

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.)

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

В.М. Учанін (заст. гол. ред.)

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

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

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар)

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

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.Л. Казакевич

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

О.М. Карпаш, П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

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

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

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

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХПІ», м. Харків;

М.Г. Чаусов

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко, Міжнародна

Асоціація «Зварювання», м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

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

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

МОН України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2023

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія/електронна версія: 1120 грн.

за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів

видавець журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

Лауреати премій НАН України імені видатних учених3

Інтерв'ю з директором ТОВ НВФ «Ультракон» Ігорем Павлієм...5

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

УЧАНІН В.М., ЛУЦЕНКО Г.Г., ОПАНАСЕНКО А.В.

Автоматизовані системи вихрострумовеого контролю з накладними перетворювачами подвійного диференціювання....7

ЮЗЕФОВИЧ Р.М., ЯВОРСЬКИЙ І.М., ЛИЧАК О.В., ГНАТИШИН В.В., ВАРИВОДА М.З. Виділення та аналіз детермінованої складової вібрацій методом найменших квадратів.....17

ЛОБАНОВ Л.М., КНИШ В.В., ПАЦИН М.О., КОТ В.Г., МІХОДУЙ О.Л., ПЕКАР Є.Д., LUUYI HUANG, АЛЬОШИН А.О. Неруйнівне визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях на базі поєднання ультразвукового методу та електронної спекл-інтерферометрії.....22

ПЛЕСНЕЦОВ С.Ю., СУЧКОВ Г.М., МИГУЩЕНКО Р.П., КРОПАЧЕК О.Ю., ПЛЕСНЕЦОВ Ю.О., ДОНЧЕНКО А.В. Застосування ультразвукових пакетних імпульсів хвиль Релея для контролю твердості поверхнево загартованих металів28

СТЕШЕНКО Я.В., МОМОТ А.С., ПРОТАСОВ А.Г., МУРАВЙОВ О.В. Автоматизація процесу сегментації зображень дефектів металевих поверхонь з використанням нейронної мережі U-Net34

ЮРЖЕНКО М.В., КОВАЛЬЧУК М.О., КОНДРАТЕНКО В.Ю., ДЕМЧЕНКО В.Л., ГУСАКОВА К.Г., ВЕРБОВСЬКИЙ В.С., ЖУК Г.В., КОСТОГРИЗ К.П., ГОЦИК І.А. Вплив газових сумішей водню з метаном на фізичну та хімічну структуру поліетиленових труб діючих газорозподільних мереж України.....41

ІНФОРМАЦІЯ

В.М. Учаніну — 75.....47

Новини Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики.....48

Видання журналу підтримують:

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

I.Yu. Romanova (execut. secretary)

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

Krzysztof Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland;

Janez Grum

University of Ljubljana, Slovenia;

M.L. Kazakevich

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of NAS

of Ukraine, Kyiv;

O.M. Karpash, P.M. Raiter

Ivano-Frankivsk NTU of Oil and Gas, Ukraine;

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

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

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

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine;

Adriana Savin

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

V.O. Storozhenko

Kharkiv NU of Radio Electronics, Ukraine;

H.M. Suchkov

NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;

M.G. Chausov

NU of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv.

Executive Director – O.T. Zelnichenko, International

Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,

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

International Association «Welding» (Publisher)

Address

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

03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.

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

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved

by the Ministry of Education and Science of Ukraine

for the publication of works of applicants for academic

degrees in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration

of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2023

Subscription index 74475.

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

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

air postage and packaging included.

\$104, subscriptions for the electronic version.

Publisher is not responsible for the content of the

promotional material.

CONTENT

Laureates of the National academy of sciences of Ukraine
awards named after outstanding scientists 3

Interview with I. Pavliy, Director of Ultracon Company 5

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

UCHANIN V.M., LUTCENKO G.G., OPANASENKO A.V.
Automated eddy current inspection systems with surface
probe of double differential type 7

*YUZEFOVYCH R.M., JAVORSKYJ I.M., LYCHAK O.V.,
GNATYSHYN V.V., VARYVODA M.Z.* Selection and anal-
ysis of the deterministic component of vibrations by the least
squares method 17

*LOBANOV L.M., KNYSH V.V., PASHCHIN M.O., KOT V.G.,
MIKHODUI O.L., PEKAR Ye.D., LUYI HUANG, ALYOSHYN
A.O.* Nondestructive evaluation of residual stresses in welded
joints on the base of a combination of ultrasonic testing and
speckle-interferometry 22

*PLIESNETSOV S.Yu., SUCHKOV G.M., MYGUSH-
CHENKO R.P., KROPACHEK O.Yu., PLIESNETSOV Yu.O.,
DONCHENKO A.V.* Application of ultrasonic packet pulses of
Raleigh waves for testing the hardness of surface-hardened metals... 28

*STESHENKO Y.V., MOMOT A.S., PROTASOV A.G.,
MURAVIOV O.V.* Automation of the process of segmentation
of images of metal surface defects using the neural network U-Net 34

*IURZHENKO M.V., KOVALCHUK M.O., KONDRATENKO V.Yu.,
DEMCHENKO V.L., GUSAKOVA K.G., VERBOVSKYI V.S.,
ZHUK G.V., KOSTOGRYZ K.P., GOTSYK I.A.* Influence
of hydrogen-methane gas mixtures on the physical and
chemical structure of polyethylene pipes of the operating
gas-distribution networks of Ukraine 41

INFORMATION

V.M. Uchanin is 75 47

News of the Ukrainian society for non-destructive testing 48

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

ЛАУРЕАТИ ПРЕМІЙ НАН УКРАЇНИ ІМЕНІ ВИДАТНИХ УЧЕНИХ

27 квітня 2023 р. під час чергової сесії Загальних зборів Національної академії наук України було урочисто вручено *Золоті медалі ім. Б.Є. Патона НАН України*. Ця висока нагорода була присуджена вперше. Академія заснувала її 2020 р. задля увічнення пам'яті академіка Бориса Патона і присуджує за видатні досягнення у створенні інноваційних науково-технічних розробок, які знайшли широке практичне використання. За результатами конкурсу 2022 р. нагороду було присуджено:

– заступнику директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України академіку НАН України Леоніду Лобанову за створення технологій бездеформаційного зварювання виробів ракетно-космічної техніки та розроблення й впровадження методів лазерної

інтерферометрії для оцінювання якості зварних з'єднань;

– Генеральному директору Державного підприємства «Державне Київське конструкторське бюро «Луч» члену-кореспонденту НАН України Олегу Коростельову – за розроблення та організацію серійного виробництва новітніх зразків озброєння і військової техніки.

Також під час сесії Загальних зборів президент НАН України академік Анатолій Загородній вручив дипломи лауреатам премій імені видатних учених України за підсумками конкурсу 2022 р.

Премію імені Євгена Оскарівича Патона – нагороду Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України за видатні наукові роботи в галузі створення нових металевих матеріалів і методів їх обробки – за цикл праць



Під час сесії Загальних зборів НАН України 27 квітня 2023 р.



Президент НАН України академік Анатолій Загородній поздоровляє Леоніда Лобанова (фото ліворуч) та Олега Коростельова (фото праворуч) з високими нагородами Національної академії наук України

«Фізичні процеси при зварюванні та обробці матеріалів» отримав директор Інституту електровзварювання ім. Є.О. Патона академік Ігор Кривцун.

Премію імені Олега Костянтиновича Антонова



Нагороду отримує академік НАН України Ігор Кривцун

за видатні досягнення в галузі технічної механіки та літакобудування – за роботу «Удосконалення методів проектування та дослідження ефективних високонавантажених газових турбін двигунів літальних апаратів» отримали:

– керівник групи Конструкторського науково-дослідницького комплексу ДП «Івченко-Прогрес» ДК «Укроборонпром» кандидат технічних наук Сергій Хомилев;

– керівник бригади Конструкторського науково-дослідницького комплексу ДП «Івченко-Прогрес» ДК «Укроборонпром» Сергій Різник;

– завідувач відділу Інституту технічної теплофізики НАН України академік НАН України Артем Халатов.

Премію імені Георгія Степановича Писаренка

за видатні наукові роботи в галузі міцності матеріалів і конструкцій – за серію праць «Обчислювальні підходи та нелінійні моделі оцінки міцності та прогнозу надійності композитних та конструктивно складних елементів машинобудівних конструкцій» отримали:

– директор Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України член-кореспондент НАН України Анатолій Зіньковський (1949–2022);

– професор кафедри Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» доктор технічних наук Геннадій Львов;

– директор Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» доктор технічних наук Олексій Ларін.

Премію імені Івана Павловича Пулюя за видатні роботи в галузі прикладної фізики – за встановлення механізму утворення об'ємного нанокристалічного титану та отримання його зразків отримали:

– старший науковий співробітник Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України кандидат фізико-математичних наук Владислав Москаленко;

– науковий співробітник Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України кандидат фізико-математичних наук Олександр Смірнов;

– молодший науковий співробітник Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України кандидат фізико-математичних наук Юлія Погрібна.

Премію імені Георгія Володимировича Карпенка за видатні наукові роботи в галузі фізико-хімічної механіки матеріалів і матеріалознавства – за цикл праць «Методологічні основи діагностування корозійно-механічного руйнування елементів конструкцій» отримали:

– директор Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України академік НАН України Зіновій Назарчук;

– заступник директора з наукової роботи Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України член-кореспондент НАН України Валентин Скальський;

– провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України доктор технічних наук Олександра Дацишин.



Нагороду отримує академік НАН України Зіновій Назарчук

Щиро вітаємо лауреатів премій НАН України та бажаємо міцного здоров'я, творчої наснаги і подальших творчих успіхів на благо нашої науки!

За матеріалами сайту НАН України
<https://www.nas.gov.ua>

ІНТЕРВ'Ю З ДИРЕКТОРОМ ТОВ НВФ «УЛЬТРАКОН» ІГОРЕМ ПАВЛІЄМ



Сьогодні гостем журналу є Ігор В'ячеславович Павлій – директор Науково-виробничої фірми «Ультракон». Вже понад 30 років фірма поставляє на підприємства України сучасні технології, обладнання, прилади та матеріали для технічного контролю та діагностики. Ігор Павлій відповів редакції журналу на ряд запитань.

Якими на сьогодні є основні напрямки роботи НВФ «Ультракон»?

ТОВ НВФ «Ультракон» було засновано у 1992 р. Метою створення компанії було кваліфіковане забезпечення підприємств України сучасними приладами та засобами неруйнівного контролю та технічної діагностики. Спочатку ми постачали прилади інших виробників, але, починаючи з 1996 р., з'явилися власні розробки. У 2002 р. компанія зосередилася на розробці та виготовленні власних приладів. На сьогодні ТОВ НВФ «Ультракон» розробляє та виготовляє прилади для:

- ультразвукової та вихрострумової дефектоскопії;
- ультразвукової товщинометрії;
- динамічного та ультразвукового (контактно-імпедансного) вимірювання твердості;
- контролю якості покриттів (дефектоскопи та товщиноміри) ;
- різноманітного оснащення для цих приладів.

Прилади нашого виробництва мають достатньо стабільну репутацію в споживачів, що дозволяє вже більше 30-ти років високо тримати марку нашої компанії.

НВФ «Ультракон» є однією з небагатьох компаній в Україні, яка реалізує власні розробки. Як Вам вдається конкурувати з обладнанням, яке пропонують відомі міжнародні бренди?

