 45° одна відносно одної, що давало можливість охоплювати поверхню циліндра по всьому колу. Для імітації спекл-зображень на білу поверхню циліндрів наносили хаотично розташовані чорні овальні плями розмірами 0,45...0,70 дюймів (1,14...1,78 см), обчислені з урахуванням просторової роздільної здатності камер. Частота реєстрації зображень становила 0,2 Гц. Отримані зображення обробляли за допомогою програмного забезпечення VIC-3D, розробленого в Correlated Solutions, Inc. Найбільші похибки вимірюваних переміщень поверхні циліндрів спостерігали біля їх країв, а найменші – вздовж центральної лінії по колу кожного циліндра, де кореляція між встановленими 3D ЦКЗ була максимальною. Результати вимірювань 3D переміщень поверхні двох 8-футових циліндрів дали можливість модернізувати процес моделювання навантажень циліндрів за допомогою МСЕ і тим самим покращити прогнозування явищ втрати їх стійкості.

Подібні дослідження з металевими оболонками менших розмірів виконували у Дослідницькому центрі НАСА в Ленглі (Хемптон, Вірджинія) [43, 44]. У [43] використовували 3D ЦКЗ для визначення полів переміщень і деформацій поверхонь металевих циліндричних оболонок структур. Круглі циліндри завдовжки 31 дюйм (0,7874 м), радіусом 9 дюймів (0,2286 м) і завтов-

шки 0,04 дюймів (0,102 см) виготовляли з алюмінієвого сплаву 2024. Випробування виконували під осьовим стискальним навантаженням та бічним збурювальним навантаженням, які прикладали у радіальному напрямку посередині довжини циліндрів. Для захоплення повної картини поля переміщень по всій площі циліндричної оболонки під час навантажень використовували три 3D ЦКЗ. Щоб оцінювати тестові цифрові моделі поверхні циліндрів за початкового ненавантаженого стану та під час осьових і радіальних поперечних навантажень, виконували аналіз за допомогою МСЕ та програмних продуктів Abaqus Standard і Abaqus Explicit. Результати моделювання та експериментальні дані, отримані методом 3D ЦКЗ, виконані під час осьових і поперечних навантажень, показали деяку узгодженість між відтвореними полями осьових і радіальних переміщень, хоча обчислення передбачуваних локальних і глобальних критичних навантажень, які викликали втрату стійкості за поздовжнього вигину, виконаних за допомогою МСЕ, перевищували навантаження, виміряні експериментально.

У Дослідницького центру НАСА в Ленглі провели також серію експериментів зі згаданим вище тестовим циліндром ТА07 діаметром 8 футів (2,44 м) і завдовжки 6,5 футів (1,98 м), виготовленим із Al-Li сплаву 2195 [44]. Отримано низку нових результатів і, зокрема, показано, що передбачуване за допомогою МСЕ навантаження циліндра було на 14,4 % меншим за виміряне методом 3D ЦКЗ. Чотири 3D ЦКЗ забезпечували як повільну реєстрацію поля переміщень усієї зовнішньої поверхні циліндра від 0° до 360° з частотою 0,2 Гц, так і швидко її реєстрацію з частотою 5 кГц.

У [24] для оцінювання КВС виготовили циліндричну оболонку діаметром 1 м, заввишки 0,6 м і завтовшки 1,5 мм з алюмінієвого сплаву 2A14. Для оцінювання деформацій поверхні під дією осьових навантажень використовували 36 тензодатчиків, систему лазерного сканування HandySCAN 3D для панорамних оптичних вимірювань поверхні під час осьових навантажень, а також 3D ЦКЗ з програмним забезпеченням VIC-3D. За допомогою системи HandySCAN 3D виконували лазерне сканування поверхні циліндра до прикладання осьових навантажень, щоб виявити поверхневі неоднорідності. 3D корелятор застосовували для виявлення модової структури zdeформованого циліндра лише після втрати стійкості циліндра під дією стискального осьового навантаження. При цьому його шість разів пересували навкруги циліндра для вимірювання форми всієї поверхні. У наступній праці практично того ж авторського колективу [25] для досліджень виготовили ще чотири циліндри таких же розмірів

і з того ж алюмінієвого сплаву 2A14. Тут основну увагу звертали на оцінювання дефектів та їх неоднорідностей, яке здійснювали у тому числі і за допомогою 3D ЦКЗ. Водночас вартує зауважити, що використання лише одного 3D ЦКЗ не сприяло достовірному відтворенню поля переміщень по всьому полю поверхні циліндрів і він практично виконував допоміжні функції під час експерименту.

Висновки

Різнопланові експериментальні дослідження, проведені низкою вчених у наукових лабораторіях та, зокрема, у ЦКП НАСА ім. Маршалла, Дослідницькому центрі НАСА в Ленглі, а також в ІКСАС Німецького аерокосмічного центру, засвідчили високу ефективність процедур побудови та вимірювання полів поверхневих переміщень і деформацій та виявлення недосконалостей в оболонкових структурах авіакосмічної техніки за допомогою неруйнівних дистанційних оптико-цифрових методів, зокрема методів 3D ЦКЗ. Показано доцільність їх використання як для композитних, так і для металевих оболонок. Системи 3D ЦКЗ все інтенсивніше використовують для отримання експериментальних даних про поля деформацій оболонкових циліндричних структур за осевих стискальних і радіальних навантажень. Причому спостерігається тенденція до збільшення кількості таких систем під час синхронізованої реєстрації поверхні циліндра з метою підвищення достовірності відтворення усіх етапів прикладання таких навантажень аж до втрати стійкості та руйнування оболонки. Традиційним також стало використання фотограмметричних систем неруйнівного контролю циліндричності поверхні оболонкових структур у ненавантаженому стані з метою виявлення різноманітних недосконалостей на внутрішній поверхні циліндричних оболонок. Обов'язковою умовою успішних випробувань тестових оболонкових структур є поєднання методу МСЕ з методами оптико-цифрового неруйнівного контролю, зокрема з методом 3D ЦКЗ, і встановлення відповідності між результатами моделювання за даними експерименту.

Список літератури/References

- Weingarten, V.I., Seide, P., Peterson, J.P. (1968) *Buckling of thin-walled circular cylinders* (No. NASA SP-8007), NASA.
- Meyer-Piening, H.R., Farshad, M., Geier, B., Zimmermann, R. (2001) Buckling loads of CFRP composite cylinders under combined axial and torsion loading—experiments and computations. *Composite Structures*, **53**(4), 427–435. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00053-8)
- Geier, B., Klein, H., Zimmermann, R. (1991) Buckling tests with axially compressed unstiffened cylindrical shells made from CFRP. In: *Buckling of Shell Structures, on Land, in the Sea and in the Air. Proc. of Int. Colloq. (Lyon, France)*, 498–507.
- Geier B, Singh, G. (1997) Some simple solutions for buckling loads of thin and moderate thick cylindrical shells and

panels made of laminated composite material. *Aerospace Sci. and Technol.*, **1**(1), 47–63. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(97\)90023-7](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(97)90023-7)

- Hühne, C., Rolfes, R., Tessler, J. (2005) A new approach for robust design of composite cylindrical shells under axial compression. In: *Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing*, **581**, 1–8.
- Hühne, C., Rolfes, R., Breitbach, E., Tessler, J. (2008) Robust design of composite cylindrical shells under axial compression – simulation and validation. *Thin-Walled Structures*, **46**(7–9), 947–962. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.01.043>
- Wagner, H.N.R., Hühne, C., Niemann, S., Khakimova, R. (2017) Robust design criterion for axially loaded cylindrical shells – Simulation and Validation. *Thin-Walled Structures*, **115**, 154–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.12.017>
- Wagner, H.N.R., Hühne, C. (2018) Robust knockdown factors for the design of cylindrical shells under axial compression: Potentials, practical application and reliability analysis. *Int. J. of Mechanical Sci.*, **135**, 410–430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.11.020>
- Wagner, H.N.R., Hühne, C., Janssen, M. (2020) Buckling of cylindrical shells under axial compression with loading imperfections: An experimental and numerical campaign on low knockdown factors. *Thin-Walled Structures*, **151**, 106764. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106764>
- Khakimova, R., Castro, S.G., Wilckens, D. et al. (2017) Buckling of axially compressed CFRP cylinders with and without additional lateral load: Experimental and numerical investigation. *Thin-Walled Structures*, **119**, 178–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.06.002>
- Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A. (2009) Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. *Measurement Sci. and Technol.*, **20**(6), 062001. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>
- Sutton, M.A., Wolters, W.J., Peters, W.H. et al. (1983) Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*, **1**(3), 133–139. DOI: [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1)
- Sjö Dahl, M. (1998) Some recent advances in electronic speckle photography. *Optics and Lasers in Engineering*, **29**(2–3), 125–144. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(97\)00081-X](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(97)00081-X)
- Sutton, M.A., McNeill, S.R., Helm, J.D., Chao Y.J. (2000) Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision. In: *Photomechanics, Berlin, Heidelberg*, 323–372.
- Sutton, M.A., Orteu, J.J., Schreier, H. (2009) *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media.
- Муравський, Л.І. (2010) *Методи спекл-кореляції для дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів*. Київ, Наукова думка.
Muravskiy, L.I. (2010) *Methods of speckle-correlation for study of mechanical properties of structural materials*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Dufour, J.-E., Hild, F., Roux, S. (2015) Shape, displacement and mechanical properties from isogeometric multiview stereocorrelation. *The J. of Strain Analysis for Engineering Design*, **50** (7), 470–487. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309324715592530>
- Лобанов, Л.М., Муравський, Л.І., Півторак, В.А., Вороняк, Т.І. (2017) *Моніторинг напруженого стану елементів конструкцій з використанням електромагнітних хвиль оптичного діапазону. Т. 3: Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: У довідн. пос. у 8-ми т. (З.Т. Назарчук, ред.)*, Львів, Простір-М.
Lobanov, L.M., Muravskiy, L.I., Pivtorak, V.A., Voronyak, T.I. (2017) *Monitoring of stressed state of structure elements using electromagnetic waves of optical range. Vol. 3: Technical diagnostics of materials and structures: Refer. Book, In: 8 Vol., Ed. By Z.T. Nazarchuk*. Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].