Вартість наших приладів є значно нижчою за прилади американських та європейських компаній – лідерів ринку. Але при цьому ми намагаємось не втрачати у технічних можливостях та якісних властивостях наших приладів. Інша справа – виробники з Китаю. При досить привабливих цінах вони не завжди спроможні забезпечити належну якість. До того ж є проблеми зі строками доставки та можливістю ремонту та сервісу. Декілька українських компаній виробляють аналогічну техніку. Ця конкуренція більше стимулює робити щось нове, оригінальне, шукати нові можливості у суміжних галузях економіки.

У чому, на Вашу думку, переваги Вашої компанії перед іншими учасниками ринку засобів НК та чому замовники вибирають саме НВФ «Ультракон»?

Ми називаємо себе Науково-виробничою фірмою. Тому ми намагаємось пропонувати не прилад, а рішення проблеми, яка постала перед Замовником. Ми можемо запропонувати апаратуру для вирішення проблеми, технологію, за необхідністю провести навчання персоналу. Небагато фірм в Україні можуть провести подібний комплекс робіт.

Чи маєте Ви постійних багаторічних замовників і з ким із них Ви плідно співпрацюєте?

Таких фірм дуже багато. За 30 років роботи прилади під маркою «Ультракон» можна знайти майже на кожному промисловому підприємстві України. Люди цінують добре ставлення, оперативне реагування на запит, швидкий та доброзичливий сервіс. Тому до нас звертаються знову і знову.

З якими труднощами в роботі Ви стикаєтесь і як шукаєте вихід? Як компанія працює під час війни?

За багато років склалася певна система постачання комплектуючих, розробки та виготовлення вузлів приладів. Пандемія коронавірусу, а потім війна майже зруйнувала можливості з закупівлі та постачання комплектуючих. Терміни поставки можуть досягати 10...12 місяців після попередньої оплати. А це призводить до збільшення строків виробництва, не кажучи про шалену нестачу обігових коштів. Але ми



Все тільки починається – В.І. Павлій з синами Ігорем та Олександром



Привітання з 10-ти річним ювілеєм компанії «Ультракон» від О.Ю. Духовського (ТОВ «Інторн СЕТ») під час конференції в ІЕЗ ім. Є.О. Патона



Під час конференції з НК, Ялта, 2013 р.



Демонстрація можливостей приладів виробництва компанії «Ультракон», «АЗОВСТАЛЬ», 2007 р.

продовжуємо працювати. Як можемо, допомагаємо країні захищатися, жити, працювати та перемагати.

У яких напрямках Ви плануєте розширювати свою діяльність?

Питання на сьогодні стоїть не в розширенні, а в збереженні можливості виготовляти прилади. Після Перемоги потреба в якісному обладнанні для відновлення країни буде високою. Наша мета – швидко та якісно задовольнити цю потребу. Потім будемо думати про розширення.

За якими технологіями НК, на Вашу думку, майбутнє?

На мою думку, розвиток технологій НК – за підвищенням інформативності результатів контролю та зменшенням впливу людського фактору



Під час виставки «Tube and Wire», Дюссельдорф, 2018 р.

на результати контролю. Використання фазованих технологій в ультразвуковому контролі надає значно більше інформації, ніж класичні методи УЗК. Аналогічна ситуація і з використанням цифрової радіографії. Але сучасні методи контролю потребують значно більшої кваліфікації персоналу та значних фінансових витрат на придбання та обслуговування обладнання. Тому я вважаю, що ручні прилади ще не вичерпали своїх можливостей та мають потенціал для розвитку. У цьому напрямку ми і плануємо працювати.

Редакція журналу дуже вдячна І.В. Павлію за інтерв'ю та бажає йому та всім співробітникам НВФ «Ультракон» успіхів у роботі, творчого натхнення та Перемоги.

<https://ultracon.com.ua>

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ З НАКЛАДНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ПОДВІЙНОГО ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ

В.М. Учанін¹, Г.Г. Луценко², А.В. Опанасенко²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5.
E-mail: vuchanin@gmail.com

²Український НДІ неруйнівного контролю. 04070, м. Київ, вул. Набережно-Лугова, 8. E-mail: office@ndt.com.ua

Розглянуто перспективи та стан проблеми створення автоматизованих систем неруйнівного контролю. Зазначено формування тенденції створення адаптивних автоматизованих систем для комплексного контролю, побудованих на застосуванні різних фізичних принципів для отримання синергетичного ефекту. Проаналізовано чинники, що впливають на варіативність сигналів вихрострумів перетворювачів під час ручного та автоматизованого вихрострумівого контролю. Зазначено переваги селективних перетворювачів подвійного диференціювання для створення автоматизованих систем. Представлено особливості побудови та характеристики розроблених в Україні багатоканальних автоматизованих систем із застосуванням вихрострумівого методу, зокрема: роботизована система вихрострумівого контролю для виявлення та ідентифікації експлуатаційних дефектів труб печей вторинного риформінгу; вихрострумівий тракт багатоканальної системи комплексного контролю залізничних осей під час їх виробництва; автоматизована система комплексного контролю колісних пар в умовах ремонтних підприємств; вихрострумівий блок системи комплексного контролю залізничних рейок під час їх виробництва. Бібліогр. 30, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: автоматизована система, комплексний неруйнівний контроль, вихрострумівий дефектоскопія, вихрострумівий перетворювачі подвійного диференціювання

Вступ. Перебудова промисловості в рамках 4-ї промислової революції призводить до формування нових підходів у неруйнівному контролі (НК) під аббревіатурою NDE 4.0 (Non-destructive Evaluation 4.0), де питання автоматизації контрольних операцій (у тому числі з використанням роботів) займають чільне місце [1, 2]. Під автоматизацією будемо розуміти сукупність технічних і програмних засобів, що забезпечують проведення НК без прямої участі людини. Без часткової або повної автоматизації неможливо забезпечити великі об'єми НК у багатьох галузях промисловості. Автоматизований НК застосовують не тільки під час виробництва, де найпростіше забезпечити контроль виробів простої форми у вигляді тіл обертання (труб, прутків, дротів, кульок тощо), що вже давно можна вважати звичайним явищем. Цей контроль під час експлуатації виробів створює унікальні можливості НК без участі людини у небезпечних і шкідливих для здоров'я середовищах [3, 4]. На перших етапах розвитку НК запроваджувались переважно методи ручного НК, коли всі процедури від підготовки апаратури та сканування поверхні об'єкта контролю (ОК) до прийняття рішення про якість чи дефектність виробу виконував оператор (контролер, дефектоскопіст). Такий підхід призводив до суттєвого обмеження надійності та достовірності контролю через залежність отриманих результатів від кваліфікації

оператора. Щоб позбутися впливу цього чинника, впроваджувались жорсткі вимоги щодо навчання та сертифікації персоналу за методами НК і виробничими секторами, акредитації лабораторій та верифікації процедур НК. Для реалізації цих вимог в Україні зокрема діє стандарт ДСТУ EN ISO 9712 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю», який повністю відповідає міжнародним нормативним документам. Тому найважливішим позитивним ефектом від впровадження автоматизованого НК слід вважати підвищення його достовірності. У той же час у науковій літературі з'явилися застереження щодо можливих ризиків і виробничих втрат, що можуть супроводжувати автоматичний НК через його невідповідне використання та розповсюджену (і не завжди обґрунтовану) довіру щодо його надійності [5, 6].

Іншим за значенням ефектом автоматизації можна вважати збільшення продуктивності НК, що особливо важливо в умовах неперервного виробництва. Зазначимо, що автоматизація НК не знижує значення оператора або інженера, що приймає рішення про якість виробу або надійність конструкції. Впровадження автоматизованих систем НК вимагає від них знань вищого рівня, необхідних для визначення бракувальних критеріїв, внесення змін в алгоритм контролю виробів залежно від нормативних документів (стандартів), що відповідають вимогам конкретного замовника тощо.

Метою цієї роботи є аналіз особливостей автоматизації вихрострумowego (ВС) контролю та презентація вітчизняних автоматизованих систем (АС) вихрострумowego контролю з накладними селективними вихрострумовими перетворювачами (ВСП) подвійного диференціювання.

Стан проблеми. Окрема методологія створення автоматизованих систем НК (АСНК) досі ще не сформована. Тому на даному етапі логічним кроком є використання методологічних засад і підходів, напрацьованих щодо інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які є достатньо розвинутими [7–9], а також брати до уваги існуючі роботи з загальної теорії автоматизації [10–12]. При цьому необхідно зважати на особливості функціонування конкретного методу НК. Зазначимо також, що призначенням систем контролю (у тому числі НК) на відміну від ІВС є визначення відповідності технічного стану ОК нормативним вимогам та реєстрація відхилень параметрів, що характеризують технічний стан ОК, визначеним нормам. Для АСНК, метою яких є технічне діагностування ОК в експлуатації (у західній науковій літературі цей напрямок називають аббревіатурою SHM – structural health monitoring), необхідно також визначити причини невідповідності технічного стану ОК (зокрема, наявність дефектів, деградація матеріалів, зношеність робочих поверхонь тощо) з оцінюванням надійності та прогнозуванням термінів його подальшої експлуатації.

Зауважимо, що досить часто існуючі АСНК не тільки формують протокол з результатами проведеного НК, а і мають у своєму складі засоби для формування за отриманими результатами сигналів керування виконавчими механізмами, до яких зокрема можна віднести механізми розбраковування або маркування дефектних зон. Такі АСНК вже мають ознаки автоматизованих систем керування технологічними процесами [13].

Слід зазначити, що в питаннях автоматизації НК не існує чіткої термінології, так як у літературі часто зустрічаються терміни «механізований», «автоматизований», «напівавтоматизований», «автоматичний» [14]. До механізованих можна віднести засоби НК, у яких операції сканування повністю або частково (за однією з координат) виконуються автоматично. Оператор при цьому зазвичай перевіряє роботоздатність і калібрує установку на стандартному зразку (СЗ), приймає рішення про наявність дефекту та формує протокол контролю. Автоматизовані системи НК здебільш передбачають автоматизацію операцій доставляння ОК на позицію контролю та сканування поверхні ОК, перевірку роботоздатності на СЗ і формування протоколу про наявність дефектів та

їх координати. Проте рішення про якість виробу приймає оператор найвищого рівня кваліфікації на основі аналізу протоколу контролю і, за необхідності, результатів додаткових контрольних операцій. До автоматичних можна відносити системи НК, у яких усі операції, включно з прийняттям рішення про якість виробу та відповідність нормативним документам і вибраковуванням неякісної продукції, виконуються без участі оператора. Чи відображує така класифікація сучасний рівень розвитку техніки? Скоріше за все, – ні, так як з'явилися, зокрема, АС на основі використання роботів, які несуть різноманітну апаратуру НК. Для НК важкодоступних зон конструкцій використовують підйомні та підводні різновиди роботів або безпілотні літальні апарати [4]. Крім того, з'явилися технічні рішення щодо створення адаптивних АС, зокрема на основі використання пристроїв технічного зору [15] (див. Куц Ю.В., Шаповалов Є.В., Учанін В.М. та ін. Спосіб адаптивного вихрострумowego контролю. України пат. 140906, 2020, Бюл. № 5 та Учанін В.М., Вертій О.О., Яценко О.Ю. та ін. Адаптивний спосіб сканувального вихрострумowego контролю. України пат. 149803, 2021, Бюл. № 49), АС комплексного НК з використанням різних фізичних методів (наприклад, ультразвукового і ВС) та АС з використанням томографічних принципів [16–18]. Тому є необхідність створення новішої класифікації АСНК на основі розширення переліку класифікаційних ознак.

Загалом можна сказати, що формується тенденція створення багатофункціональних адаптивних АС для вирішення декількох задач, у тому числі на основі реалізації комплексного НК, побудованих на застосуванні різних фізичних принципів для отримання синергетичного ефекту, пов'язаного з обмеженнями кожного окремого методу НК та різною ймовірністю виявлення дефектів залежно від типу та місця розташування [19, 20].

За останні роки сфери використання методів ВС НК, що використовують реакцію матеріалу ОК на зондувальну дію змінного електромагнітного поля, суттєво розширилися [21–23]. Це пов'язано з низкою переваг цього методу порівняно з іншими методами НК. Можна обґрунтовано говорити про високу чутливість ВС методу до дефектів різного типу та його чутливість до низки електрофізичних і геометричних параметрів ОК (багатопараметровість). Але для автоматизації найважливішим є безконтактність ВС методу, тобто здатність забезпечити достатню чутливість до дефектів за певної відстані між ВСП і поверхнею ОК або навіть через діелектричний покрив. При цьому принципове значення має можливість зменшення завад від зміни зазору, тобто відстані між

ВСП і поверхнею ОК під час сканування. Таким вимогам відповідають ВСП подвійного диференціювання, які забезпечують високу чутливість під час контролю з великим зазором [24].

У таблиці зроблено спробу порівняти автоматичний і ручний вихрострумний НК, аналізуючи чинники, що впливають на варіативність сигналу ВСП і, відповідно, достовірність контролю.

Права частина таблиці дає достатньо великий перелік операцій, які повинен реалізувати оператор під час ручного контролю для забезпечення його достовірності. Очевидно, що неточність виконання кожної операції може призвести до порушення оптимального сканування поверхні ОК, хибного налаштування апаратури і, як результат, пропуску дефектів. В АС більшість процедур правої частини таблиці вибираються на етапі попередніх досліджень і реалізуються відповідно до заданих алгоритмів роботи складових АС. Для забезпечення селективності контролю важливо вибрати такі інформативні ознаки сигналів ВСП, що дозволяють достовірно виявляти дефекти в умовах дії завад. Функціонування АС практично не залежить від кваліфікації оператора, стану його здоров'я та умов роботи. Ліва частина таблиці визначає важливість вимог щодо якісної роботи сканерів та пристроїв позиціонування АС. Представлена таблиця підтверджує перспективи автоматизації ВС контролю щодо збільшення достовірності контролю за умови створення надійних сканерів та пристроїв позиціонування.

Роботизована система вихрострумного НК для виявлення та ідентифікації експлуатаційних дефектів труб печей вторинного риформінгу. Актуальною проблемою хімічної промисловості є виявлення експлуатаційних тріщин на внутрішній та зовнішній поверхнях труб печей вторинного риформінгу. Труби діаметром 102 мм з товщиною стінки 15 мм виготовляють способом відцентрового виливання з нержавіючої сталі 40X25H20. Контроль необхідно проводити ззовні без доступу до внутрішньої поверхні труб з високою чутливістю до дефектів, що залягають на глибині 7...8 мм (близько 50 % від товщини труб). Задачу ускладнює велика структурна неоднорідність ма-

теріалу труб, яка суттєво зменшує ефективність ультразвукового методу. Тому безальтернативним рішенням задачі є застосування ВС методу з використанням низьких робочих частот. Крім цього, засоби ВС контролю повинні ідентифікувати виявлені дефекти шляхом розділення їх на декілька класів: зокрема, на зовнішні та внутрішні відповідно до поверхні труби, на якій вони зароджуються, а також повздовжні та поперечні відносно осі труби. Крім цього, необхідно оцінювати глибину дефектів (у відсотках від товщини труби) незалежно від того, на якій поверхні вони виявлені. Усі ці завдання необхідно вирішувати в умовах високого рівня завад, які виникають через структурну неоднорідність матеріалу та шорсткість поверхні труби.

Під час розробки ВСП звертали увагу на достатню чутливість до дефектів на внутрішній поверхні труби, рівень сигналів яких повинен перевищувати рівень структурних завад. Для розробки ВСП використано достатньо великі обмотки, розміщені на феритових осердях діаметром 10 мм, що дало можливість завдяки інтегровальним властивостям зменшити рівень структурних завад зі збереженням необхідної чутливості до дефектів. Найкращу чутливість до внутрішніх дефектів забезпечив ВСП типу МДФ 3301 з діаметром робочої площадки 33 мм, який дозволяє проводити ВС контроль в діапазоні робочих частот 50 Гц...150 кГц. ВСП досліджували за допомогою ВС плати EDDYMAX на робочій частоті 1,5 кГц, яка забезпечувала найкращу чутливість до дефектів на внутрішній поверхні труби під час контролю з зовнішньої сторони труби. Використали фрагмент труби, на внутрішній поверхні якої фрезую завтовшки 0,2 мм нанесли три напівеліптичні поздовжні дефекти, що імітують тріщину завдовжки 35 мм і завглибшки 7,5 мм (Д1); 9,0 мм (Д2) і 10,0 мм (Д3), що відповідає глибині залягання 50; 40 і 33,3 % від товщини стінки труби (15 мм) під час контролю з зовнішньої сторони труби [27].

На рис. 1, а, б наведено сигнали від трьох дефектів на внутрішній поверхні труби (Д1, Д2 і Д3) у комплексній площині (після демодуляції), а також вертикальну та горизонтальну складові сигнала

Чинники, що впливають на варіативність сигналів ВСП під час ручного та автоматизованого ВС контролю

Автоматизований контроль	Ручний контроль
1. Порушення позиціонування ВСП 2. Порушення швидкості сканування	1. Позиціонування ВСП (зазор, нахил, орієнтація) оператором 2. Параметри сканування поверхні ОК (крок, швидкість тощо) 3. Налаштування приладу (вибір робочої частоти, підсилення, рівень сигналізації дефектів тощо) 4. Відповідність СЗ для налаштування характеристикам ОК 5. Вибір способу інтерпретації сигналів ВСП (наприклад з використанням комплексної площини) 6. Вибір параметрів фільтра високих частот для заглушення впливу завад, пов'язаних зі змінами електрофізичних і геометричних параметрів ОК, впливом краю тощо 7. Вибір параметрів фільтрів низьких частот для заглушення впливу електронних завад відповідно до швидкості сканування 8. Стан здоров'я оператора та стан довкілля

лу ВСП у режимі часової розгортки. На рис. 1, в, з для оцінки можливості виявлення внутрішніх дефектів наведено відповідні сигнали від структурних завод, які отримано шляхом сканування бездефектної зони труби, а також сигнали від зміни зазору, які отримано відведенням ВСП від поверхні труби на відстань більше ніж 3 мм. Сигнали від структурних завод можна спостерігати в комплексній площині (на рис. 1, в виділено пунктирним колом) або в режимі часової розгортки складових сигналів (рис. 1, б). Видно, що сигнал від внутрішнього дефекту типу тріщини (Д1) з глибиною залягання 7,5 мм (50 % від товщини стінки труби) більше ніж на 6 дБ перевищує сигнали від структурних завод.

На рис. 2 наведено сигнали ВСП від поверхневих тріщин різної орієнтації на робочій частоті 1,5 кГц за чутливості на 18 дБ меншої, ніж під час реєстрації сигналів на внутрішній поверхні труби (рис. 1). На рис. 2, а, б наведено сигнали ВСП у комплексній площині і в режимі часової розгортки від поздовжньої відносно осі труби поверхневої тріщини завглибшки 5,0 мм, а на рис. 2, в, з – відповідні сигнали від поперечної тріщини. Дані на рис. 2 свідчать про особливість сигналів ВСП подвійного диференціювання, коли сигнали від поздовжніх і поперечних тріщин мають протилежний напрямок годографів і, відповідно, різ-

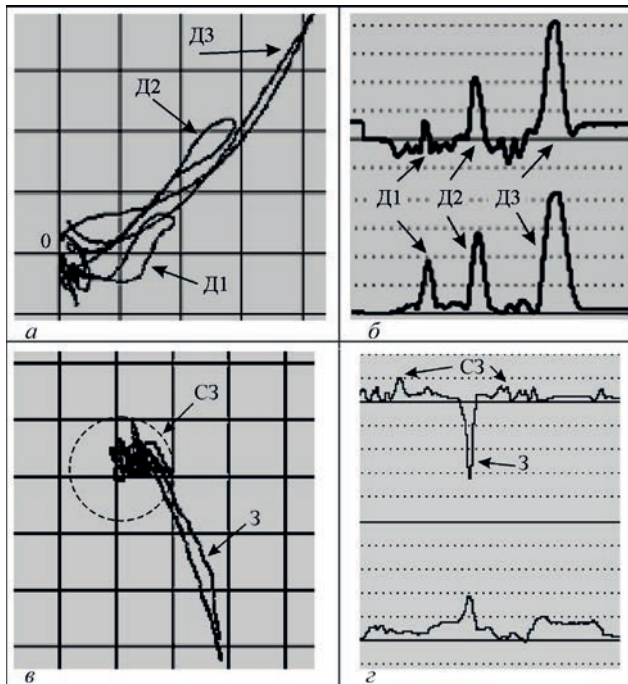


Рис. 1. Сигнали ВСП типу МДФ 3301 від внутрішніх дефектів труби, що залягають на глибині 7,5 (Д1); 6,0 (Д2) і 5,0 мм (Д3), а також сигнали структурних завод (С3) і зміни зазору (3) у комплексній площині (а, в) і складові сигнали ВСП у режимі часової розгортки (б, з)

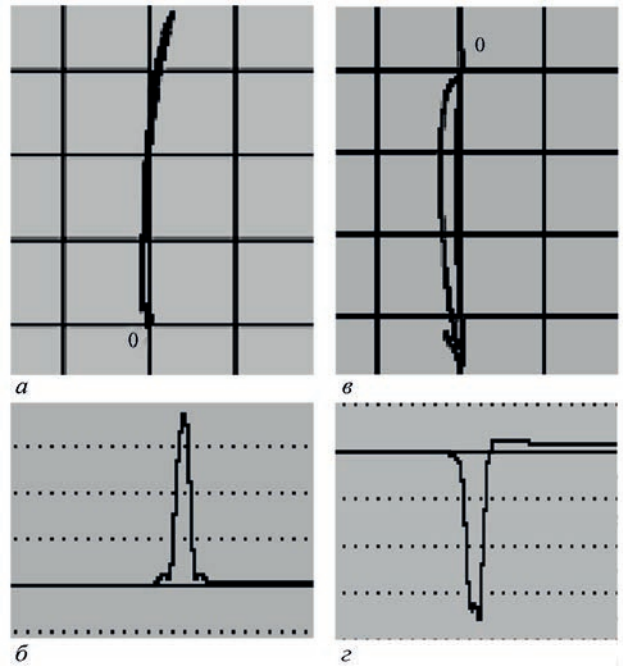


Рис. 2. Сигнали ВСП типу МДФ 3301 від поздовжнього (а, б) і поперечного (в, з) дефектів у комплексній площині (а, в) і в режимі часової розгортки (б, з)

ний знак вертикальної складової. Цю особливість можна використати для ідентифікації виявлених тріщин відповідно до їх напрямку.

Порівняння сигналів від внутрішніх (рис. 1, а, б) та поверхневих (рис. 2) дефектів і сигналів від зміни зазору (рис. 1, в, з) вказує на можливість розрізнення сигналів від дефектів і сигналів від зміни зазору та ідентифікації виявлених дефектів щодо поверхні їх розташування за напрямком годографа (фазовим кутом) сигналу. Зокрема годограф сигналу від дефектів на внутрішній поверхні труби відрізняється від сигналу, обумовленого зазором, на кут $\sim 90^\circ$, що дає можливість ефективно виділити його поворотом комплексної площини.