19. Luo, P.F., Chao, Y.J., Sutton, M.A., Peters, W.H. (1993) Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision. *Experimental Mechanics*, **33**(2), 123–132. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02322488>
20. Prasad A.K., Jensen K (1995) Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows. *Applied Optics*, **34**(30), 7092–7099. DOI: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-34-30-7092>
21. *Trilion Quality Systems*. <https://www.trilion.com/aramis>
22. *Correlated Solutions, Inc. VIC-3D*. <https://www.correlated-solutions.com/vic-3d>
23. Zhao, C., Matsuda, H., Lou, S. et al. (2013) Visualization of buckling on thin-walled cylindrical shell by digital image correlation method. *Applied Mathematics and Information Sciences*, **7**(3), 999–1004. DOI: <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/amis/vol07/iss3/18>
24. Wang, B., Zhu, S., Hao, P. et al. (2018) Buckling of quasi-perfect cylindrical shell under axial compression: a combined experimental and numerical investigation. *Int. J. of Solids and Structures*, **130–131**, 232–247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.09.029>
25. Wang B., Du, K., Hao, P. et al. (2019) Experimental validation of cylindrical shells under axial compression for improved knockdown factors. *Int. J. of Solids and Structures*, **164**, 37–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.01.001>
26. Labans, E., Bisagni, C. (2019) Buckling and free vibration study of variable and constant-stiffness cylindrical shells. *Composite Structures*, **210**, 446–457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.061>
27. Castro, S. G., Almeida Jr, J.H.S., St-Pierre, L., Wang, Z. (2021) Measuring geometric imperfections of variable – angle filament-wound cylinders with a simple digital image correlation setup. *Composite Structures*, **276**, 114497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114497>
28. Peterson, J.P., Seide, P., Weingarten, V.I. (1968) *Buckling of thin-walled circular cylinders. NASA SP-8007* (Technical Report).
29. Arbocz, J, Starnes Jr., J.H. (2002) Future directions and challenges in shell stability analysis. *Thin-Walled Structures*, **40**(9), 729–754. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(02\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(02)00024-1)
30. Degenhardt, R., Kling, A., Klein, H. et al. (2007) Experiments on buckling and postbuckling of thin-walled CFRP Structures using advanced measurement systems. *Int. J. of Structural Stability and Dynamics*, **7**(2), 337–358. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219455407002253>
31. *ATOS Compact Scan. Mobile 3D scanner for a wide range of applications*. https://www.gom.com/en/products/3d-scanning/atos-compact-scan?keyword=atos%20compact%20scan&device=c&network=g&gclid=Cj0KCQjw1OmoBh-DXARIsAAAYGSFwdUnAc-Y5Q4QmagrJ-khc0hV-e-Dx_jQMVB1QsaQp71M8fQuoMcaAq5AEALw_wcB
32. Hühne C., Zimmermann R., Rolfes R., Geier B. (2002) *Sensitivities to geometrical and loading imperfections on buckling of composite cylindrical shells. In: Proceedings of the European conference on spacecraft structures, materials and mechanical testing*. CNES, Toulouse, France.
33. Degenhardt, R., Kling, A., Bethge, A. et al. (2010) Investigations on imperfection sensitivity and deduction of improved knock-down factors for unstiffened CFRP cylindrical shells. *Composite Structures*, **92**(8), 1939–1946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.12.014>
34. Khakimova, R., Wilckens, D., Reichardt, J. et al. (2016) Buckling of axially compressed CFRP truncated cones: Experimental and numerical investigation. *Composite Structures*, **146**, 232–247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.023>
35. *ARAMIS Adjustable*. <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/aramis-adjustable>
36. Rudd, M.T., Eberlein, D.J., Waters, W.A. et al. (2023) Analysis and validation of a scaled, launch-vehicle-like composite cylinder under axial compression. *Composite Structures*, **304**(1), 116393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116393>
37. Uriol Balbin, I., Bisagni, C., Schultz, M.R., Hilburger, M.W. (2020) Scaling methodology applied to buckling of sandwich composite cylindrical shells. *AIAA J.*, **58**(8), 3680–3689. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.J058999>
38. Schultz, M.R., Sleight, D.W., Gardner, N.W. et al. (2018) Test and analysis of a buckling-critical large-scale sandwich composite cylinder. In: *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 1693.
39. «Focus on Marshall» Highlights 10 Years of Space Station Support and World's Largest «Can Crusher». YouTube, May, 20, 2013. <https://www.youtube.com/watch?v=NLkzSchXXzE>
40. *NASA Buckling Test with Real Time Module (Correlated Solutions, Inc., 2023)*. <https://www.correlatedsolutions.com/application/nasa-buckling-test-real-time>
41. Lovejoy, A.E., Hilburger, M.W., Gardner, N.W. (2018) Test and analysis of full-scale 27.5-foot-diameter stiffened metallic launch vehicle cylinders. In: *2018 AIAA/ASCE/ AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Confer.*, 1989.
42. Gardner, N.W., Hilburger, M.W., Haynie, W.T. et al. (2018) Digital image correlation data processing and analysis techniques to enhance test data assessment and improve structural simulations. In: *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Confer.*, 1698.
43. Haynie W., Hilburger M., Bogge M. et al. (2012) Validation of lower-bound estimates for compression-loaded cylindrical shells. In: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ ASME/AHS Adaptive Structures Confer. 14th AIAA*, 1689.
44. Hilburger M.W., Lindell M.C., Waters W.A., Gardner N.W. (2018) Test and analysis of buckling-critical stiffened metallic launch vehicle cylinders. In: *2018 AIAA/ASCE/ AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials Confer.*, 1697.

DEVELOPMENT OF OPTICAL-DIGITAL METHODS FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF AEROSPACE THIN-WALLED SHELL STRUCTURES (REVIEW)

L.I. Muravsky

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

A series of studies on diagnostics and non-destructive control of the stress-strain state of thin-walled cylindrical shell structures of aerospace engineering by optical-digital methods, in particular, three-dimensional (3D) digital image correlation (DIC) and laser photogrammetry methods, are described. The effectiveness and continuous improvement of these methods over the past decades have been noted. The results of experimental studies of composite and metal shell structures using the methods of 3D DIC are considered. The advantages of 3D DIC methods for simultaneous measurements of surface displacement and deformation fields using several digital image correlators located around the shell structure, over those 3D or 2D CCD methods that provide simultaneous registration of only a local area of the investigated surface using one correlator, were analyzed. The effectiveness of these methods for non-destructive testing of the dynamics of changes in the processes of the surface deformation and destruction under axial and radial loads, as well as for evaluating the knockdown factor of the thin-walled shell structure, is shown. 44 Ref., 3 Fig.

Keywords: shell structure, 3D digital image correlation, digital image correlator, composite cylindrical shell, metal cylindrical shell, knockdown factor, axial loads, radial loads

Надійшла до редакції 06.10.2023

МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РЕЗЕРВУАРІВ НА УКРАЇНСЬКІЙ АНТАРКТИЧНІЙ СТАНЦІЇ «АКАДЕМІК ВЕРНАДСЬКИЙ»

Ю.М. Посипайко¹, А.М. Андреев²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: posypaiko.yurii@gmail.com

²Національний антарктичний науковий центр МОН України. 01016, м. Київ, бульв. Тараса Шевченка, 16.
E-mail: uac@uac.gov.ua

Проведено діагностування технічного стану металевих конструкцій резервуарів і трубопроводів на УАС «Академік Вернадський». На підготовчому етапі виконано аналіз проектної та експлуатаційної документації на резервуари, обрано методи технічного обстеження, підібрано обладнання та допоміжне приладдя для виконання діагностичних робіт методами неруйнівного контролю. Виконано інструментальне обстеження стану металоконструкцій резервуарів і трубопроводів методами неруйнівного контролю з метою виявлення дефектів і пошкоджень у конструкційних елементах і зварних з'єднаннях, обстеження стану фундаменту та основи резервуара. Виконано протикорозійні роботи на днищі резервуара та замінено трубопроводи, що мали недопустимим корозійним пошкодженням. Усі елементи резервуарів мають робочий технічний стан і відповідають чинним нормам і стандартам на проектування, виготовлення та експлуатацію. Статична міцність стінки зовнішнього та внутрішнього резервуарів відповідає проекту та діючим нормативам. Завдяки проведенню антикорозійних робіт на днищі внутрішнього резервуара РВС-200 можна продовжити його експлуатацію до 2029 р. за умови виконання правил технічної експлуатації резервуарів і організації щорічного моніторингу технічного стану резервуарів та технологічного обладнання. Бібліогр. 20, рис. 5.

Ключові слова: моніторинг технічного стану, методи неруйнівного контролю, резервуари, трубопроводи, дефекти, пошкодження

Вступ. Резервуари для зберігання нафтопродуктів разом із дизельними електростанціями стали в Антарктиці основою життєзабезпечення наукових станцій. Сьогодні на антарктичних станціях експлуатуються переважно два типи резервуарів: резервуари горизонтальні сталеві (РГС) та резервуари вертикальні сталеві (РВС). Резервуари типу РГС об'ємом 20...150 м³ працюють, наприклад, на станціях Eduardo Frei, King Sejong, Bellingshausen та ін. Резервуари типу РВС об'ємом 200...2000 м³ працюють, наприклад, на станціях Palmer, Rothera, Arctowski та ін.

На Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» експлуатуються два резервуари: РВС-200 (рис. 1), збудований у 2007 р., та РГС-150 (рис. 2), збудований у 1980 р. Вони призначені

для приймання та зберігання дизельного пального. Крім того, в експлуатації знаходяться два технологічні резервуари об'ємом біля 6 м³ для підготовки пального перед його подачею в дизельні електрогенератори та котли водяного опалення приміщень станції. У 2016 р. розпочато, а в 2019–2023 рр. продовжено роботи з моніторингу технічного стану та профілактичного ремонту резервуарів і трубопроводів на станції «Академік Вернадський».

Резервуари для зберігання нафтопродуктів є об'єктами підвищеної небезпеки [1], тому їх періодичне технічне діагностування є обов'язковим видом контролю, який разом з постійним моніторингом технічного стану забезпечує безаварійну та безпечну експлуатацію. У той же час резервуари для зберігання нафтопродуктів є важливим



Рис. 1. Резервуар РВС-200. Вид зовні та зсередини

© Ю.М. Посипайко, А.М. Андреев, 2023



Рис. 2. Резервуар РГС-150. Вид зовні та зсередини

елементом системи життєзабезпечення майже всіх антарктичних станцій, що виконують дослідження в Антарктиці. Безаварійна експлуатація резервуарів в умовах Антарктики має велике значення з точки зору охорони навколишнього природного середовища, забезпечення екологічної, техногенної і пожежної безпеки.

Україна ще в 1992 р. приєдналась до міжнародного Договору про Антарктику [2, 3], а з 1996 р. веде дослідження Українська антарктична станція «Академік Вернадський». До країн-учасниць Договору про Антарктику висуваються жорсткі вимоги щодо збереження навколишнього природного середовища [4].

Міжнародні антарктичні організації розробили ряд документів, які регламентують міри щодо забезпечення екологічної безпеки на антарктичних станціях. У цих документах особлива увага приділяється зберіганню та використанню нафтопродуктів, заходам з локалізації аварій та ліквідації їх наслідків. Забезпечити виконання цих вимог можна лише за умови безаварійної експлуатації резервуарів і трубопроводів.

Вимоги міжнародних і національних стандартів, що стосуються резервуарів для зберігання нафтопродуктів, ґрунтуються на нормативних положеннях із забезпечення експлуатаційної надійності резервуарів [5–12]. На різних етапах «життєвого циклу» резервуарів вони зводяться до наступного:

- на етапі проектування – забезпечення запасу несучої здатності конструкцій за рахунок вибору матеріалів, технології виконання зварних з'єднань, форми та геометричних розмірів;
- на етапі заводського виготовлення елементів і будівництва – забезпечення умов якісної поставки, зборки та монтажу конструкцій резервуара;
- на етапі експлуатації – періодичне проведення технічного діагностування металоконструкцій, постійний моніторинг технічного стану, своєчасний профілактичний ремонт і виконання протикорозійних заходів.

Методи та засоби інструментального діагностування резервуарів. Програма технічного діагностування резервуарів визначається вимогами стандарту [13], тому нами виконано наступні

роботи з використанням засобів інструментального неруйнівного контролю:

- візуальний контроль металоконструкцій і зварних з'єднань (лупи оглядові та вимірювальні, штангенциркулі, лінійки, шаблони зварних швів, засоби очищення металу, лампи загального та місцевого освітлення тощо);
- ультразвуковий контроль товщини листів днища та стінки (товщиноміри ультразвукові з п'єзоелектричними перетворювачами та контрольними зразками);
- вимірювання горизонтальності днища (нівелір SL60-2);
- вимірювання вертикальності стінки (теодоліт Т2);
- вимірювання внутрішніх розмірів резервуара (лазерні та стрічкові рулетки);
- контроль герметичності зварних з'єднань днища (прямі й кутові накладні вакуумні камери НК-175 з вакуумметрами, вакуумний насос 2НВР-1Д);
- вихрострумний контроль зварних з'єднань (дефектоскоп ВДЗ-71);
- запис візуальної інформації на цифрові носії за допомогою пристрою ВИК/ТВА-1 та її архівації з метою наступного розшифрування;
- фото- та відеофіксація технологічних процесів підготовки днища до контрольних і ремонтних операцій;
- розрахункова експертиза стану конструкцій резервуара за результатами інструментального обстеження;
- аналіз отриманих результатів обстеження резервуара та підготовка висновку експертизи.

Крім того, у роботі було використано засоби підготовки днища до нанесення антикорозійного покриття (очищувач піскоструминний, компресор повітряний, пилосос та ін.), товщиномір антикорозійного покриття, засоби його нанесення та ін.

Результати технічного діагностування резервуарів наведено в публікаціях [14–17] та технічних звітах [18–20].

Загальна характеристика та технічний стан резервуара РВС-200. Резервуар РВС-200 споруджено на УАС «Академік Вернадський» в 2007 р.