Результати досліджень використано НВФ «Промприлад» для створення роботизованої системи ВС контролю труб вторинного риформінгу типу «КРАБ» [25]. Система «КРАБ» забезпечує 4-х-каналний двочастотний контроль труб в умовах експлуатації. Вона складається з 4-х ВСП, які підключено до 4-х ідентичних ВС каналів, механічного сканера-робота з блоком керування, що забезпечують незалежне сканування поверхні труби усіма ВСП, і індустріального комп'ютера. Спеціально розроблений сканер-робот (рис. 3) забезпечує одночасне переміщення чотирьох ВСП, кожний з яких сканує окремий сектор труби по траєкторії типу меандр. Після контролю однієї ділянки труби з усіх сторін сканер разом з ВСП автоматично переміщується на наступну ділянку. Для побудови сканера використано оригінальні пневматичні механізми, що дозволяє знизити рівень електронних завод завдяки відсутності електродвигунів у зоні ВСП. Швидкість



Рис. 3. Сканер ВС системи «КРАБ», встановлений на трубі печі вторинного риформінгу

переміщення уздовж труби – 1 м/хв. Сканер можна встановлювати на трубу не тільки з торця, а і з її циліндричної поверхні, що дає можливість контролювати вмонтовані труби під час їх ремонту.

Блок керування сканером формує шість сигналів керування, приймає чотири сигнали від виконавчих механізмів сканувального пристрою, а також приймає і обробляє сигнали від датчиків кутових переміщень. Кожний вихрострумний канал обробляє сигнали від одного ВСП на двох робочих частотах 1,4 і 5,0 кГц, необхідних для виявлення та ідентифікації дефектів на різних поверхнях труби. Реєструючи сигнали на різних робочих частотах від кожного ВСП роздільно, можна ідентифікувати дефекти за поверхнею їх розташування. Під час контролю можна спостерігати та реєструвати сигнали від усіх чотирьох ВСП на робочих частотах 1,4 і 5 кГц одночасно (рис. 4). Внутрішні дефекти утворюють сигнал тільки на частоті 1,4 кГц, а зовнішні – як на частоті 1,4 кГц, так і на частоті 5 кГц. Система має можливість реєструвати годограф сигналу ВСП від дефекту у комплексній площині або його складові в режимі часової розгортки. Для реалізації автоматичної сигналізації дефектів (АСД) на кожному з каналів можна виділити у комплексній площині до чотирьох зон реєстрації дефектів. Передбачено можливість будувати розгортку вибраного сектора труби для окремого каналу, а також розгортку всієї труби для внутрішніх або зовнішніх дефектів. Система «КРАБ» забезпечує зберігання всіх зібраних

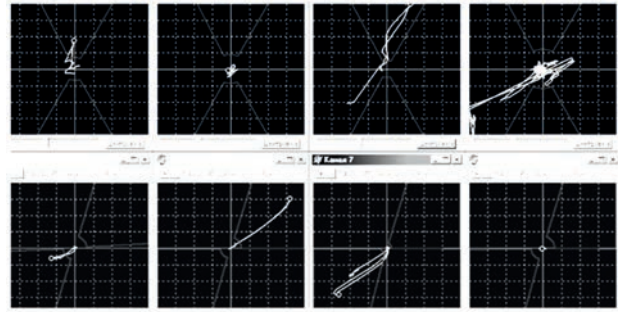


Рис. 4. Сигнали від чотирьох ВСП на робочих частотах 1,4 (зверху) і 5 кГц (знизу)

даних для їх подальшого аналізу і документування та можливість оцінювання глибини виявленого дефекту у відсотках від товщини стінки труби незалежно від його розташування.

Випробування показали, що система «КРАБ» виявляє дефекти на зовнішній поверхні заглибки більше за 20 %, а на внутрішній — більше за 50 % від товщини стінки труби. Система «КРАБ» ідентифікує виявлені дефекти за їх розташуванням (на внутрішній або на зовнішній поверхнях труби) і орієнтацією (поздовжні і поперечні), а також оцінює їх глибини у відсотках від товщини стінки труби.

Вихрострумний блок багатоканальної автоматизованої системи комплексного контролю залізничних осей. Ручний контроль залізничних осей з формуванням протоколу результатів контролю кожної осі має низьку продуктивність, що обмежує їх контроль по зонах можливого зародження дефектів. Суттєве підвищення продуктивності та достовірності контролю осей можна досягнути використанням комплексного НК, що обумовлено різною чутливістю вибраних методів НК до окремих груп дефектів. Дефекти залізничних осей можна розділити на дві основні групи: 1) внутрішні, які достатньо добре виявляє ультразвуковий метод; 2) поверхневі, чутливість до яких під час ультразвукового контролю недостатньо висока. У деяких АС під час НК осей ультразвуковий метод поєднують з магнітопорошковим, який забезпечує високу чутливість до поверхневих дефектів, але у той же час має низьку істотних недоліків. Тому перспективнішим для комплексного автоматизованого НК осей є ВС метод. Український НДІ неруйнівного контролю (м. Київ) створив автоматизовану систему комплексного НК залізничних осей «САНК-3», у якій ультразвуковий контроль доповнено ВС методом [26]. Залізничні осі типу РУ1Ш і РУ1 із осьової сталі, які підлягають НК,



Рис. 5. Схема розподілу залізничної осі на окремі зони контролю

мають досить складну форму (рис. 5). Загальна довжина осі РУ1Ш становить 2216 мм, а осі РУ1 — 2294 мм. Діаметри шийки, біляматочинної частини, маточини і середньої частини осі складають 130; 165; 194 і 172 мм відповідно. Довжини ділянок осі уздовж шийки, біляматочинної частини і маточини осі 190 (для РУ1 — 176), 76 і 250 мм відповідно.

Через складну форму, достатньо велику площу контролю та необхідність забезпечити високу продуктивність поверхню осі розбивають на окремі зони, які контролюють паралельно у багатоканальному режимі. Всього виділено 16 зон контролю (рис. 5). При цьому для контролю зон 1, 3, 5, 6 та 8 використовують по два ВСП, а для сьомої зони — чотири ВСП. Зони 2 і 4 галтелей необхідно контролювати в окремому режимі, оскільки контрольована поверхня тут має невеликий радіус кривизни. Тому для цих зон використовують ВСП з меншим радіусом робочої площадки. Для контролю різних зон залізничних осей використали ВСП двох типів:

– МДФ 0701 з діаметром робочої площадки 7 мм для контролю циліндричних поверхонь, галтелей середньої частини і торців осі (усі зони, окрім другої і четвертої);

– МДФ 0602 з діаметром 6 мм для контролю галтелей малого радіуса (зони 2 і 4 на рис. 5).

Структурна схема вихрострумового блоку автоматизованої системи «САНК-3» (рис. 6) містить 32 ВСП, поділені на дві групи 1.1–1.16 і 2.1–2.16. Кожну групу з 16 ВСП обслуговує два комутатори 3 і 4, які по чергові опитують ВСП. Кожен з комутаторів здатний комутувати до 32 ВСП, які закріплюють в оправках з можливістю сканування поверхні осі з зазором 0,2 мм. Оправки з ВСП у стартовій позиції зображено на рис. 7.

У складі електронного модуля 5 попереднього збору та обробки інформації ОКО-13 використа-

но два вихрострумових блоки (ВСБ) 6 і 7 (рис. 6), кожен з яких обслуговує один комутатор. Модуль ОКО-13 – доопрацьований центральний блок багатоканального дефектоскопа ОКО-01, у якому відсутні дисплей та органи управління. Він може мати в складі до чотирьох ВСБ. Електронний модуль 5 і ВСБ 6 і 7, що підключені до нього, знаходяться в одному корпусі. Модуль 5 оснащений мережевим модулем WizNet для зв'язку з ПК 8, який здійснюється за допомогою стандартного протоколу TCP/IP 4.0. Від ВСБ на плату комутатора надходять сигнал генератора синусоїдальних коливань і код, що відповідає поточному ВСП і каналу. Комутатор активує канал відповідно до отриманого коду і сигнали від вибраного ВСП надходять у ВСБ, де відбувається їх первинна обробка і накопичення. Після завершення контролю ці дані передаються на центральний комп'ютер 8, який їх обробляє та зберігає інформацію про дефектні ділянки у базі даних. Для перевірки роботоздатності і калібрування передбачено вставки зі штучними дефектами, які вмонтовано на СЗ у вигляді спеціальної контрольної осі.

Результати випробувань і експлуатації системи «САНК-3» засвідчили, що ВС контроль із застосуванням ВСП подвійного диференціювання типу МДФ забезпечує достатньо високу чутливість до дефектів. Це дало можливість замінити магніто-

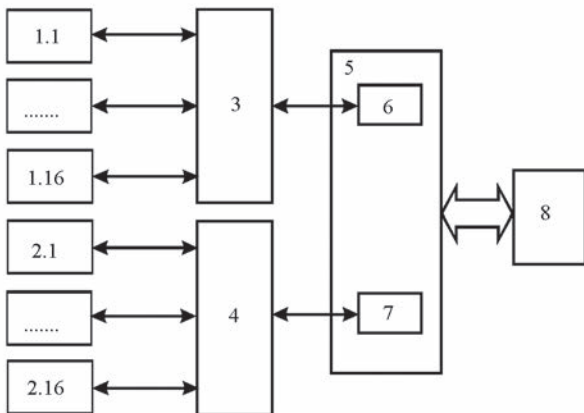


Рис. 6. Схема ВС блоку системи «САНК-3» для комплексного НК осей: 1.1–1.16 і 2.1–2.16 – ВСП; 3 і 4 – комутатори; 5 – електронний модуль ОКО-13; 6 і 7 – вихрострумові блоки; 8 – центральний комп'ютер

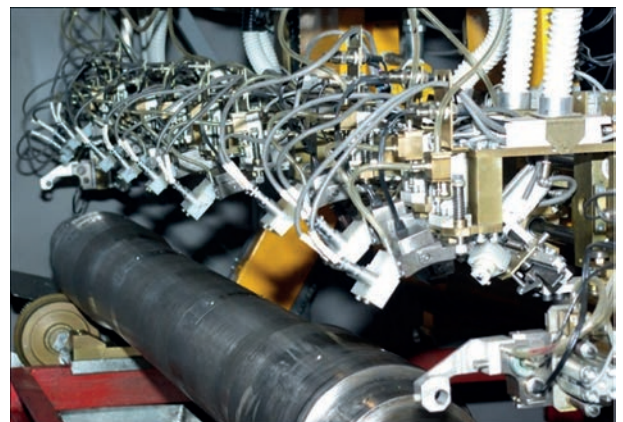


Рис. 7. Автоматизована система «САНК-3» з ВСП на стартовій позиції

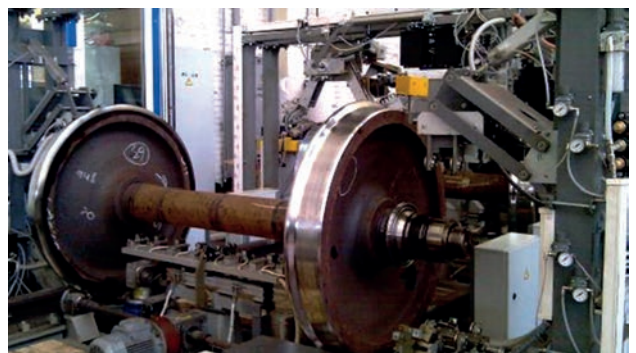


Рис. 8. Автоматизована система комплексного контролю «СНК КП-8» з контрольованою колісною парою

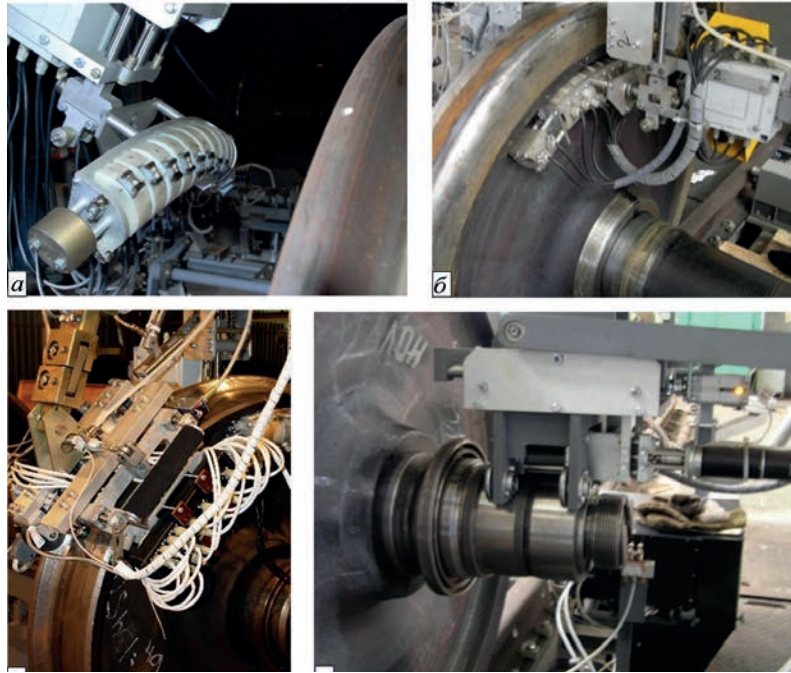


Рис. 9. Сканери АС «СНК КП-8» для контролю галтелей обода колеса у стартовій (а) і робочій позиціях (б), для контролю обода (в) та зони кілець (г)

порошковий метод НК і збільшити продуктивність АС контролю залізничних осей.

Автоматизована система комплексного неруйнівного контролю колісних пар. Автоматизовану систему «СНК КП-8» (рис. 8) комплексного (ультразвукового, електромагнітно-акустичного і ВС) контролю колісних пар типу РУ1 і РУ1Ш-957 після тривалої експлуатації розроблено в Українському НДІ неруйнівного контролю (м. Київ) [27].

Вихрострумний тракт АС «СНК КП-8» забезпечує багатоканальний контроль різних зон колісних пар, що гарантує високу продуктивність контролю. В одному з варіантів АС для різних зон колісної пари використано таку кількість ВС каналів: 16 каналів для контролю бічних поверхонь ободу колеса; 6 каналів для контролю поверхні кочення колеса; 9 каналів для контролю гребеня колеса; 24 канали для контролю приободової зони диска; 8 каналів для контролю середньої частини осі; 8 каналів для контролю шийки осі і 10 каналів для контролю внутрішніх кілець підшипників. ВСП подвійного диференціювання використовують для контролю ободу (МДФ 1201), галтелей (МДФ 0601), гребеня (МДФ 0901) і поверхні кочення (МДФ 1201) колеса, середньої частини (МДФ 1201) і шийок (МДФ 0601) осі, а також внутрішніх кілець підшипників (МДФ 0901). На рис. 9 зображено сканери АС «СНК КП-8» для контролю різних зон колісної пари.

Система забезпечує комплексний контроль не менше десяти колісних пар за годину за умови їх ритмічного надходження на позицію контролю. Під час виробничих випробувань і експлуатації автоматизованої системи «СНК КП-8» вихрострумо-

вим методом виявлено дефекти на середніх частинах осей, внутрішніх кільцях підшипників, а також ободах, гребенях, поверхнях кочення і приободових зонах коліс.

Вихрострумний блок автоматизованої системи комплексного контролю залізничних рейок. Комплексний НК рейок на етапі їх виробництва передбачений низкою стандартів як важливий чинник забезпечення надійності та безперервності залізничних перевезень. Для достовірного виявлення дефектів рейок найчастіше поєднують ультразвуковий і ВС методи НК, коли синергетичний ефект такого підходу досягається через

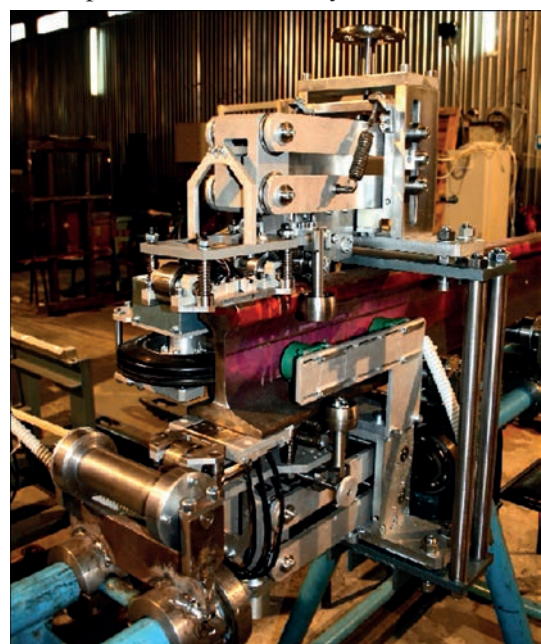


Рис. 10. Загальний вигляд АС комплексного НК рейок після їх прокатування

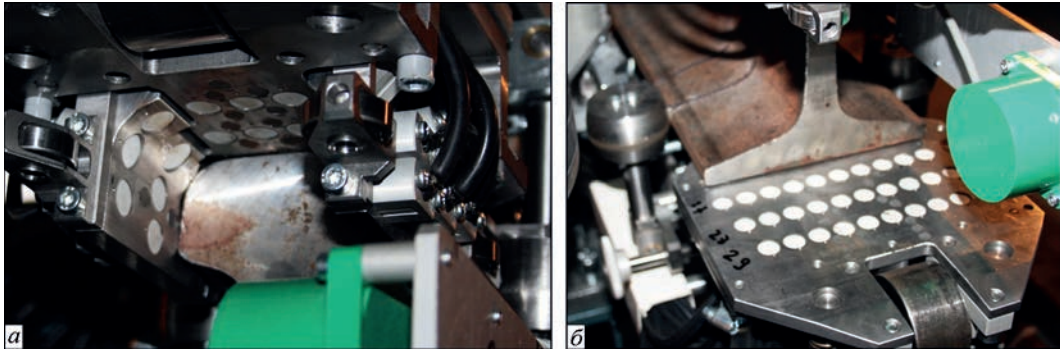


Рис. 11. Комплекти ВСП для контролю головки (а) і підшви (б) рейки

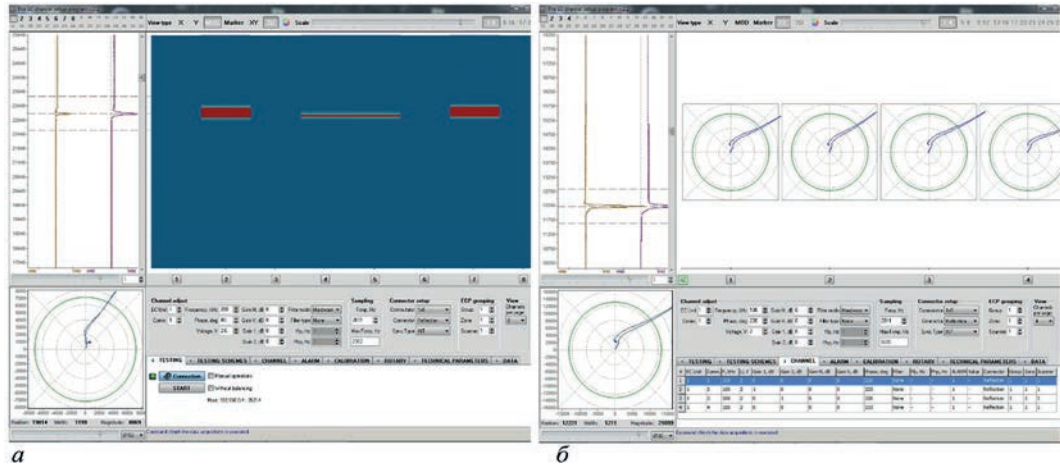


Рис. 12. Дисплей ВС блоку АС із сигналами від дефектів у головці рейки в режимі двокоординатної презентації (а) і в режимі комплексної площини (б)

їх орієнтованість на різні групи дефектів [19, 20]. Для створення селективних ВС систем в умовах дії сильних завад використовують різні варіанти методу, у тому числі з використанням обертових ВСП [28]. Такий підхід може суттєво обмежувати продуктивність ВС контролю та порушити синхронність виробничих циклів, що може призвести до зменшення продуктивності виробництва рейок у цілому. Для збільшення продуктивності НК перспективнішими є багатоканальні АС з використанням селективних ВСП, які можуть проводити контроль в умовах дії великих завад, у тому числі пов'язаних з неоднорідністю магнітних властивостей сталей та нестабільністю зазору між ВСП і поверхнею ОК [29].

Автоматизовану систему для комплексного (ультразвукового, електромагнітно-акустичного і ВС) контролю залізничних рейок після їх прокатування розроблено НВФ «Промприлад» [30].

Розглянемо детальніше ВС блок цієї АС, який забезпечує контроль рейок з продуктивністю до 2 м/с за рахунок використання 56-и каналів [30]. Основні вимоги до ВСП такої АС передбачали високу чутливість по поздовжніх і поперечних тріщин, можливість проводити контроль за умови відстані робочої поверхні ВСП від поверхні рейки не менше ніж 1 мм для запобігання пошкодження ВСП та високий рівень заглушення завад, пов'язаних зі змінами цієї відстані (зазору) під час сканування.

Попередні випробування показали, що цим вимогам відповідає ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201 з діаметром робочої поверхні 12,5 мм, які забезпечували максимальну чутливість до дефектів у феромагнітній сталі на робочій частоті 100 кГц. Загалом використано 25 ВСП для контролю головки рейок включно з бічними поверхнями (рис. 11, а) та 31 ВСП для контролю підшви рейок (рис. 11, б). ВС блок АС забезпечує виявлення поздовжніх і поперечних тріщин завглибшки більше 1,0 або 1,5 мм завдовжки більше 20 або 10 мм відповідно.

Зовнішній вигляд дисплею ВС модуля АС з візуалізацією результатів контролю в режимах двокоординатної візуалізації (а) і комплексної площини (б) наведено на рис. 12.

Висновки

Розглянуто стан проблеми щодо створення АСНК. Зазначено формування тенденції розробки адаптивних АС для комплексного НК, побудованих на застосуванні різних фізичних принципів для отримання синергетичного ефекту. Проаналізовано чинники, що впливають на варіативність сигналів ВСП під час ручного та автоматизованого ВС контролю. Зазначено переваги селективних ВСП подвійного диференціювання для створення систем ВС контролю.

Представлено особливості побудови та характеристики розроблених в Україні (НВФ «Промприлад» та Українському НДІ неруйнівного контролю) багатоканальних АС із застосуванням ВС методу, зокрема:

– роботизована чотириканальна система ВС контролю для виявлення та ідентифікації експлуатаційних дефектів труб печей вторинного риформінгу на двох робочих частотах 1,4 і 5,0 кГц зі швидкістю переміщення блоку ВСП уздовж труби 1 м/хв;

– вихрострумний блок багатоканальної (32 канали) АС комплексного контролю залізничних осей під час їх виробництва;

– автоматизована система комплексного НК контролю колісних пар в умовах ремонтних підприємств (різні варіанти мають щонайменше 98 ВС каналів), яка забезпечує можливість НК не менше десяти колісних пар за годину;

– вихрострумний блок АС контролю залізничних рейок під час їх виробництва з продуктивністю до 2 м/с за рахунок використання 56-и каналів, чутливість яких дозволяє виявляти повздовжні та поперечні тріщини завглибшки більше 1,0 або 1,5 мм завдовжки більше 20 або 10 мм відповідно.