за проектом ВАТ «УкрНДПроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського» і ВАТ «Інститут транспорту нафти» у формі двостінного вертикального циліндра з двома днищами та двома покрівлями за принципом «стакан в стакані». Дві герметичні оболонки забезпечують надійну експлуатацію резервуара в умовах екологічно вразливої Антарктики. Резервуар споруджувався в непростих умовах – антарктичне літо супроводжується вітрами, дощем і снігом. Температура повітря складає 0 ± 5 °С.

Розміри внутрішнього резервуара: висота стінки 5,96 м, внутрішній діаметр 6,63 м, товщина листів стінки та днища 5 мм, площа днища 34,5 м²; розміри зовнішнього резервуара: висота стінки 6,58 м, діаметр 6,96 м, товщина листів стінки 5 мм, товщина листів днища 8 мм. Відстань між стінками внутрішнього та зовнішнього резервуарів 0,16 м.

Покрівля резервуара (внутрішня та зовнішня) складається з двох щитів, які спираються на бортовий кутник стінки. Між собою щити скріплені накладним зварним з'єднанням. Товщина листів настилу покрівлі 4 мм.

Фундаментом резервуара є сім взаємно паралельних залізобетонних стрічок розміром 8300×460×650 мм. Стрічки фундаменту закріплені за допомогою шпурів до малотріщинуватої скелі. По фундаментних стрічках перпендикулярно їх довжині укладено 15 сталевих балок-двотаврів № 14 заввишки 140 мм, закріплених зварюванням до закладних пластин фундаменту. Ці балки є основою днища резервуара.

Стінки резервуара змонтовано з окремих листів розміром 3000×1500 мм, завтовшки 5 мм і з'єднано ручним дуговим двостороннім зварюванням на монтажному майданчику. Всі зварні з'єднання є стиковими.

Візуальний контроль стінок резервуара показав, що на поверхні металевих листів відсутні дефекти прокату: тріщини, розшарування, закати, задири, раковини та ін. Корозія поверхні металу під захисним покриттям є незначною, на рівні прокатної окалини. Захисне фарбове покриття стінки в основному в хорошому стані. Винятком є окремі ділянки в зоні уторного шва, де в результаті корозійних процесів фарбове покриття злуцилось.

Зварні з'єднання в цілому відповідають вимогам стандартів [10, 11, 14]. Ширина валиків посилення шва: 12...14 мм (вертикальні шви) і 10...12 мм (горизонтальні шви); висота – 1...2,5 мм. Катети кутового шва стінки і днища 6...8 мм.

У швах не виявлено недопустимих дефектів зварних з'єднань (поверхневі тріщини, пори, підрізи, пропалини, не заварені кратери та ін.), що

перевищують допустимі нормами розміри, але зустрічаються окремі відхилення форми валика посилення шва, які, проте, не можуть вплинути на експлуатаційні характеристики з'єднання. У зварних з'єднаннях виявлено: лінійні зміщення кромки до 1 мм (4...5 % довжини шва), перевищення опуклості зварного шва (4...5 % довжини), бризки металу (10...15 шт/м), підрізи (до 0,5 мм) верхньої кромки горизонтальних швів (10...15 % довжини).

Для виконання вимірювання горизонтальності днища та вертикальності стінки нівелірів і теодолітів встановлювалися навколо резервуара на снігових заметах. Треба сказати, що всі показники горизонтальності днища та вертикальності обох стінок виявилися в межах чинних нормативів, хоч резервуар монтувався в складних погодних умовах.

Максимальне відхилення твірних резервуара від вертикалі назовні складає +22 мм, а всередину –26 мм. Максимальна різниця точок нівелювання контуру днища складає всього 6 мм.

Вертикальність стінки внутрішнього резервуару виміряна за допомогою підвісу, що закріплювався під покрівлю П-подібним магнітом. Максимальне відхилення твірних стінки від вертикалі назовні складає +38 мм, а всередину –31 мм. Максимальна різниця точок нівелювання контуру днища складає всього 6 мм.

Розрахункова перевірка міцності стінки.

Оцінка міцності сталевих резервуарів, що знаходяться в експлуатації, здійснюється на основі результатів їх технічного обстеження із застосуванням загальної схеми розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами [2]. У загальному вигляді умова міцності для будь-якого конструктивного елемента записується таким чином:

$$\sigma \leq \gamma R, \quad (1)$$

де σ – розрахункова (максимально можлива) величина напружень в елементі конструкції, яка визначається відповідним розрахунком; R – допустима величина напружень для елемента конструкції, що розглядається; для поясів стінки з Ст3пс – $R = 240,3$ МПа; γ – коефіцієнт умов роботи, який визначається нормативними документами. Для першого та другого поясів стінки згідно з [10] $\gamma = 0,6$ та $0,7$ відповідно.

Розрахунок величини кільцевого напруження в першому та другому поясках циліндричної стінки резервуара, виходячи з фактичних товщин листів металу та при умові максимального заповнення резервуара, виконано за методикою, викладеною в [8, 14].

Максимально можливе кільцеве напруження в першому (σ_1) та другому (σ_2) поясках стінки складає: $\sigma_1 = 44,3$ МПа, $\sigma_2 = 34,1$ МПа при допустимих значеннях 144,2 і 168,2 МПа відповідно. Таким чином, умова міцності (1) виконується зі значним запасом.



Рис. 3. Загальний вид корозійних пошкоджень днища

За результатами нівелювання зовнішнього контуру днища визначено параметр ΔU_k , що характеризує нерівномірність осідання, та Θ_k , що характеризує загальний крен резервуару [8]. Розрахункових параметрів наведено в [14]. Значення параметра ΔU_i нерівномірності осідання днища для резервуару РВС-200 відповідає вимогам [10], і складає 4, а його допустиме значення – 40. Значення параметра Θ_k загального крену для резервуару відповідає вимогам [10] і складає 0,0004, а його допустиме значення – 0,006.

Днище внутрішнього резервуару виготовлено із сталевих листів завтовшки 5,0...5,2 мм. Листи зібрано в полоси стиковими зварними з'єднаннями, а між собою полоси з'єднано в наклад. Зовнішній огляд і візуальний контроль днища резервуару показали, що поверхня металевих листів і зварні з'єднання вражені корозійною виразкою завглибшки до 2 мм. Корозійні виразки різної глибини згруповані на окремих ділянках площею 20...40 см² і розкидані по листах, переважно вздовж зварних з'єднань. Характерні корозійні ураження листів днища показано на рис. 3.

Зварні з'єднання в цілому відповідають вимогам нормативних документів [7–10]. У швах не виявлено недопустимих поверхневих дефектів зварних з'єднань – тріщин, підрізів, пропалин, не заварених кратерів, пор виробничого походження, критичних корозійних виразок тощо. Ширина валиків посилення шва стикових зварних з'єднань складає 10...12 мм, висота – 1...2,5 мм. У накладних зварних з'єднаннях величина катетів шва складає 5...7 мм. Перехід наплавленого металу шва до металу листа не завжди плавний.

У швах зварних з'єднань також виявлено окремі корозійні виразки завглибшки до 2 мм. Вздовж швів є бризки металу. Загальний вид корозійних пошкоджень зварних з'єднань днища показано на рис. 4.

Контроль герметичності зварних з'єднань днища виконано методом вакуумування [9] з метою виявлення наскрізних пошкоджень – течей. При цьому використано накладні вакуумні камери, розроблені та виготовлені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона (проект НК-175), та вакуумний насос 2НВР-1Д. Течей в зварних швах не виявлено.

Крім того, контроль герметичності зварних з'єднань днища та стінок в цілому виконано шляхом перевірки наявності пального в просторі між двома днищами резервуару. У зовнішньому днищі резервуару встановлено випускний патрубок з вентилем. Пальне, що зберігається у внутрішньому резервуарі, може потрапити у простір між стінками та днищами резервуару тільки при наявності течей виробничого або корозійного походження у зварних з'єднаннях чи металевих листах. Відкривши вентиль випускного патрубка днища зовнішнього резервуару, можна переконавшись у наявності чи відсутності пального в просторі між двома днищами. Виконання цієї операції показало, що пальне відсутнє. Тобто течі у внутрішньому резервуарі відсутні.

При обстеженні днища проведено випробування пристрою запису візуальної інформації ВК/ТВА-1 (рис. 5). Пристрій обладнано відеокамерою та блоком бездротової передачі інформації на смартфон. Такий пристрій дозволяє записати інформацію про стан зварних з'єднань важкодоступних або розташованих поза доступом фахів-

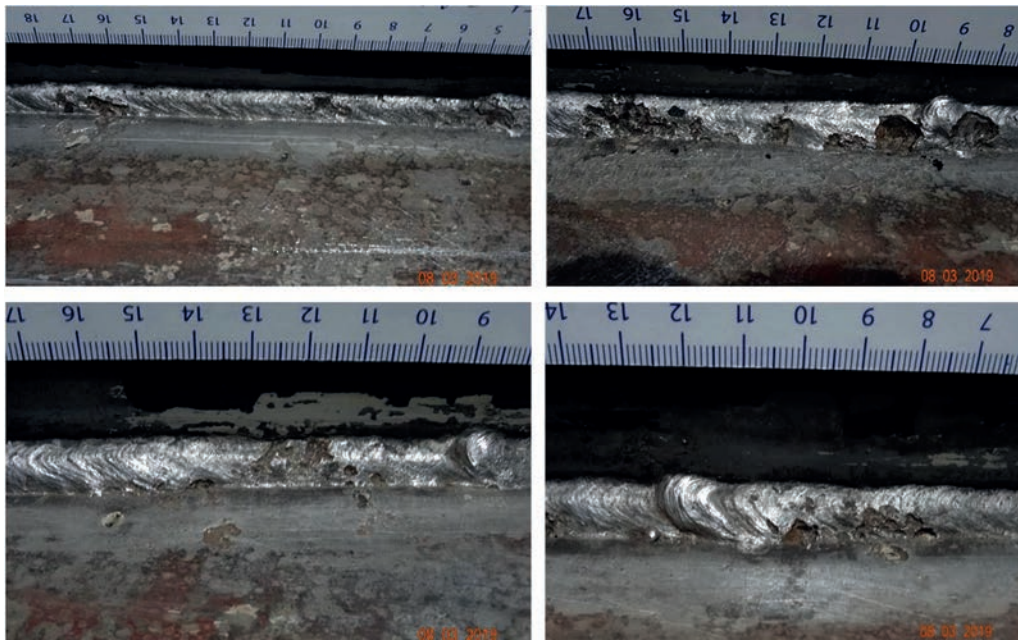


Рис. 4. Загальний вид корозійних пошкоджень зварних з'єднань днища



Рис. 5. Випробування пристрою запису візуальної інформації ВИК/ТВА-1 на зварних з'єднаннях днища резервуара РВС-200

ців з неруйнівного контролю об'єктів, а аналізувати її фахівцям за допомогою комп'ютерної техніки в лабораторних умовах.

Одним з головних висновків при діагностуванні резервуара стала необхідність першочергового антикорозійного захисту днища внутрішнього резервуара. Влаштування антикорозійного покриття днища виконано у 2019 р.

Нанесення на днище антикорозійного покриття. Підготовка днища до нанесення антикорозійного покриття включала кілька етапів його очищення: збір залишків пального та осаду; очищення днища шпателями від залишків фарби; піскоструминне очищення зварних з'єднань, пришовної зони та ділянок металу, вражених виразковою корозією; знежирення поверхні днища ацетоном.

На сьогодні існує безліч антикорозійних матеріалів для нанесення на внутрішню поверхню резервуарів для зберігання нафтопродуктів. З метою вибору сучасних антикорозійних матеріалів і раціональної технології їх застосування в умовах Антарктики протягом 2016–2017 рр. було проведено ряд досліджень на зразках за участю про-

відних фірм, що виконують антикорозійні роботи в резервуарах. У результаті досліджень та аналізу перевага була віддана комбінованому покриттю, першим шаром якого є суспензія лускатого металевого не окисленого цинку в системі полімерних в'язучих, так зване «холодне цинкування» матеріалом LiquidZinc. А наступними трьома шарами є двокомпонентне рідкокерамічне покриття ZingaMetallCeram CoatCN1-N. Матеріал LiquidZinc утворює з очищеною сталеву поверхню стійкий хімічний зв'язок. Процентний вміст цинку в матеріалі 88...92 %, питома вага матеріалу 2,90...2,95 г/см³. Двокомпонентне рідкокерамічне покриття ZingaMetallCeram CoatCN1-N утворює щільний еластичний шар, забезпечуючи захист металу в агресивному середовищі та воді. Це покриття можна наносити в кілька шарів. Час повного висихання 7 діб, розчинник – ацетон. Адгезію шару матеріалу LiquidZinc перевірено способом «зіскоблювання ножом». Перевірка показала, що матеріал не знімається шаром, залишається на металі, а зіскоблюється тільки у вигляді порошку цинку. Адгезію покриття ZingaMetallCeram

CoatCN1-N перевірено на зразках-свідках. Товщина кожного шару при нанесенні на днище вимірювалась товщиноміром.

Загальна характеристика та технічний стан резервуара РГС-150. Резервуар РГС-150 споруджено в 1978-79 рр., коли станція належала Великій Британії та носила ім'я Фарадея, за технологією «Braithwaite», що передбачає складання стінки зі сталених штампованих елементів квадратної форми розміром 1220×1220 мм з діагональними ребрами жорсткості заввишки 40 мм. Така технологія дозволяє складати ємності різного об'єму без зварювання та підймальних механізмів. Стальні квадратні елементи скріплюються між собою гвинтами з використанням еластичних ущільнюючих прокладок і герметика. Товщина металевих листів, з якого шляхом гарячого штампування виготовлено такі елементи, складає 5 мм. У 1986 р. в резервуарі змонтовано та зварено внутрішню герметичну оболонку з листів корозійностійкої сталі завтовшки 3 мм.

Резервуар розділено навпіл герметичною перегородкою на дві ємності однакового об'єму, що з'єднані між собою зовнішнім трубопроводом діаметром 80 мм. На виході кожної ємності встановлено засувку Ду 2,5". Умовно ємності будемо позначати: РГС-150/1 – ліва частина, РГС-150/2 – права частина. Резервуар має форму паралелепіпеда розмірами 7340×7340×3660 мм. Внутрішні розміри ємностей 7250×3570×3660 (± 10) мм. Гранична висота наливу 3600 мм. Конструктивну міцність резервуару надають внутрішні косі та поперечні тяги, виготовлені з кутника 70×70 мм. Покрівля резервуара складена з листів розміром 1220×1220×4 мм, з'єднаних між собою гвинтами та встановлених на арочних балках заввишки 300 мм, що опираються на стінки. Металоконструкції резервуара виготовлені у Великій Британії.

Фундаментом резервуара є сім взаємно паралельних залізобетонних стрічок розміром 8000×600×800 мм. Фундамент споруджено в 1978 р., на скельній основі.

Відхилення поверхні фундаментних стрічок від горизонтальної площини виміряно за допомогою нівеліра SL 60-2 Rank Precision Industries Ltd. Точки нівелювання вибрано на кутах резервуара. Вимірювання показали, що горизонтальна площа фундаменту нахилена по поздовжній осі на 108...115 мм. Такий нахил фундаменту очевидно був закладений в його проєкті з метою нахилу самого резервуара в сторону зливних патрубків.

Поверхня металевих сталених штампованих елементів квадратної форми, що складають зовнішню оболонку стінок резервуара, є рівномірно гладкою, фарбованою, на ній не виявлено дефектів

прокату, штампування чи відхилення форми. На поверхні відсутні сліди протікань пального.

Внутрішню оболонку стінок і днища резервуара змонтовано та зварено з листів антикорозійної сталі розміром 2000×1300 мм завтовшки 3 мм. Між собою листи з'єднані накладними швами, а зі сталеними елементами зовнішньої оболонки – швами «в проріз». Таким чином, усі зварні шви є кутовими з катетами 3...4 мм. Недопустимих дефектів у зварних з'єднаннях і металі не виявлено. Найпоширенішим недоліком зварних з'єднань є нерівномірність форми валика посилення шва, що, проте, не може вплинути на експлуатаційні характеристики з'єднання. Не виявлено корозійних пошкоджень металу та швів.

Вертикальність стінок резервуара виміряна за восьми твірними. Місця розташування твірних для вимірювання вибрано біля кутів резервуара. Відхилення стінок резервуара від вертикалі відповідає нахилу фундаменту: передня стінка нахилена в середину резервуара (–67...–70) мм, а задня – на зовні (+55...+70) мм. Бокові стінки мають незначне відхилення від вертикалі (–8...+20 мм).

Конструкція днища є аналогічною конструкції стінок. Стальні елементи квадратної форми опираються краями на двотаври заввишки 180 мм, що розташовані на фундаментних стрічках. Поверхня металевих листів, яку можна оглянути поміж бетонними стрічками фундаменту, рівномірно вкрита атмосферною корозією, зустрічаються сліди давнього фарбування. На ній не виявлено дефектів прокату, штампування чи відхилення форми. На поверхні відсутні сліди протікань пального.

Покрівлю резервуара складено із плоских сталевих листів розміром 1220×1220×4 мм, з'єднаних між собою гвинтами та встановлених на арочних балках, що опираються на стінки. Товщина металевих листів 4 мм, висота арочних балок 300 мм. Поверхня металевих листів рівномірно гладка, фарбована, на ній не виявлено дефектів прокату, штампування чи відхилення форми.

Технологічне обладнання резервуарів (трубопроводу заповнення паливом, трубопроводу відбору пального для дизель-генераторів, клинові засувки, випускні патрубки з вентилями, люки-лази, світлові люки, дихальні клапани, запобіжні клапани, замірні люки, стаціонарні драбини підйому на покрівлю та спуску в резервуар та ін.) знаходяться в робочому стані.

Висновки

У результаті обстеження технічного стану обох резервуарів та ремонту днища резервуара РВС-200 зроблено наступні висновки:

1. Усі елементи резервуарів (фундаменти, стінки, днища та покрівлі зовнішнього і внутрішнього

резервуарів) мають робочий технічний стан і відповідають чинним нормам і стандартам на проектування, виготовлення та експлуатацію.

2. Статична міцність стінки зовнішнього та внутрішнього резервуарів відповідає проекту та діючим нормативам.

3. Завдяки проведенню антикорозійних робіт на днищі внутрішнього резервуара РВС-200 можна продовжити його експлуатацію до 01.04.2029 р. за умови виконання правил технічної експлуатації резервуарів та організації щорічного моніторингу технічного стану резервуарів і технологічного обладнання.

4. Допоміжний резервуар РГС-150 знаходиться в задовільному технічному стані. Стінки, днище та покрівля не мають недопустимих деформацій чи дефектів, що можуть вплинути на надійність експлуатації та працездатність резервуара. На металоконструкціях резервуара не виявлено слідів протікання пального, що свідчить про герметичність внутрішньої оболонки. Статична міцність стінки, днища та покрівлі резервуара забезпечується системою косих і поперечних тяг, які відповідають проекту резервуара та інструкції з його монтажу. Резервуар може експлуатуватись у режимі тимчасового зберігання пального за умови дотримання Правил технічної експлуатації резервуарів.

5. Трубопроводи, що з'єднують резервуари з дизельною електростанцією, замінено на нові, перевірено на герметичність і міцність перед введенням в експлуатацію.

6. Моніторинг технічного стану резервуарів і трубопроводів слід проводити щорічно під час сезонних технічних робіт, а огляд потенційно можливих місць протікань пального слід виконувати щоденно. При цьому необхідно мати наготові засоби швидкого виявлення протікань та їх усунення.

Список літератури.

1. Закон України від 18.01.2001 № 2245-III «Про об'єкти підвищеної небезпеки».
2. Постанова Верховної Ради України «Про приєднання до Договору про Антарктику» № 2609-XII від 17.09.1992.
3. Закон України від 22.02.2001 № 2284-III «Про приєднання України до Протоколу про охорону навколишнього середовища до Договору про Антарктику».
4. COMNAR Accident Incident and Near Miss Reporting (AINMR) System. <https://www.comnap.aq/membersonly/AINMR/SitePages/Home.aspx>.
5. API 653-2014 Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction.
6. EN 14015-2004 Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above.
7. (1988) *Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту*. Москва, Недра.
8. (1997) *Доповнення та зміни до «Правил технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту»*. Київ, УО «Укрнафтопродукт».
9. (1998) *Правила технической эксплуатации и охрана труда на нефтебазах*. Київ, УО «Укрнафтопродукт».
10. (1994) ВБН В.2.2-58.2-94 *Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа*. Київ, Держкомнафтогаз.

11. (2012) ДСТУ Б В.2.6-183:2011 *Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови (ГОСТ 31385-2008, NEQ)*. Київ, Мінрегіон України.
12. (2009) ДБН В.1.2-14-2009 *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ*.
13. (2009) ДСТУ НБА.3.1-10:2008 *Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів*. Київ, Мінрегіонбуд України.
14. Посипайко Ю.М. (2016) Дефектоскопія в Антарктиці: технічне діагностування резервуара РВС-200 на УАС «Академік Вернадський». *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 46–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.04.08>
15. Посипайко Ю.М. (2016) Технічне діагностування резервуара РВС-200 на УАС «Академік Вернадський». *Зб. доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль і технічна діагностика», Київ*, сс. 104–109.
16. Жук Г.В., Мороз І.В., Барвінко А.Ю. та ін. (2017) Особливості конструкції та обслуговування резервуару РВС-200 для зберігання дизельного палива на Антарктичній станції «Академік Вернадський». *Автоматическая сварка*, 2, 36–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.02.07>
17. Посипайко Ю.М. (2017) Резервуари в Антарктиці: будівництво та діагностування. *Сварщик*, 4, 44–49.
18. (2016) *Технічний звіт (експертний висновок) про технічний стан резервуара РВС-200, встановленого на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський»*. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона.
19. (2019) *Висновок про технічний стан резервуара РГС-150, встановленого на УАС «Академік Вернадський» на острові Галіндез в архіпелазі Аргентинських островів*. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона.
20. (2019) *Технічний звіт про стан та ремонт днища резервуара РВС-200, встановленого на УАС «Академік Вернадський» на острові Галіндез в архіпелазі Аргентинських островів*. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

References

1. Law of Ukraine dated January 18, 2001 No. 2245-III «On objects of increased danger» [in Ukrainian].
2. Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine «On accession to the Antarctic Treaty» No. 2609-XI of.17.09.1992 [in Ukrainian].
3. Law of Ukraine dated February 22, 2001 No. 2284-III «On Ukraine's Accession to the Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty» [in Ukrainian].
4. COMNAR Accident Incident and Near Miss Reporting (AINMR) System. <https://www.comnap.aq/membersonly/AINMR/SitePages/Home.aspx>.
5. API 653-2014 *Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction*.
6. EN 14015-2004 *Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above*.
7. (1988) *Rules for the technical operation of tanks and instructions for their repair*. Moscow, Nedra [in Russian].
8. (1997) *Additions and changes to the «Rules for technical operation of tanks and instructions for their repair»*. Kyiv, JSC «Ukrnaftoprodukt» [in Russian].
9. (1998) *Rules for technical operation and labor protection at oil storage depots*. Kyiv, Ukrnaftoprodukt [in Russian].
10. (1994) ВБН В.2.2-58.2-94 *Vertical steel tanks for storing oil and oil products with saturated vapor pressure not higher than 93.3 kPa*. Kyiv, Derzhkomnaftogaz [in Ukrainian].
11. (2012) DSTU B V.2.6-183:2011 *Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products. General technical conditions (GOST 31385-2008, NEQ)*. Kyiv, Ministry of Regions of Ukraine [in Ukrainian].
12. (2009) DBN V.1.2-14-2009 *General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures, construction structures and foundations* [in Ukrainian].
13. (2009) DSTU NBA.3.1-10:2008 *Guidelines for conducting technical diagnostics of vertical steel tanks*. Kyiv, Minregionbud Ukrainy [in Ukrainian].