Список літератури/References

1. Meyendorf, N., Heilmann, P., Bond, L. et al. (2020) NDE 4.0 in Manufacturing: Challenges and Opportunities for NDE in the 21st Century. *Materials Evaluation*, 78(7), 794–803. DOI: <https://doi.org/10.32548/2020.me-04144>
2. Meyendorf, N., Ida, N., Singh, R., Vrana, J. (2021) *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48200-8_43-1
3. Vajpayee, A., Russell, D. (2019) Inspection of Boiler Water Wall Tubes using Electromagnetic Inspection Technique. Yesterday (manual) and Today (automated). *Industrial Eye*, 6(5), 39–43.
4. Bridge, B., Sattar, T., Chen, S., Khalid, A. (1997) On the design of multi-task, compact, climbing robotic NDT systems for remote operation on large surfaces and in hazardous environments. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 13(2), 85–111. DOI: <https://doi.org/10.1080/02780899708953021>
5. Bertovic, M. (2016) A Human Factors Perspective on the Use of Automated Aids in the Evaluation of NDT Data. Proc. 42nd annual conf. «Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation», *AIP Conf. Proc.*, 1706, 020003, 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4940449>
6. Bertovic, M. (2015) *Human Factors in Non-Destructive Testing (NDT): Risks and Challenges of Mechanised NDT*, Doctoral dissertation, Technical University, Berlin.
7. Орнатский П.П. (1983) *Теоретические основы информационно-измерительной техники*. Київ, Вища школа. Ornaty, P.P. (1983) Theoretical fundamentals of information-measurement technique. Kyiv, Vyscha Shkola [in Russian].
8. Бабак В.П., Бабак С.В., Єременко В.С. та ін. (2017) *Теоретичні основи інформаційно-вимірвальних систем*. Бабак В.П. (ред.), 2-е вид. Київ, НАУ. Babak, V.P., Babak, S.V., Ieremenko, V.S. et al. (2017) Theoretical fundamentals of information-measurement systems. Ed. by V.P. Babak, 2nd Ed. Kyiv, NAU [in Ukrainian].
9. Защепкіна Н.М., Шульга О.В., Наконечний О.А. (2021) *Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірвальних систем*. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Zashchepkina, N.M., Shulga, O.V., Nakonechnyi, O.A. (2021) Metrological support of information-measurement systems. Kyiv, KPI [in Ukrainian].
10. Parasuraman, R., Sheridan, T.B., Wickens, C.D. (2000) A Model for Types and Levels of Human Interaction with Au-

- tomation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics – Part A: Systems and humans*, 30(3), 286–297. DOI: <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
11. Le Liu (2018) The Process to Design an Automation System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1087(4). DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1087/4/042001>
12. Calhoun, G. (2022) Adaptable (Not Adaptive) Automation: Forefront of Human–Automation Teaming. *Human factors*, 64(2), 269–277. DOI: <https://doi.org/10.1177/00187208211037457>
13. Бобух А.О. (2006) *Автоматизовані системи керування технологічними процесами*. Харків, ХНАМГ. Bobukh, A.O. (2006) *Automated systems of control of technological processes*. Kharkiv, KhNAMG [in Ukrainian].
14. Гурвич А.К., Щербинский В.Г. (2006) Автоматизированный НК металлопродукции. В мире неразрушающего контроля, 3(33), 4–5.
15. Долиненко В., Шаповалов Е., Скуба Т. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумного контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, 5–6, 60–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
16. Dolinenko, V., Shapovalov, E., Skuba, T. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, 5–6, 51–57. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
17. Koshovyy, V.V., Nazarchuk, Z.T. (2001) Estimating the Pre-defective State of a Material Using Methods of Ultrasonic Computerized Tomography. *Materials Science*, 37(2), 279–293. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013219011254>
18. Vertiy, O., Uchanin, V. (2021) Three-dimensional visualization of the detected defects by eddy current computing tomography. *The Paton Welding J.*, 9, 49–55. DOI: <http://doi.org/10.37434/tpwj2021.09.08>
19. Tamburrino, A., Rubinacci, G. (2006) Fast methods for quantitative eddy-current tomography of conductive materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(8), 2017–2028. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.877542>
20. Thomas, H.M., Heckel, T., Hanspach, G. (2006) Advantage of a combined Ultrasonic and Eddy Current Examination for Railway Inspection Trains. *9th Europ. Conf. on Nondestructive Testing*, Berlin, www.ndt.com.
21. Rockstroh, B., Kappes, W., Walte, F. (2008) Ultrasonic and Eddy-Current Inspection of Rail Wheels and Wheel Set Axles. *17th World Conf. on Nondestructive Testing*, Shanghai, www.ndt.com.
22. Libby, H.L. (1971) *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*. Wiley-Interscience New York.
23. Терерко А.Я., Назарчук З.Т. (2004) *Селективна вихрострумна дефектоскопія*. Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка. Teterko, A.Ya., Nazarchuk, Z.T. (2004) *Selective eddy current flaw detection*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
24. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11, 2525–2565. DOI: <https://doi.org/10.3390/s110302525>
25. Uchanin, V.M. (2023) Surface eddy current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems. *The Paton Welding J.*, 2, 46–55. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.02.07>
26. Uchanin, V., Lutchenko, G., Nikonenko, A. (2006) Automated Eddy Current System for Flaw Detection and Sizing during In-service Stainless Steel Tube Inspection. *Proc. 9th Europ. Conf. on Nondestructive Testing*, Berlin, www.ndt.net.
27. Uchanin, V., Lutchenko, G. et al. (2010) The system of automated complex testing of rail axles in their manufacture. *Proc. 10th Europ. Conf. on Nondestructive Testing*, Moscow, www.ndt.net.
28. Lutchenko, G., Uchanin, V., Mischenko, V., Opanasenko A. (2012) Eddy Currents Versus Magnetic Particles. *Proc. 18th World Conf. on Nondestructive Testing*, Durban, www.ndt.com.
29. Raj, M., Mallik, D., Bansal, S. et al. (2012) Non-Destructive Testing and Inspection of Rails at JSPL – Ensuring Safety and Reliability. *Proc. 18th World Conf. on Nondestructive Testing*, Durban, www.ndt.net.

29. Song, Z., Yamada, T., Shitara, H., Takemura, Y. (2011) Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing. *J. of Electromagnetic Analysis and Applications*, 3(12), 546–550. DOI: <https://doi.org/10.4236/jemaa.2011.312082>

30. Opanasenko, A., Iurchenko, A., Lutcenko, G., Uchanin, V. (2016) Eddy Current Multi-Channel Module for In-line High-speed Inspection of Railroad Rails. *19th World Conf. on Nondestructive Testing*, Munich, www.ndt.net.

AUTOMATED EDDY CURRENT INSPECTION SYSTEMS WITH SURFACE PROBE OF DOUBLE DIFFERENTIAL TYPE

V.M. Uchanin¹, G.G. Lutcenko², A.V. Opanasenko²

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

²Ukrainian Scientific Institute for Non-Destructive Testing, 8 Naberezhno-Lugova str., 04070, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@ndt.com.ua

The prospects and state-of-the art related the development of automated non-destructive testing systems are considered. The formation of the tendency concerned with creation of the adaptive automated systems for complex testing based on the application of various physical principles to obtain a synergistic effect is indicated. The factors affecting the variability of eddy current probe signals during the manual and automated eddy current testing were analyzed. The advantages of selective probes of double differential type for automated systems development are indicated. Features of the design and characteristics of multi-channel automated systems based on the eddy current method application developed in Ukraine are presented, in particular: a robotic eddy current testing system for detection and identifying of in-service defects in the tubes of secondary reforming furnaces; the eddy current unit of the multi-channel system of complex testing of railway axles during their production; automated system of complex testing of wheel pairs in the conditions of repair plants; eddy current block of the system for complex inspection of railway rails during their production. 30 Ref., 1 Tabl., 12 Fig.

Keywords: automated system, complex non-destructive testing, eddy current defectoscopy, eddy current probe of double differential type

Надійшла до редакції 04.02.2023

ПЕРЕДПЛАТА 2023

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

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

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

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агентств «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр» 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 2023 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2021 рр.



ВИДІЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ ДЕТЕРМІНОВАНОЇ СКЛАДОВОЇ ВІБРАЦІЙ МЕТОДОМ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ

Р.М. Юзефович^{1,2}, І.М. Яворський^{1,3}, О.В. Личак¹, В.В. Гнатишин², М.З. Варивода¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Національний університет «Львівська політехніка». 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

³Бидгощська Політехніка. 85796, Польша, м. Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

Розглянуто результати досліджень властивостей оцінки методом найменших квадратів математичного сподівання періодично нестационарних випадкових процесів як математичної моделі стохастичних вібрацій. Проведено аналіз залежностей, що визначають статистичні характеристики оцінки. Наведено приклади аналізу типових процесів. Бібліогр. 20, рис. 2.

Ключові слова: періодично корельовані випадкові процеси (ПКВП), вібрація, математичне сподівання, кореляційна функція, оцінка методом найменших квадратів, дисперсія

Вступ. Для ефективного дослідження властивостей механічних і фізичних систем з використанням експериментальних даних потрібно, насамперед, виявити, проаналізувати та використати ті їх характерні особливості, що дадуть змогу в повній мірі розв'язати поставлені задачі. Такі особливості визначаються шляхом використання відповідних методів аналізу й обробки даних. Останні можуть бути розроблені тільки на основі обґрунтованих математичних моделей досліджуваних процесів. Вдало вибрані математичні подання реалізацій процесів, що досліджуються, створюють підґрунтя для опису і розуміння їх невідомих властивостей. Адекватною моделлю вібрацій пошкоджених механізмів, котрим властиві риси повторюваності та стохастичності, є періодично корельовані випадкові процеси (ПКВП) [1, 2]. При появі розподілених чи локалізованих дефектів несучі гармоніки вібрацій стохастично модулюються як за амплітудою, так і за фазою. Властивості такої модуляції описуються математичним сподіванням і кореляційною функцією ПКВП, а також їх коефіцієнтами Фур'є.

Підхід до аналізу вібрацій, який ґрунтується на ПКВП-моделях, був вперше нами апробований при аналізі стану підшипникових опор турбоагрегатів [3] і показав свою ефективність. Даючи змогу з єдиних позицій описати повторюваність і стохастичність, характеристики ПКВП є носіями інформації про незнані досі їх властивості і можуть бути покладені в основу формування нових ознак для опису стану об'єктів, що їх породжують.

Подальші дослідження [4, 5] показали, що ці ознаки можуть використовуватись для виявлення

дефектів на ранніх стадіях розвитку. В останні роки ПКВП-підхід до аналізу нестационарних вібраційних сигналів і розв'язування на цій основі задач діагностики розвивається багатьма вченими [6–13]. В англійській літературі, як правило, розвивається методологія, що ґрунтується на результатах W. Gardner [14, 15], H. Hurd [16], D. Dehay [17], J. Antoni [18, 19]. Такі нестационарні випадкові процеси називають циклостационарними [6, 7, 9–11]. Однак повноцінне використання ПКВП-моделі до аналізу вібраційних сигналів стало можливим після розв'язання задачі про визначення періоду нестационарності [20], яка є узагальненням на випадок ПКВП задачі про виявлення прихованих періодичностей. Знання періоду нестационарності дає можливість обчислити на основі експериментальних даних весь комплекс характеристик першого й другого порядку – математичне сподівання, кореляційну функцію, спектральну густину, а також їх коефіцієнти Фур'є.