14. Posypaiko, Yu.M. (2016) Flaw detection in Antarctic. Technical diagnostics of RVS-200 tank in Ukrainian Antarctic station «Akademik Vernadskii». *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 46–51. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.04.08>.
15. Posypaiko, Yu.M. (2016) Technical diagnostics of RVS-200 tank in UAS «Akademik Vernadskii». In: *Proc. of 8th Nat. Sci.-Tekh. Conf. on Non-destructive Testing and Technical Diagnostics*. Kyiv, 104–109 [in Ukrainian].
16. Zhuk, G.V., Moroz, I.V., Barvinko, A.Yu. et al. (2017) Peculiarities of construction and service of tank RVS-200 for storage of diesel fuel in Antarctica at the station «Akademik Vernadsky». *The Paton Welding J.*, 2, 33–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.02.07>
17. Posypajko, Yu.M. (2017) Tanks in Antarctica: Construction and diagnostics. *Svarshchik*, 4, 44–49 [in Ukrainian].
18. (2016) *Technical report (expert opinion) on the technical condition of the RVS-200 tank installed at the Ukrainian Antarctic Station «Akademik Vernadsky»*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
19. (2019) *Conclusion on the technical condition of the RGS-150 tank installed on the UAS «Akademik Vernadsky» on the island of Galindez in the archipelago of the Argentine Islands*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
20. (2019) *Technical report on the condition and repair of the bottom of the RVS-200 tank installed on the UAS «Akademik Vernadsky» on the island of Galindez in the archipelago of the Argentine islands*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].

TANK TECHNICAL CONDITION MONITORING AT THE UKRAINIAN ANTARCTIC STATION «ACADEMIK VERNADSKY»

Yu.M. Posypaiko¹, A.M. Andreev²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: posypaiko.yurii@gmail.com

²National Antarctic Scientific Center of the Ministry of Education and Science of Ukraine. 16 T. Shevchenko Blvd., 01016, Kyiv. E-mail: uac@uac.gov.ua

Diagnostics of the technical condition of metal structures of tanks and pipelines at «Akademik Vernadsky» UAS was carried out. At the preparatory stage, an analysis of design and operational documentation for tanks was performed, technical inspection methods were selected, equipment and auxiliary equipment were selected for performing diagnostic work using non-destructive testing methods. An instrumental inspection of the condition of metal structures of tanks and pipelines was carried out using non-destructive testing methods in order to identify defects and damage in structural elements and welded joints, an inspection of the condition of the foundation and base of the tank. Anti-corrosion work was carried out on the bottom of the tank and pipelines that had unacceptable corrosion damage were replaced. All elements of the tanks are in working technical condition and comply with current norms and standards for design, manufacture and operation. The static strength of the wall of the external and internal tanks corresponds to the project and current regulations. Due to anti-corrosion work on the bottom of the internal tank of RVS-200, its operation can be continued until 2029, provided that the rules for the technical operation of the tanks and the organization of annual monitoring of the technical condition of the tanks and technological equipment are followed. 20 Ref., 5 Fig.

Keywords: tanks, technical condition monitoring, non-destructive testing methods, defects, damage

Надійшла до редакції 18.09.2023

ПЕРЕДПЛАТА 2024

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	–	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

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

Передплату на журнали можна оформити по каталогам передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

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 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2022 рр.





П'ЯТА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЛИТВА, КОВАНИХ І ВАЛЬЦЬОВАНИХ ВИРОБІВ



П'ята галузева конференція з неруйнівного контролю литва, кованих і вальцьованих виробів (5° Convegno Fusi Forgiati Laminati) пройшла 18-19 жовтня 2023 р. у курортному комплексі Пескєра-дель-Гарда (Peschiera del Garda) поблизу Верони, Італія. Конференцію організовано Італійською асоціацією НК спільно з компанією Cogne Acciai Speciali (CAS) S.p.A. (<http://www.cogne.com>), яка є провідним виробником сортового прокату із нержавіючої сталі та нікелевих сплавів, а також відливок і поковок для різних галузей машинобудування. Зазначимо, що місце проведення вибрано не випадково, так як північ Італії є одним з найрозвинутіших регіонів Європи, де зосереджено багато підприємств металургії, металообробки, машинобудування, аерокосмічної галузі, суднобудування тощо. Метою конференції було створення платформи для відкритої дискусії та взаємодії між розробниками і технологами галузі та спеціалістами НК з метою вирішення проблем, пов'язаних із викликами, які створює промислова революція та автоматизація промислових секторів, щодо забезпечення високої якості продукції.

Високу професійну планку дискусіям було закладено в пленарній доповіді представника CAS

М. Марино (M. Marino) «Розрахунок металокоплекцій дуплексних і супердуплексних сталей для подальшого гарячого перетворення: кування та вальцювання». Ґрунтовну оглядову доповідь «Реконструкція гідроелектростанцій за допомогою литих, кованих та вальцьованих виробів» зробив голова італійської асоціації НК Е. Тубероза (E. Tuberosa), який представляв також енергетичну компанію Gruppo Iren S.p.A. (<https://www.gruppoiren.it>). Інші доповіді були присвячені застосуванню різних методів (ультразвукових, термографічних, проникаючих рідин) для ручного та автоматизованого НК спеціальних сталей, вальцьованих виробів і литва. Увагу учасників привернула доповідь представника фірми Evident Europe GmbH (колишня назва Olympus Scientific Solutions) Д. Корті (G. Corti) «Потенціал вихрових струмів для контролю кованих і вальцьованих виробів». У доповіді подано здебільш відому з попередніх публікацій інформацію про багатоеlementні вихроструміві перетворювачі (ВСП) з використанням мультиплексорних систем вихрострумівого контролю. Інший підхід представлено у доповіді В. Учанина, Дж. Нардоні (G. Nardoni) і М. Ферольді (M. Feroldi) «Інноваційні багатоеlementні вихроструміві перетворювачі подвійного диференціювання типу EDDYLINE для контролю поковок», у якій подано нову концепцію побудови багатоеlementних ВСП для використання з недорогими одноканальними дефектоскопами (патент України № 127548, опубл. 04.10.2023, Бюл. № 40). Запропонований підхід дозволяє у 5–6 разів збільшити продуктивність вихрострумівого методу, що дозволило компанії I&T Nardoni Institute (<https://www.nardonibs.com>) успішно випробувати дослідні зразки ВСП типу EDDYLINE для контролю великогабаритних поковок на декількох італійських підприємствах. Зазначимо, що це, можливо, перший випадок успішного використання вихрострумівого методу для контролю великогабаритних поковок. Раніше вихрострумівий НК великогабаритних поковок вважався неперспективним через недостатню продуктивність методу. Доповідь викликала жвавий інтерес голови Італійської Асоціації НК Езіо Туберози (E. Tuberosa), який нещодавно був обраний віце-президентом Європейської федерації НК, та Мішель Карбоні (M. Carboni) з Міланської політехніки, який планує випробувати ВСП типу EDDYLINE для контролю залізничних осей.



Доповідає Валентин Учанин



Джузеппе Нардоні, Валентин Учанин, Езіо Тубероза та Мішель Карбоні

В.М. Учанин

XX МІЖНАРОДНИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БІЗНЕС-ФОРУМ

17–19 жовтня 2023 р. у Києві в Міжнародному виставковому центрі відбувся XX Міжнародний енергетичний бізнес-форум «5Е» – Енергетика. Електротехніка. Енергоефективність. Екологія. Енергоресурси». Попри війну, енергетичний бізнес-форум став наймасштабнішою подією, головною метою якої – сприяння відновленню енергетичної інфраструктури країни та налагодженню взаємин та формуванню нових бізнес-зв'язків.

Енергетичний бізнес-форум «5Е» проходив у форматі міжнародних виставок: Енергетика в промисловості; EcoEnergyExpo; Electro Install; E-Comps+Digitec; НАФТОГАЗЕКСПО; Mining & Minerals Expo та ділової програми. Форум продемонстрував свій високий статус, підтверджений масштабом і популярністю серед учасників та відвідувачів. Число учасників, акцент на українському виробнику, різноманітність представленого обладнання, нові технологічні рішення, унікальні розробки, тематичні конференції зробили форум ефективним, наповненим, цікавим та результативним. У форумі взяли участь 145 учасників з семи країн світу (Австрія, Китай, Туреччина, Німеччина, Польща, Україна, Франція). Свою продукцію представили 139 українських компаній. Площа експозицій – 6500 м². Форум відвідали понад 6000 учасників з 13 країн світу.

XX Міжнародна спеціалізована виставка «Енергетика в промисловості» вкотре підтвердила свій статус головної галузевої події в Україні, зібравши на майданчику МВЦ ключових гравців енергетичного та електротехнічного ринків. Цього року виставка стала важливим індикатором стану енергетичного та електротехнічного ринків, своєчасно зреагувавши на запити українських споживачів та сформувавши пропозиції товарів та послуг. На стендах були представлені зразки сучасного електротехнічного та енергетичного обладнання, інноваційні розробки і технології, високотехнологічне устаткування та прилади для об'єктів енергетики, промисловості, підприємств різних сфер діяльності. Серед учасників виставки – ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» – провідна українська машинобудівна компанія, основною сферою діяльності якої є проектування, виготовлення та комплексне постачання газотурбінного обладнання для кораблебудування, об'єктів газотранспортної галузі та теплоелектрогенерації, яка пропонує енергетиці широкий вибір газотурбінного устаткування власного виробництва для вироблення електричної і теплової енергії: від газотурбінних двигунів та установок до електростанцій простого, когенераційного та комбінованого циклу.

V Міжнародна спеціалізована виставка «ELECTROINSTALL» – єдиний на сьогодні виставковий майданчик і головне місце зустрічі, яке приймає численну професійну аудиторію, чия діяльність пов'язана із виробництвом, передачею,

розподілом і споживанням електричної енергії, проектуванням і будівництвом електричних систем і мереж, монтажем і експлуатацією електротехнічного обладнання. Учасники цьогорічної виставки продемонстрували здатність під час війни швидко реагувати на запити та потреби споживачів найбільш затребуваного сегменту електротехнічного ринку. Експозиції учасників презентували комплекти безперебійного та резервного живлення, низьковольтної апаратури і приладів, електронних вузлів і автоматики, електроустановчих виробів, кабельно-провідникової продукції, рішень для автоматизації, комп'ютеризації виробничих процесів, технології освітлення.

Особливе місце серед проведених виставкових заходів було відведено виставці «E-Comps+DigiTec», яка за тематикою представляє стратегічно важливу для України галузь електронної індустрії. Надзвичайної ваги виставка набула саме зараз, коли повномасштабна війна змінила обсяги та структуру експортних й імпорتنих операцій та логістику поставок, чим спричинила дефіцит електроніки для високотехнологічних виробництв. Учасниками виставки були компанії, що активно працюють над впровадженням своїх інноваційних продуктів і технологій у високотехнологічні галузі економіки. На стендах були презентовані: електронні компоненти, мікропроцесорна техніка, прилади цифрової та аналогової електроніки, комплектуючі, матеріали, інструменти, розробки для телекомунікаційних систем та мереж, технології захисту інформаційних сервісів. Ця бізнес-подія збрала на єдиному майданчику виробників та дистриб'юторів електроніки, постачальників та розробників обладнання, представників виробничих, науково-технічних і сервісних організацій, компаній-інтеграторів систем, інших зацікавлених фахівців.

У цьому році проведення Міжнародної спеціалізованої виставки EcoEnergyExpo було як ніколи актуальним. Через атаки країни-агресора на енергетичні об'єкти нашої країни, в тому числі й на об'єкти ВДЕ, загострилася потреба у впроваджен-



Газотурбінний двигун для енергетики на стенді «Зоря»-«Машпроект»



Стенд компанії «Хімлаборреактив»

ні новітніх технологій у галузі відновлюваної енергетики, у побудові резервного, автономного та децентралізованого енергопостачання, впровадженні систем довготривалого зберігання енергії. Учасники виставки, реагуючи на попит, широко представили продукцію ринку зеленої енергетики, а саме: сонячні панелі, комплектуючі для сонячних електростанцій, системи накопичення та зберігання відновлюваної енергії, інвертори, побутові та промислові зарядні станції, акумуляторні батареї, твердопаливні котли, рекуператори і повітропроводи, системи освітлення, електромобілі національного виробництва, зарядні станції для електромобілів. Особливу увагу відвідувачів привернули системи автономного безперебійного живлення, які є необхідними як у житлових приміщеннях, так і на підприємствах, особливо напередодні зими. Серед учасників виставки – компанія «Хімлаборреактив», постачальник обладнання та витратних матеріалів для лабораторій фармацевтичної, медичної, аграрної, харчової, хімічної галузей, гірничо-металургійного комплексу і машинобудування, нафтогазової галузі, державного контролю якості.

Захід НАФТОГАЗЕКСПО став найбільшою виставковою подією в Україні для нафтової, газової і нафтопереробної промисловості. Цього року відвідувачі виставки мали змогу ознайомитися із сервісними послугами і обладнанням для розвідки, буріння, експлуатації нафтових і газових свердловин, насосним, компресорним, теплообмінним, газотурбінним обладнанням, трубною продукцією, запірно-регулюючою арматурою, КВП та ін. Серед учасників виставки були компанії – ТОВ «НВФ Ультракон» та ТОВ «НВФ Діагностичні прилади», відомі розробники та постачальники для підприємств України засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики,



Стенд компаній «Ультракон» і «Діагностичні прилади»



Стенд компанії «ТМ ВЕЛТЕК»

які працюють в області науково-прикладних досліджень, розробки, виготовлення та продажу широкого спектру обладнання, як власного виробництва, так і провідних світових виробників.

Захід Mining & Minerals Expo став єдиною в Україні виставкою, що представила обладнання та технології для гірничодобувної та вугільної промисловості. Відвідувачі мали змогу ознайомитися із дробарно-сортувальним обладнанням, буровими установками для відкритих гірничих робіт, обладнанням для будівництва тунелів, канатами для шахтних і підйомних установок, системами технічного моніторингу різноманітних виробничих процесів. Серед учасників виставки – ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК», відомий постачальник порошкових дротів для зварювання, наплавлення, напилення.

У рамках форуму також відбулися наступні заходи: VIII Міжнародний конгрес інженерів-енергетиків «Інноваційний шлях відновлення енергетики України», VII Київська нафтогазова конференція «Буріння. Інтенсифікація. Екологія та охорона праці», VI З'їзд спілки буровиків України, Тренінг Menlo Electric «Надійність та продуктивність: PV інвертори від Deuyeta Sungrow», II енергетичний форум-презентація «EcoflowEnergy Day 2023. Стаціонарні рішення для енергетичної незалежності бізнесу та приватного сектору».

Наступна виставка відбудеться 15–17 жовтня 2024 р.

За матеріалами пост-релізу ТОВ «МБЦ»,
<https://www.iec-expo.com.ua>



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

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



**Вітаємо нових індивідуальних членів
УТ НКТД:**

- **Голишева Андрія Леонідовича**
начальника відділу вібродіагностики ПрАТ «АК «Київводоканал» (технічний департамент)
- **Литвиненка Павла Леонідовича**
к.т.н., доцента кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Паздрій Ольгу Ярославівну**
асистентку кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Повшенка Олександра Анатолійовича**
асистента кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Трохіна Михайла Вікторовича**
к.т.н., доцента кафедри інформаційно-вимірвальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Чуніхіну Тетяну Віталіївну**
к.т.н., доцентку кафедри інформаційно-вимірвальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

**Підтвердили членство в УТ НКТД
на новий термін:**

- **Кісіль Тетяна Юріївна**
к.т.н., доцентка кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького
- **Богдан Галина Анатоліївна**
к.т.н., доцентка кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Галаган Роман Віталійович**
к.т.н., доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Куц Юрій Васильович**
д.т.н., професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Лисенко Юлія Юріївна**
к.т.н., доцентка кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

- **Момот Андрій Сергійович**
PhD, старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Муравйов Олександр Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Петрик Валентин Федорович**
к.т.н., доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Протасов Анатолій Георгійович**
д.п.н., професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Павловський Олексій Михайлович**
к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Паренюк Дмитро Володимирович**
PhD, асистент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Григоренко Світлана Миколаївна**
к.т.н., доцентка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Плеснецов Сергій Юрійович**
д.т.н., доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Плеснецов Юрій Олександрович**
к.т.н., професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Познякова Маргарита Євгенівна**
к.т.н., доцентка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Сіренко Микола Миколайович**
к.т.н., професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Смолін Юрій Олександрович**
к.т.н., професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»

Сучков Григорій Михайлович

д.т.н., професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Хомяк Юрій Валентинович**

к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Юданова Ніна Миколаївна**

Ст. викладачка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Балев Володимир Миколайович**

к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Борисенко Євген Анатолійович**

к.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Горкунов Борис Митрофанович**

д.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Григоренко Ігор Володимирович**

к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Дроздова Тетяна Василівна**

к.т.н., доцентка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Львов Сергій Геннадійович**

к.т.н., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Опришкіна Марина Ігорівна**

к.т.н., доцентка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Тверитникова Олена Євгенівна**

д.і.н., професорка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

▪ **Тополов Ігор Іванович**

доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «Харківський політехнічний інститут»

Знайомство з членами УТ НКТД

КАФЕДРА «КОМП'ЮТЕРНІ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ» НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Рівень промислового розвитку країни характеризується не тільки об'ємом виробництва і асортиментом продукції, яка випускається, але й показниками якості продукції, надійності та довговічності промислового обладнання. Невід'ємною складовою системи оцінки якості продукції є неруйнівний контроль (НК). З метою забезпечення різних галузей промисловості Слобожанщини фахівцями в даній сфері актуальним стало питання підготовки кваліфікованих спеціалістів з НК.

Після ретельного оформлення всієї необхідної документації група однодумців (вже колишніх співробітників кафедри інформаційно-вимірювальної техніки (ІВТ) факультету автоматики та приладобудування Харківського державного політехнічного університету) нарешті досягла своєї довгоочікуваної мети – 8 лютого 1995 р. був підписаний наказ ректора про створення кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» (ПМНК). Звичайно хотілося б відзначити цих вчених – «родоначальників» нашої кафедри: перший завідувач кафедри, д.т.н., професор Себко Вадим Пантелійович; перший заступник завідувача ка-

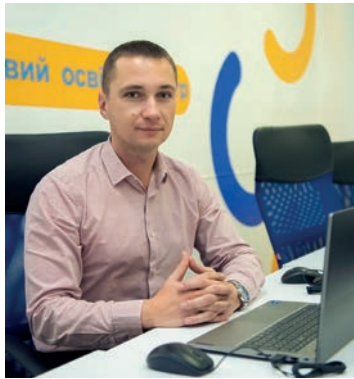
федри, к.т.н., доцент Горкунов Борис Митрофанович; к.т.н., доцент Сіренко Микола Миколайович. Дійсно, ці люди зробили величезний і гідний внесок в історію створення та роботи кафедри, заклали міцний фундамент знань, умінь, досвіду та глибокого професіоналізму в галузі неруйнівного контролю.

У 1995 р. на базі кафедри відкрилася спеціалізована вчена рада Д 64.050.09 на чолі з головою – професором В.П. Себко і вченим секретарем доцентом Б.М. Горкуновим.

З січня 2010 р. кафедру очолив д.т.н., професор Сучков Григорій Михайлович, який прийшов на кафедру у 2002 р. з Українського науково-дослідного державного інституту металів з величезним досвідом роботи в галузі неруйнівного контролю промислової продукції. Він з великою працьовитістю і завзятою наполегливістю занурився в науково-дослідницьку діяльність кафедри та важку викладацьку роботу. У 2005 р. Г.М. Сучков блискуче захистив докторську дисертацію в спеціалізованій вченій раді Д 64.050.09, а в 2008 р. йому було присвоєно вчене звання професора. Він вніс значний



Г.М. Сучков – завідувач кафедри з 2010 по 2021 рр.



Ю.В. Хомяк – завідувач кафедри з 2021 р.



На засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09

вклад в розвиток наукової діяльності кафедри та став науковим керівником багатьох її випускників. З 2012 р. Г.М. Сучков є членом правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД).

Розвиток методів контролю потребує постійного оновлення навчальних компонентів у відповідності до сучасних потреб роботодавців. Оновилася й назва кафедри. Враховуючи актуальні дослідницькі напрями, які в останні роки роз-

виваються на кафедрі, її нова назва – «Кафедра комп’ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики» (КРСКД).

З 2021 р. завідувачем кафедри КРСКД є к.т.н., доцент Хомяк Юрій Валентинович, який своєю активною діяльністю долучає молодих і перспективних співробітників до викладацької і наукової діяльності.

Науково-дослідна робота на кафедрі постійно розвивається, розширюються контакти на-



Викладачі і студенти кафедри комп’ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики



Під час нагородження лауреатів конкурсу УТ НКТД серед студентів на кращу дипломну роботу. На передньому плані зав. кафедрою ПМНК Г.М. Сучков і магістр кафедри М.В. Ананьїна



Студенти кафедри КРСКД – лауреати студентських олімпіад



Завідувач кафедри доц. Ю.В. Хомяк (другий ліворуч) зі студентами кафедри на промисловій виставці



Співробітники кафедри разом зі студентами заочної форми навчання



Випускники кафедри з доц. С.М. Григоренко під час вручення дипломів

укової і педагогічної діяльності, удосконалюється та модернізується навчальний процес, підвищується кваліфікація викладацького складу кафедри в області методів і засобів неруйнівного контролю, що дозволяє гідно передавати накопичений величезний досвід майбутнім поколінням молодих фахівців.

Зараз на кафедрі працює 12 викладачів, з них: 3 – доктори наук, 8 – кандидати наук. Викладачі кафедри є членами УТ НКТД.

Формування кадрового складу кафедри проводиться здебільшого за рахунок залучення кращих випускників кафедри: магістрів та аспірантів. Загалом понад 80% науково-педагогічних працівників кафедри є її випускниками, що дає можливість забезпечити єдність поколінь, передавання професійних знань та досвіду.

Співробітники кафедри є авторами наступних розробок: вихрострумове дефектоскопа ВД-ІГД, генератора зондуючих імпульсів, вимірвача залишкової намагніченості (ІОН-ІМ), ЕМА дефектоскопа для контролю виробів із сильно кородованою поверхнею введення ультразвуку, ЕМА дефектоскопа для виявлення внутрішніх і поверхневих дефектів металовиробів, мікропроцесорного вихрострумове дефектоскопів «МАЛЮК» і «МАЛЮК М», двопроцесорно-

го ультразвукового безконтактного товщиноміра, 4-х-канального автоматичного товщиноміра, що застосовуються в різних галузях народного господарства. У процесі їх створення активну участь беруть кращі студенти кафедри.

Матеріально-технічне забезпечення кафедри з часом вийшло на рівень, що відповідає міжнародним стандартам. Для проведення лекційних, практичних, лабораторних і семінарських занять у розпорядженні кафедри є низка учбових аудиторій, які обладнані комп'ютерами та мультимедійними системами.

Професійний рівень фахівців, підготовлених кафедрою, залишається традиційно високим. Наші випускники, як і раніше, є затребуваними та знаходять собі роботу на підприємствах і в організаціях Харкова та інших міст України і зарубіжжя. Більше того, істотна частина студентів ще під час навчання починає працювати за фахом і залишає університет вже сформованими фахівцями, що мають досвід практичної роботи. Випускники спеціалізації «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики» працюють на митниці, у лабораторіях і метрологічних службах заводів, у конструкторських організаціях, науково-дослідних інститутах та ін. організаціях і промислових підприємствах.

Сьогодні колектив кафедри налаштований на подальшу роботу з освоєння сучасних технологій проектування вимірвальних і діагностичних електронних систем, програмування вбудованих систем і прикладного програмного забезпечення, метрологічних операцій з вимірювання, контролю, перевірки, сертифікації, ефективну співпрацю з провідними підприємствами, українськими та зарубіжними профільними ВНЗ в галузі підготовки кваліфікованих фахівців.

*Л.В. Зайцева,
доцент кафедри КРСКД НТУ «ХПІ»*

САМОХІДНИЙ ШИРОКОЗАХВАТНИЙ МІНОШУКАЧ ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ СІЛЬГОСПЗЕМЕЛЬ

В.О. Троїцький, С.М. Шкарупа, А.І. Шушков

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Внаслідок російської агресії наразі наша держава є найбільш замінованою країною в світі. Вибухонебезпечні предмети забруднили територію України розміром приблизно з Флориду чи Уругвай. У Національній поліції України станом на зараз третю частину території країни вважають замінованою. До замінованих територій входять як деокуповані, так і ті, де поки ще знаходяться російські терористи. Після деокупації знадобиться багато часу та зусиль на розмінування та очищення сільськогосподарських земель. Через російську агресію аграрна галузь в Україні зазнала колосальних збитків. Це й зменшення посівних площ, і скорочення виробництва, і падіння експорту, а також ускладнена та дорога логістика.