Важливим завданням при обчисленні цих характеристик вібраційних сигналів за експериментальними даними є оцінка вірогідності отриманих результатів. На точність оцінок характеристик, які описують структуру стохастичної повторюваності сигналів і на основі яких отримуються ознаки для виявлення дефектів механізмів, впливають параметри обробки, а саме: довжина відрізка реалізації, який обробляється, крок дискретизації і точка усереднення корелограми. Аналіз точності оцінок залежно від параметрів обробки може бути проведений при переході до параметричного опису імовірнісної структури сигналів. З однієї сторони, у цьому випадку можуть бути отримані конкретні числові результати, з іншої – виходячи з потрібної точності

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

Личак О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5559-1969>

Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, О.В. Личак, В.В. Гнатишин, М.З. Варивода, 2023

оцінювання можуть бути вибрані саме ті параметри обробки, які її забезпечать. Аналізу порівняння точності оцінок, отриманих за допомогою методу найменших квадратів та компонентних оцінок, від вибору параметрів обробки присвячена ця стаття.

Властивості оцінок методу найменших квадратів. Математичне сподівання ПКВП $m(t) = E\xi(t)$, де E – оператор усереднення за густиною імовірності, і кореляційна функція $b(t, u) = E\dot{\xi}(t)\dot{\xi}(t+u)$, $\dot{\xi}(t) = \xi(t) - m(t)$, є періодичними функціями часу t і тому можуть бути подані у вигляді рядів Фур’є:

$$m(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} m_k e^{ik\omega_0 t}, \quad b(t, u) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k(u) e^{ik\omega_0 t}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T},$$

де T – період. Метою кореляційного статистичного аналізу є оцінювання за експериментальними даними функцій $m(t)$ і $b(t, u)$. Для такого оцінювання використовують когерентний [7] і компонентний [8] методи. Компонентні оцінки визначаються через оцінки коефіцієнтів Фур’є відповідних характеристик. Для визначення останніх може бути використаний метод найменших квадратів.

Даний метод полягає у знаходженні таких значень цих величин, при яких мінімальними стають середньоквадратичні відхилення оцінок:

$$F_1(\hat{m}_0, \hat{m}_1^c, \dots, \hat{m}_{N_1}^c, \hat{m}_1^s, \dots, \hat{m}_{N_2}^s) = \int_0^\theta [\xi(t) - \hat{m}(t)]^2 dt, \quad (1)$$

$$F_2[\hat{B}_0(u), \hat{B}_1^c(u), \dots, \hat{B}_{N_1}^c(u), \hat{B}_1^s(u), \dots, \hat{B}_{N_2}^s(u)] = \int_0^\theta [\eta(t, u) - \hat{b}(t, u)]^2 dt,$$

при цьому:

$$\eta(t, u) = [\xi(t) - \hat{m}(t)][\xi(t+u) - \hat{m}(t+u)],$$

$$\hat{m}(t) = \hat{m}_0 + \sum_{k=1}^{N_1} (\hat{m}_k^c \cos k\omega_0 t + \hat{m}_k^s \sin k\omega_0 t), \quad (2)$$

$$\hat{b}(t, u) = \hat{B}_0(u) + \sum_{k=1}^{N_2} [\hat{B}_k^c(u) \cos k\omega_0 t + \hat{B}_k^s(u) \sin k\omega_0 t].$$

Беручи до уваги, що квадратичні форми, побудовані на основі других часткових похідних функціоналів F_1 і F_2 , є достатньо визначеними, точки екстремумів знаходять як розв’язки систем лінійних рівнянь:

$$\frac{\partial F_1}{\partial \hat{m}_0} = 0, \quad \frac{\partial F_1}{\partial \hat{m}_k^c} = 0, \quad \frac{\partial F_1}{\partial \hat{m}_k^s} = 0, \quad k = \overline{1, N_1}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \hat{B}_0(u)} = 0, \quad \frac{\partial F_2}{\partial \hat{B}_l^c(u)} = 0, \quad \frac{\partial F_2}{\partial \hat{B}_l^s(u)} = 0, \quad l = \overline{1, N_2}. \quad (4)$$

Після обчислення похідних система рівнянь (4) набуває вигляду:

$$\mathbf{M}\hat{\mathbf{m}} = \bar{\mathbf{m}}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & c_{01} & \dots & c_{0N_1} & a_{01} & \dots & a_{0N_1} \\ c_{10} & c_{11} & \dots & c_{1N_1} & a_{11} & \dots & a_{1N_1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{N_1 0} & c_{N_1 1} & \dots & c_{N_1 N_1} & a_{N_1 1} & \dots & a_{N_1 N_1} \\ a_{01} & a_{11} & \dots & a_{N_1 1} & s_{11} & \dots & s_{1N_1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{0N_1} & a_{1N_1} & \dots & a_{N_1 N_1} & s_{N_1 1} & \dots & s_{N_1 N_1} \end{bmatrix},$$

де

$$\hat{\mathbf{m}} = \begin{bmatrix} \hat{m}_0 \\ \hat{m}_1^c \\ \vdots \\ \hat{m}_{N_1}^c \\ \hat{m}_1^s \\ \vdots \\ \hat{m}_{N_1}^s \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{m}} = \begin{bmatrix} \bar{m}_0 \\ \bar{m}_1 \\ \vdots \\ \bar{m}_{N_1} \\ \bar{m}_{N_1+1} \\ \vdots \\ \bar{m}_{2N_1} \end{bmatrix},$$

$$c_{lk} = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \cos l\omega_0 t \cos k\omega_0 t dt,$$

$$s_{lk} = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \sin l\omega_0 t \sin k\omega_0 t dt,$$

$$a_{lk} = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \cos k\omega_0 t \sin l\omega_0 t dt,$$

$$\bar{m}_0 = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) dt, \quad (6)$$

$$\bar{m}_l = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) \cos l\omega_0 t dt, \quad (7)$$

$$\bar{m}_{l+N_1} = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) \sin l\omega_0 t dt. \quad (8)$$

Розв’язок системи (5) дає оцінки компонентів $\hat{\mathbf{m}} = \mathbf{M}^{-1}\bar{\mathbf{m}}$. Якщо $\theta = NT$, то $c_{lk} = s_{lk} = a_{lk} = 0, k \neq l$, а $c_{kk} = s_{kk} = 1/2, a_{kk} = 0$.

Граничні значення цих величин отримуємо при $\theta \rightarrow \infty$. У такому випадку матриця \mathbf{M} (5) стає діагональною, а оцінки компонентів визначаються формулами:

$$\hat{m}_0 = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) dt,$$

$$\hat{m}_l^c = \frac{2}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) \cos l\omega_0 t dt,$$

$$\hat{m}_l^s = \frac{2}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) \sin l\omega_0 t dt,$$

тобто співпадають з компонентними [9].

Оскільки обернена матриця $\mathbf{M}^{-1} = \frac{[A_{ik}]^T}{|\mathbf{M}|}$, де $[A_{ik}]^T$ – транспонована матриця алгебраїчних доповнень елементів m_{ik} матриці \mathbf{M} , а $|\mathbf{M}|$ – її визначник, то:

$$\hat{m}_k = \frac{1}{|\mathbf{M}|} \sum_{l=0}^{2N_1} \bar{m}_l A_{l+1,k+1}. \quad (9)$$

Математичне сподівання оцінки (9) визначається як:

$$E\hat{m}_k = \frac{1}{|\mathbf{M}|} \sum_{l=0}^{2N_1} E\bar{m}_l A_{l+1,k+1}.$$

Враховуючи співвідношення:

$$\sum_{j=1}^{2N_1+1} m_{jk} A_{jl} = \begin{cases} |\mathbf{M}|, & k=l, \\ 0, & k \neq l, \end{cases}$$

приходимо до висновку, що оцінки найменших квадратів компонентів m_0 , m_k^c і m_k^s для довільних $\theta \in \text{незміщеними}$: $E\hat{m}_k^c = m_k^c$, $E\hat{m}_k^s = m_k^s$. З незміщеності оцінок \hat{m}_0 , \hat{m}_k^c і \hat{m}_k^s впливає незміщеність оцінки математичного сподівання (2).

Для знаходження дисперсії оцінки математичного сподівання, враховуючи (7), подамо її у вигляді:

$$\hat{m}(t) = \frac{1}{|\mathbf{M}|} \sum_{l=0}^{2N_1} \bar{m}_l f_l(t),$$

де:

$$f_l(t) = A_{l+1,1} + \sum_{k=1}^{N_1} \begin{pmatrix} A_{l+1,K+1} \cos k\omega_0 t + \\ + A_{l+1,K+N_1+1} \sin k\omega_0 t \end{pmatrix} = \sum_{k=-N_1}^{N_1} C_{lk} e^{ik\omega_0 t},$$

при цьому:

$$C_{l0} = A_{l+1,1}, \quad C_{lk} = \frac{1}{2} (A_{l+1,K+1} - iA_{l+1,K+N_1+1}), \\ C_{l,-k} = \bar{C}_{lk}.$$

Тут « $\bar{}$ » – знак спряження. Тоді:

$$D[\hat{m}(t)] = E[m(t) - \hat{m}(t)]^2 = \\ = \frac{1}{|\mathbf{M}|^2} \sum_{l,r=0}^{2N_1} R_{\bar{m}_l \bar{m}_r} f_l(t) f_r(t),$$

де $R_{\bar{m}_l \bar{m}_r}$ – кореляції між випадковими величинами \bar{m}_l і \bar{m}_r : $R_{\bar{m}_l \bar{m}_r} = E(\bar{m}_l - E\bar{m}_l)(\bar{m}_r - E\bar{m}_r)$. При $l=r$ це будуть їх дисперсії: $R_{\bar{m}_l \bar{m}_l} = Dm_l$.

Виходячи із співвідношень (6)–(8), маємо:

$$R_{\bar{m}_l \bar{m}_r} = \frac{1}{\theta^2} \int_0^\theta \int_0^\theta b(t,s-t) \begin{Bmatrix} \cos l\omega_0 t & \cos r\omega_0 s \\ \sin l\omega_0 t & \sin r\omega_0 s \end{Bmatrix} dt ds.$$

Величини $R_{\bar{m}_l \bar{m}_r}$ прямують до нуля при $\theta \rightarrow \infty$ і виконується гранична рівність:

$$\lim_{|\theta| \rightarrow \infty} b(t,u) = 0.$$

Остання рівність є достатньою умовою слушності оцінки найменших квадратів математичного сподівання ПКВП.

Оцінки характеристик модульованих сигналів.