Вибухівка вже завдала значних жертв. Від початку повномасштабного вторгнення росії в Україну ООН зафіксувала 298 загиблих серед цивільного населення від вибухових предметів, 22 з них – діти. Крім того, 632 цивільні особи зазнали поранень. Війна – це виклик, який постає перед країною в усіх сферах життєдіяльності. Руйнування житла та інфраструктури, негативний демографічний та економічний вплив, страшні екологічні наслідки – все це країні доведеться долати десятиліттями.

Усі ці проблеми можливо вирішити лише за допомогою різних пристроїв механізації пошуку мін. Дослідженню застосування засобів механізованого розмінування територій був присвячений брифінг Головного управління протимінної діяльності, цивільного захисту та екологічної безпеки Міністерства оборони України. Головна тема брифінгу – використання машин механізованого розмінування (ММР) закордонного виробництва, яких нині в Україні налічується понад 20 шт. Зараз силами безпеки та оборони України використовуються декілька типів ММР, таких як хорватська MV-4 та MV-10, словацька «Божена-5», швейцарська «Digger» і британська «Armtrac».

Усі ці ММР забезпечують підвищення рівня безпеки сапера та покращення результатів виконання заходів очищення територій. Наприклад, максимальна результативність сапера за добу сягає 100 м², а ММР за такий саме відрізок часу може пройти 3...5 тис. м². Усі зазначені ММР можуть керуватися дистанційно, що забезпечує максимальну безпеку роботи сапера.

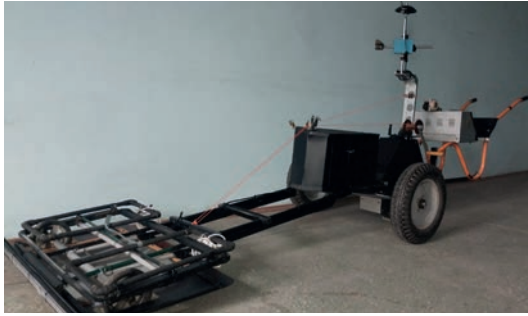
Разом з тим, застосування ММР є складним процесом, оскільки для досягнення якісного та ефективного розмінування необхідно враховувати багато

факторів: типи небезпек, рельєф, наявність рослинності та типи ґрунтів. Таким чином, найбільша ефективність застосування ММР досягається в поєднанні з різноманітними методами очищення територій, такими як застосування дронів і ручне розмінування.

У від. №4 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України проводяться роботи з розроблення самохідного широкозахватного міношукача. На відміну від ручного металошукування пропонується самохідний широкозахватний міношукач має такі переваги:

- зменшується вплив суб'єктивності оцінки та стомлюваності оператора, а в підсумку підвищується відсоток виявлення мін;
- вводиться візуальний аналіз поверхні як основа для пошуку, порівняльний аналіз трав'яного покриття. Виявлення слідів свіжого ґрунту – важлива інформаційна складова пошуку;
- за наявності негативних візуальної інформації чи електромагнітних даних автоматично блокується подальший рух міношукача;
- є можливість пересувати міношукач як вручну, так і за допомогою двох електродвигунів провідного мотоколеса з фрезою;
- оператор спостерігає за рівномірністю поверхні та допомагає долати перешкоди, забезпечує попередній візуальний пошук;
- відеокамера з освітлювачем на штанзі міношукача покращує аналіз поверхні;
- спрацьовує сигнал тривоги, якщо спостерігаються перешкоди або сліди установки мін;
- при виявленні індуктором у землі металу за допомогою ручного гострофокусного УЗ-шукача візуальним оглядом проводиться уточнення розмірів зони. При необхідності, за допомогою фрези мотоколеса знімається дерн, виконується хімічний аналіз випарів поверхні та ін. уточнення для прийняття рішень.

У листопаді 2023 р. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона відбулась технічна нарада за участі спеціалістів-експертів: М.М. Павлишина, д.т.н., професора факультету аерокосмічних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; В.І. Кравчука, д.т.н., професора, академіка Академії аграрних наук України, начальника департаменту Інституту біологічних культур; В.П. Житінського, інструктора Управління підготовки спеціалістів Міністерства оборони України. Головною темою наради були демонстрація, обговорення можливостей і перспектив практичного застосування розробленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України напівавтоматичного міношука-



Міношукач у робочому стані



Пульт керування міношукачем



Міношукач у стані для транспортування

ча (МШН). Окрім переваг, що описані вище, було відзначено його особливості, в порівнянні з аналогічними існуючими МШН:

- конструкція МШН збільшує безпеку оператора, який йде по вже перевіреній колії на відстані 4 м за індуктором;
 - швидкість агрегату 1,5...3 м/хв;
 - ширина смуги, що перевіряється, 1,5 м;
 - якщо оператор відпустив рукоятку МШН, то агрегат автоматично зупиняється;
 - розроблений МШН має силовий акумулятор на 64 А год, реверсний електропривід, освітлювач, відеокамеру, конвектор 12 В / 220 В, три незалежні працюючі прямокутні індуктори;
 - оператор має можливість заживити від конвектора будь-який допоміжний електроприлад.
- Використовуючи відеокамеру та освітлювач оператор спостерігає та порівнює стан рилі, де може зна-

ходитися міна або інші металеві небезпечні предмети. Оператор може прийняти рішення про зупинку за наявності ознак встановлення міни. При визначенні місця знаходження міни оператор фіксує GPS координати та передає їх саперам. МШН може рухатися за допомогою електроприводу з акумулятором, зусиль оператора або завдяки транспортному засобу.

Присутні експерти висловили свої думки щодо того, що розробка ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України є актуальною, має відчутне соціально-економічне значення та знайде застосування не тільки для пошуку мін, але й для оцінки агрохімічного стану сільськогосподарських земель (вимірювання щільності, хімічного забруднення). Прийнято рішення про співробітництво вищезазначених відомств щодо розмінування та очищення сільськогосподарських земель нашої країни.

Питання та відповіді

ЧИ МОЖНА КОРИСТУВАТИСЯ СКАСОВАНИМИ ГОСТ?

Законом України від 05.06.2014 р. № 1315-VII «Про стандартизацію» (далі – Закон), який набув чинності 03.01.2015 р., у національне законодавство України як держави-члена Світової організації торгівлі (далі – СОТ) імplementовано положення Угоди СОТ про технічні бар'єри в торгівлі, зокрема Кодексу добродійної практики з розроблення, прийняття та застосування стандартів і впроваджено міжнародні та європейські принципи стандартизації. Законодавством передбачено, що після прийняття національним органом стандартизації проекту національного стандарту, який розроблено відповідно до встановлених процедур, він стає національним стандартом, який застосовується безпосередньо чи шляхом посилання на нього в інших документах.

Якщо ГОСТ скасовано національним органом стандартизації, він вже не має статусу нормативного документу, а являє собою звичайний «текст». Але слід враховувати й те, що стандарт встановлює для загального та неодноразового використання правила, настанови або характеристики щодо діяльності чи її результатів, і спрямований на досягнення оптимального ступеня впорядко-

ваності в певній сфері. Тобто за умови добровільності застосування стандарту, але з метою мати будь-які інструкції, правила тощо, які впорядковують діяльність у той чи іншій сфері, може застосовуватися недіючий ГОСТ (національний стандарт), якщо на нього не передбачається робити посилання у відповідній сфері діяльності.

При цьому слід зазначити, що п. 2 розд. VI «Прикінцеві та перехідні положення» Закону визначено, що міждержавні стандарти (ГОСТ), що діяли на момент набрання чинності Угодою про проведення узгодженої політики в галузі стандартизації, метрології і сертифікації від 13 березня 1992 р., застосовуються як національні стандарти до їх заміни на національні стандарти чи скасування в Україні.

Враховуючи вищезазначене, можна сказати, що **виробники можуть застосовувати скасовані ГОСТ** у своїй господарській діяльності та для своїх професійних потреб як звичайні інструкції, правила тощо, **але не можуть робити посилання на такі ГОСТ**, тому що вони не є чинними та не визнані національними органом стандартизації.

Водночас виробник має усвідомлювати переваги застосування чинного національного стандарту, який розроблено відповідним технічним комітетом стандартизації з дотриманням процедур стандартизації, який відповідає законодавству, до

якого вчасно внесені зміни, який адаптовано до сучасних досягнень науки і техніки, вимог міжнародних, регіональних стандартів та сприяє підвищенню конкурентоспроможності продукції.

Джерело: www.me.gov.ua

У МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ ПРАЦЮЄ САЙТ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ USNDT.COM.UA

На сайті розміщуються інформаційні матеріали, що стосуються галузі НКТД (новини, публікації, конференції, семінари, наради, конкурси, архівні фотоматеріали і т. ін.). Тут можна ознайомитися з історією створення, метою, напрямками діяльності та структурою товариства, актуальним списком членів товариства, складом правління, дізнатися про процедуру вступу та пільги для членів товариства.

Окремий розділ сайту присвячено сертифікації персоналу. У світі сертифікація персоналу органами із сертифікації національних товариств з НК є найбільш поширеною та авторитетною. В Україні таким органом є Центр сертифікації при

УТ НКТД. Завітавши до розділу «Сертифікація» можна ознайомитися з системою та процедурою сертифікації персоналу. Переглянувши відповідні реєстри можна перевірити актуальність і дійсність виданих сертифікатів. Ця можливість є корисною для потенційних роботодавців при прийомі на роботу спеціалістів з НК. Як свідчить практика, трапляються випадки, коли кандидати на працевлаштування надають не тільки анульовані, але й взагалі підроблені сертифікати.

У співпраці з технічним комітетом стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика і неруйнівний контроль» ведеться розділ «Стандартизація», де можна переглянути актуальні переліки національних і міжнародних стандартів з НК, накази Національного органу стандартизації щодо прийняття та втрати чинності профільних стандартів та інші повідомлення щодо стандартизації в галузі НК.

Про процедуру оцінки технічної компетентності лабораторій НКТД йдеться в розділі «Атестація лабораторій». УТ НКТД організовує систему атестації зазначених лабораторій у повній відповідності зі стандартами ДСТУ ISO/IEC 17025; ISO/IEC 17020; ДСТУ-Н ПМГ 15:2007.

Великою популярністю серед відвідувачів сайту користується розділ «Публікації», де розміщено інформацію про українські та зарубіжні провідні друковані видання в галузі НКТД. З дозволу автора на сайті розміщено посилання на електронні версії майже всіх виданих з 2006 р. учбових посібників і монографій проф. В.О. Троїцького (голови УТ НКТД, керівника відділу з НК ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України) за різними методами НК. Як свідчить статистика, тільки за три тижні в



Стартова сторінка сайту usndt.com.ua

Downloads (Top 10) - Полный список

Downloads: 78

Документ	Хиты
/documents/Troitskiy_publications/Troitskiy_NDT.pdf	96
/documents/Troitskiy_publications/Troitskiy_RT.pdf	66
/documents/Troitskiy_publications/Troitskiy_UT(ND).pdf	60
/documents/Troitskiy_publications/Troitskiy_VT(2009).pdf	58
/documents/Troitskiy_publications/Troitskiy_UT.pdf	50
/documents/Troitskiy_publications/Troitskiy_ET.pdf	45
/documents/Troitskiy_publications/Troitskiy_VT(2012).pdf	29
/documents/Troitskiy_publications/Troitskiy_Defectoscopy_XXI(201...	15
/documents/Sertifik_Reestr_ISO9712.xls	14
/documents/Sertifik_Certificate%20and%20area%20of%20accreditatio...	12

Скріншот статистики щодо завантаження документів з сайту usndt.com.ua

Locales (Top 25) - Full list				
Locales		Pages	Hits	Bandwidth
United States	us	388	1,073	39.94 MB
Ukraine	ua	300	6,174	479.49 MB
China	cn	187	480	10.19 MB
Moldova	md	57	57	1.90 MB
Germany	de	25	121	4.83 MB
Georgia	ge	16	225	9.45 MB
Great Britain	gb	15	142	25.13 MB
France	fr	13	13	404.64 KB
Canada	ca	13	13	328.17 KB
Poland	pl	10	166	31.93 MB

Скріншот відвідувань сайту usndt.com.ua по країнах

жовтні 2023 р. користувачі завантажили ці книги на свої пристрої біля 200 разів.

У топ-10 зарубіжних країн, з яких здійснюється вхід на сайт, входять США, Китай, Молдова, Німеччина, Грузія, Велика Британія, Канада, Франція, Польща.

Запрошуємо членів Товариства доєднатися до участі в роботі сайту та надсилати для публікації на його сторінках цікаві та корисні інформаційні

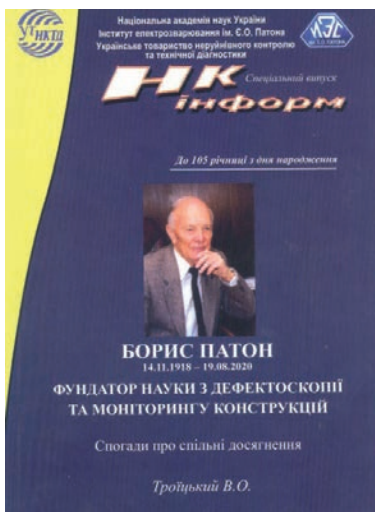
матеріали з НК (наприклад, про історію створення та поточну діяльність підрозділу НК, де працює спеціаліст; заходи з НК, у яких спеціаліст брав участь або проведення яких планується в регіоні і т. ін.). Якщо ці матеріали не носитимуть комерційного характеру, їх буде опубліковано безкоштовно.

Українське товариство НКТД
e-mail: usndt@ukr.net, т. (044) 205-22-49

СПОГАДИ ПРО ВИДАТНОГО ВЧЕНОГО – БОРИСА ЄВГЕНОВИЧА ПАТОНА

Спеціальний випуск друкованого видання УТ НКТД «НК-Інформ» «**Борис Патон – фундатор науки з дефектоскопії та моніторингу конструкцій. Спогади про спільні досягнення**» присвячено 105-й річниці від дня народження Бориса Євгеновича Патона (1918–2020 рр.) – академіка, президента Національної академії наук України, директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, його внеску у формування та розвиток науки дефектоскопії та моніторингу конструкцій і споруд. Автор – проф. В.О. Троїцький. Видавець – ТОВ «НВП «Інтерсервіс» (2023 р.).

татами своїми спогадами про багаторічну співпрацю з Б.Є. Патоним – фундатором нового на той час наукового напрямку «Технічна діагностика та неруйнівний контроль». У другій частині йдеться про основні напрямки робіт відділу неруйнівних методів контролю ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України з дефектоскопії та моніторингу стану зварних конструкцій і споруд. Багато з цих розробок починалося за керівництва Б.Є. Патона.



Публікація складається з двох частин. У першій автор (проф. В.О. Троїцький) ділиться з чи-

У воєнний час лабораторії від. № 4 оперативно виконують усі замовлення, які надходять від організацій, що мають відношення до ЗСУ:

– рентген-телевізійний контроль (РТК) якості зварних швів зразків ракет, снарядів, мін на бездефектне заповнення їх вибуховими речовинами;

- НК польових і стаціонарних резервуарів із паливно-мастильними матеріалами та з'ясування причин непридатності до вживання ґрунтової води;
- визначення працездатності стволів гармат, мінометів та ін. засобів, в тому яких призводить до їх руйнування, вимірювання товщин і залишкових напружень та оцінка можливості їх подальшого використання;
- оцінка якості бронепластин методом РТК, які відповідають ваговим, відстрільним та ін. нормативам, але їх структура не дає 100 % захисту;
- участь у вдосконаленні технології виготовлення титанових і сталевих багат шарових стволів мінометів, їх оцінки з використанням засобів НК у даній технології.

Описано три типи конструкцій широкозахватних міношукачів з електроприводами з віддаленим знаходженням оператора (на 3...4 м) від зони пошуку мін. Розроблено рухомі прилади для пошуку постраждалих під завалами зруйнованих житлових будинків для об'єктивної оцінки завданої шкоди. Запропоновано алгоритми руху дронів. Першій – задля запобігання ППО противника, другий – для виявлення мінних полів. Наведено інформацію про інші розробки ефективних засобів НК, які можуть бути використані у воєнний час.

Викладені пропозиції можуть бути корисними для конструкторських бюро, що співпрацюють з ЗСУ, для експертно-технічних центрів та кафедр МОУ.

З розробками можна ознайомитися у від. №4 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ, вул. Казимира Малевича, 23, корп. № 6, к. 511; тел. (044) 205-22-15, 200-80-57).

*Приймаються замовлення на отримання цієї цікавої публікації:
e-mail: ndt@paton.kiev.ua, larimart@ukr.net, тел. (044) 205-20-63*

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

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



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

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

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

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

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

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

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

**Відгук Голови правління компанії «AED Polska» (м. Варшава)
пана Andrzej Kaźmierczak про книги «Моніторинг стану конструцій» та «Борис
Патон – фундатор науки з дефектоскопії та моніторингу конструцій.
Спогади про спільні досягнення»**

«Шановний пане професоре,

Щиро дякую за пересилку книг – гарних, професійних видань з гарними присвятами від автора.

У Польщі нам не вистачає таких видатних спеціалістів, експертів і публікацій у галузі досліджень з НК. Є різні невеликі дослідження політехнічних університетів, але вони не приносять нічого нового, а лише підтверджують попередні публікації та виступи на міжнародних наукових конференціях.

Маю 30 років досвіду видання професійних книг на польському ринку (правознавство, психологія, терапія, енциклопедії та ін.). Буду радий співпраці у сфері публікацій ваших та інших не менш видатних спеціалістів із вашого середовища та вчених Інституту Патона в області випробувань з неруйнівного контролю та їх практичного застосування в області оцінки технічного стану відповідальних установок і технічних пристроїв.

У мої плани протягом понад 15 років входила ідея створення спеціального Навчального центру для спеціалістів з НК у Польщі. Робоча назва ЦІТАМ – Центр інноваційних технологій аудиту та моніторингу. На нього великий попит. Я розробив концепцію, програму, локацію та можливість фінансової підтримки Європейського Союзу. Бракує компетентних спеціалістів, викладачів і практиків у сфері НК, які могли б підготувати персонал не лише для Польщі, а й для інших країн ЄС.

Зараз я прочитаю, проаналізую та перекладу отриману від вас публікацію.

Був у відрядженні в Німеччині, Швейцарії та на промислових підприємствах Польщі, а лише два дні тому отримав вашу посилку – вона чекала на мене.

Ще раз дякую за публікацію, повторюю своє прохання та пропозицію про співпрацю. Насамперед бажаю Вам і Вашим найближчим родинам здоров'я та миру у цей важкий для України час.

*З глибокою повагою,
Andrzej Kaźmierczak»*

«Шановний пане Анджесею,

Щиро дякую за теплі слова і бажання співпрацювати з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, в якому я працюю керівником відділу неруйнівного контролю вже більше 50 років.

Ми маємо багатий досвід у галузі створення технологій неруйнівного контролю, навчання та атестації персоналу практично по всіх методах НК. Спеціалісти неруйнівного контролю з нашими сертифікатами працюють у багатьох країнах.

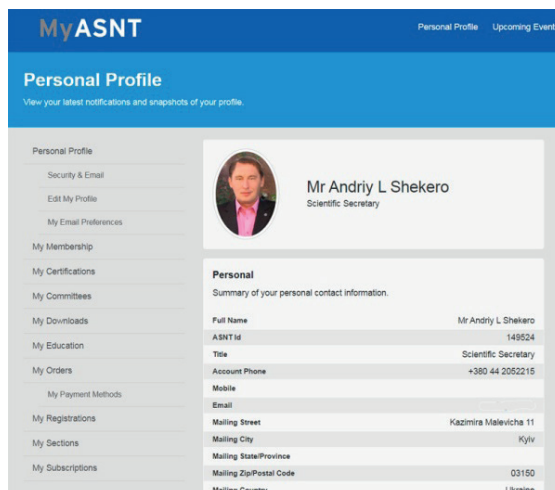
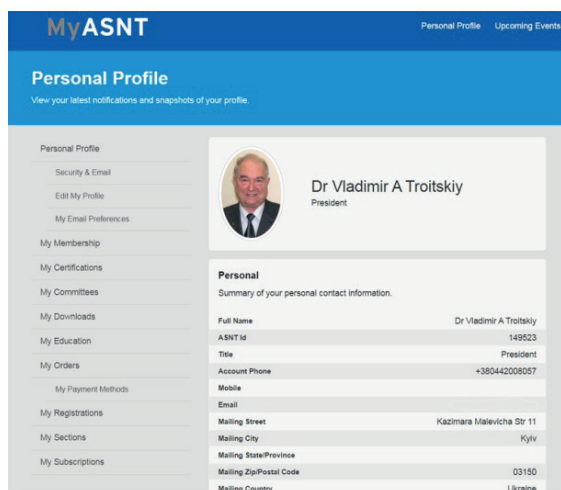
Враховуючи Ваші наміри створити навчальний центр в Польщі, пропоную зробити переклад на польську і англійську мови моїх учбових посібників з різних методів неруйнівного контролю.

*З повагою, щиро Ваш
проф. Володимир Троїцький»*

Новини одним рядком

Відповідно до Договору про професійне співробітництво між УТ НКТД і Американським товариством з НК (ASNT) (п. В.3) на новий трирічний

період продовжено сертифікати членства в ASNT для голови Товариства проф. В.О. Троїцького та вченого секретаря Товариства А.Л. Шекеро.



У свою чергу, сертифікати членства в УТ НКТД отримали керівники ASNT – президент Dr. John Chen і виконавчий директор Neal J. Couture.

Також, згідно з п. С.2 цього договору УТ НКТД на регулярній основі надає для публікації в науко-

во-технічному журналі «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» найбільш цікаві для широкого дефектоскопічного загалу статті із всесвітньо відомого професійного журналу «Materials Evaluation» (оцінка матеріалів), що видається ASNT.

КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ І ВИСТАВОК З НКТД

23–26 квітня 2024	Німеччина, Штутгарт	36 th Control – Trade Fair for Quality Assurance (Торговий ярмарок із забезпечення якості)	P.E. Schall GmbH & Co. KG
27–31 травня 2024	Південна Корея, Інчхон	20 th World Conference on Non-Destructive Testing (20 th WCNDT) (XX Всесвітня конференція з НК)	Korean Society for NDT
10–13 червня 2024	Німеччина, Потсдам	11 th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024) (Європейський семінар з моніторингу структурного здоров'я)	German Society for NDT
11–13 червня 2024	Канада, Оттава	NDT in Canada 2024 (Щорічна конференція Канадського інституту НК)	Canadian Institute for NDE
15–18 жовтня 2024	Китай, Пекін	The 3 rd World Congress on Condition Monitoring – WCCM 2023 (III Всесвітній конгрес з моніторингу технічного стану)	Chinese Society for NDT and China SEI Institute
11–14 листопада 2024	США, Лас Вегас	ASNT 2024 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
9–12 червня 2025	Канада, Онтаріо	Pan-American Conference for Nondestructive Testing (VIII PANNDT) (Панамериканська конференція з неруйнівного контролю)	Canadian Institute for NDE
6–9 жовтня 2025	США, Лас Вегас	ASNT 2025 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
11–14 травня 2026	США, Гаваї	17 th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (XVII Азіатсько-Тихоокеанська конференція з неруйнівного контролю)	American Society for NDT
15–19 червня 2026	Італія, Верона	The 14 th European Conference on Non-Destructive Testing (14 th ECNDT) (XIV Європейська конференція з НК)	Italian Society for NDT





Центр сертифікації при Українському товаристві
неруйнівного контролю та технічної діагностики

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

ЗАПРОШУЮТЬ СПЕЦІАЛІСТІВ

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

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

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

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

в 12 виробничих секторах:

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

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

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

Три кроки до сертифікату:

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

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