Конкретизуємо отримані результати для випадку, коли $\xi(t) = \xi_c(t) \cos w_0 t + \xi_s(t) \sin w_0 t$. Оцінки \hat{m}_c і \hat{m}_s знаходяться як точки мінімуму функціоналу:

$$\hat{F}(\hat{m}_c, \hat{m}_s) = \int_0^\theta (\xi(t) - \hat{m}_c(t) \cos \omega_0 t - \hat{m}_s(t) \sin \omega_0 t)^2 dt,$$

і є розв'язками системи лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \hat{m}_c c_{11} + \hat{m}_s a_{11} = \bar{m}_1, \\ \hat{m}_c a_{11} + \hat{m}_s s_{11} = \bar{m}_2, \end{cases}$$

де:

$$\bar{m}_1 = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) \cos \omega_0 t dt, \quad \bar{m}_2 = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) \sin \omega_0 t dt,$$

тобто:

$$\hat{m}_c = \frac{1}{|\mathbf{M}|} (\bar{m}_1 s_{11} - \bar{m}_2 a_{11}),$$

$$\hat{m}_s = \frac{1}{|\mathbf{M}|} (\bar{m}_2 c_{11} - \bar{m}_1 a_{11}),$$

$$|\mathbf{M}| = c_{11} s_{11} - a_{11}^2.$$

Можна перекоонатися, що ці оцінки є незміщеними для довільних θ , тобто:

$$E\hat{m}_c = \frac{1}{|\mathbf{M}|} \left[\frac{c_{11}}{\theta} \int_0^\theta [m_c(t) \cos \omega_0 t + m_s(t) \sin \omega_0 t] \cos \omega_0 t dt - \right. \\ \left. - \frac{a_{11}}{\theta} \int_0^\theta [m_c(t) \cos \omega_0 t + m_s(t) \sin \omega_0 t] \sin \omega_0 t dt \right] = \\ = \frac{m_c}{|\mathbf{M}|} (c_{11} s_{11} - a_{11}^2) = m_c,$$

$$E\hat{m}_s = \frac{1}{|\mathbf{M}|} \left[\frac{c_{11}}{\theta} \int_0^\theta [m_c(t) \cos \omega_0 t + m_s(t) \sin \omega_0 t] \sin \omega_0 t dt - \right. \\ \left. - \frac{a_{11}}{\theta} \int_0^\theta [m_c(t) \cos \omega_0 t + m_s(t) \sin \omega_0 t] \cos \omega_0 t dt \right] = \\ = \frac{m_s}{|\mathbf{M}|} (c_{11} s_{11} - a_{11}^2) = m_s.$$

Оцінку математичного сподівання подамо у вигляді:

$$\hat{m}(t) = \sum_{l=0}^2 \bar{m}_l f_l(t), \quad (10)$$

де:

$$f_l(t) = A_{l1} \cos \omega_0 t + A_{l2} \sin \omega_0 t = \sum_{k=-1}^1 C_{lk} e^{ik\omega_0 t} .$$

Очевидно, що:

$$A_{11} = s_{11}, A_{12} = -a_{11}, A_{21} = -a_{11}, A_{22} = c_{11} .$$

Тоді дисперсія оцінки (10) найменших квадратів:

$$D[\hat{m}(t)] = \gamma_0 + \gamma_2 e^{i2\omega_0 t} + \gamma_{-2} e^{-i2\omega_0 t} = \gamma_0 + \gamma_2^c \cos 2\omega_0 t + \gamma_2^s \sin 2\omega_0 t, \quad (11)$$

де:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \frac{1}{2|\mathbf{M}|^2} \left[(a_{11}^2 + s_{11}^2) D_{\bar{m}_1} - 2a_{11}(c_{11} + s_{11}) R_{\bar{m}_1 \bar{m}_2} + (a_{11}^2 + c_{11}^2) D_{\bar{m}_2} \right], \\ \gamma_2^c &= \frac{1}{2|\mathbf{M}|^2} \left[(s_{11}^2 - a_{11}^2) D_{\bar{m}_1} + 2a_{11}(c_{11} - s_{11}) R_{\bar{m}_1 \bar{m}_2} + (a_{11}^2 - c_{11}^2) D_{\bar{m}_2} \right], \\ \gamma_2^s &= -\frac{1}{|\mathbf{M}|^2} \left[a_{11} s_{11} D_{\bar{m}_1} - (a_{11}^2 + c_{11} s_{11}) R_{\bar{m}_1 \bar{m}_2} + a_{11} c_{11} D_{\bar{m}_2} \right]. \end{aligned}$$

Дисперсія компонентної оцінки:

$$\begin{aligned} \hat{m}(t) &= \left[\frac{2}{\theta} \int_0^\theta \xi(s) \cos \omega_0 s ds \right] \cos \omega_0 t + \\ &+ \left[\frac{2}{\theta} \int_0^\theta \xi(s) \sin \omega_0 s ds \right] \sin \omega_0 t \end{aligned}$$

також має вигляд (11), але тепер:

$$\gamma_0 = 2(D_{\bar{m}_1} + D_{\bar{m}_2}), \quad \gamma_2^c = 2(D_{\bar{m}_1} - D_{\bar{m}_2}), \quad \gamma_2^s = 4R_{\bar{m}_1 \bar{m}_2} .$$

Дисперсії випадкових величин \bar{m}_1 і \bar{m}_2 та їх кореляція визначаються співвідношеннями:

$$D_{\bar{m}_1} = \frac{1}{\theta^2} \int_0^\theta \int_0^\theta b(t, s-t) \cos \omega_0 t \cos \omega_0 s dt ds ,$$

$$D_{\bar{m}_2} = \frac{1}{\theta^2} \int_0^\theta \int_0^\theta b(t, s-t) \sin \omega_0 t \sin \omega_0 s dt ds ,$$

$$R_{\bar{m}_1 \bar{m}_2} = \frac{1}{\theta^2} \int_0^\theta \int_0^\theta b(t, s-t) \cos \omega_0 t \sin \omega_0 s dt ds .$$

Враховавши, що:

$$b(t, u) = B_0(u) + B_2^c(u) \cos 2\omega_0 t + B_2^s(u) \sin 2\omega_0 t ,$$

після перетворень у першому наближенні знаходимо:

$$D_{\bar{m}_1} = \frac{1}{2\theta} \int_0^\theta \left(1 - \frac{u}{\theta}\right) \left[2B_0(u) \cos \omega_0 u + B_2^c(u) \cos \omega_0 u - B_2^s(u) \sin \omega_0 u \right] du ,$$

$$D_{\bar{m}_2} = \frac{1}{2\theta} \int_0^\theta \left(1 - \frac{u}{\theta}\right) \left[2B_0(u) \cos \omega_0 u - B_2^c(u) \cos \omega_0 u + B_2^s(u) \sin \omega_0 u \right] du ,$$

$$R_{\bar{m}_1 \bar{m}_2} D_{\bar{m}_1} = \frac{1}{2\theta} \int_0^\theta \left(1 - \frac{u}{\theta}\right) \left[B_2^c(u) \sin \omega_0 u + B_2^s(u) \cos \omega_0 u \right] du .$$

Залежності кореляційних компонентів $B_0(u)$ і $B_2^{c,s}(u)$ від авто- та взаємкореляційних функцій квадратур $\xi_c(t)$ і $\xi_s(t)$ мають вигляд:

$$B_0(u) = \frac{1}{2} \left[R_c(u) + R_s(u) \right] \cos \omega_0 u + R_{cs}^-(u) \sin \omega_0 u ,$$

$$B_2^c(u) = \frac{1}{2} \left[R_c(u) - R_s(u) \right] \cos \omega_0 u + R_{cs}^+(u) \sin \omega_0 u ,$$

$$B_2^s(u) = R_{cs}^+(u) \cos \omega_0 u - \frac{1}{2} \left[R_c(u) - R_s(u) \right] \sin \omega_0 u .$$

Тут $R_{c,s}(u) = E \xi_{c,s}(t) \xi_{c,s}(t+u)$, а $R_{cs}^+(u)$ і $R_{cs}^-(u)$ – парна і непарна частини взаємкореляційної функції $R_{c,s}(u) = E \xi_{c,s}(t) \xi_{c,s}(t+u)$.

Покладемо:

$$R_c(u) = A_c e^{-\alpha_c |u|}, \quad R_s(u) = A_s e^{-\alpha_s |u|},$$

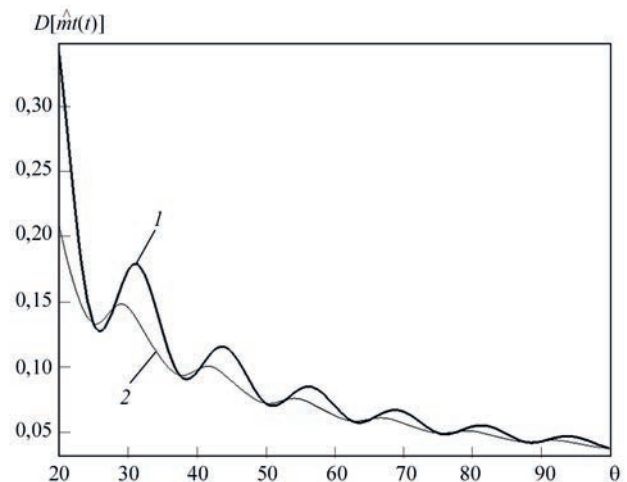


Рис. 1. Дисперсії оцінки найменших квадратів (1) і компонентної оцінки (2) математичного сподівання від кореляційних компонентів сигналу і довжин відрізка реалізації θ : $A_c = 0,6$; $A_s = 0,3$; $\alpha_c = 0,4$; $\alpha_s = 0,4$; $\alpha_{cs} = 0,2$; $T = 25$

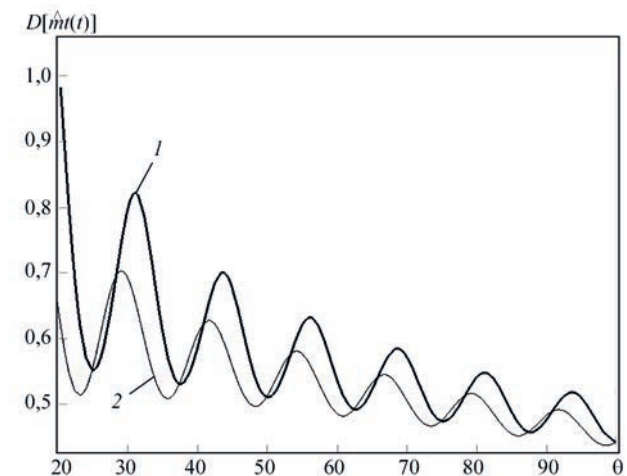


Рис. 2. Дисперсії оцінки найменших квадратів (1) і компонентної оцінки (2) математичного сподівання від кореляційних компонентів сигналу і довжин відрізка реалізації θ : $A_c = 0,6$; $A_s = 0,3$; $\alpha_c = 0,01$; $\alpha_s = 0,01$; $\alpha_{cs} = 0,005$; $T = 25$

$$R_{cs}^+(u) = A_{cs} e^{-\alpha_{cs}|u|}, R_{cs}^-(u) = 0$$

і обчислимо дисперсії компонентної оцінки та оцінки найменших квадратів для певних параметрів цих апроксимацій. Результати обчислень у вигляді графічних залежностей дисперсій від довжини реалізації θ показано на рис. 1, 2. Обидва графіки мають форму зникаючих осциляцій, при цьому амплітуда для оцінки найменших квадратів є більшою. Різниця між дисперсією стає більшою, якщо швидкість зникання кореляційних зв'язків зменшується. Однак значення дисперсій стають все ближчими, коли зростає довжина реалізації. Для довжин θ , які є більшими від $25\alpha T$, різницею між ними можна нехтувати.

Висновки

Таким чином, дисперсія оцінки математичного сподівання, що отримується за допомогою методу найменших квадратів, на відміну від компонентної оцінки є незміщеною для довільних довжин відрізка реалізації θ . Це означає, що в цьому випадку відсутній ефект просочування.

Дисперсія оцінки найменших квадратів, як показують результати обчислень, може бути суттєво більшою від дисперсії компонентної тільки при обробці коротких реалізацій. При цьому різниця між ними є більшою для повільно зникаючих кореляційних зв'язків. При великих довжинах реалізацій різниця між ними є нехтовно малою.

Наведені властивості оцінки найменших квадратів слід враховувати при обробці сигналів, довжини реалізацій яких містять мале число періодів нестационарності. Зауважимо, що подібні властивості має оцінка кореляційної функції (3) у випадку, коли оцінки кореляційних компонентів знаходяться як розв'язки системи лінійних рівнянь (5).

Список літератури/References

1. Яворський І.М. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів.
2. Javorskyj, I.M. (2013) *Mathematical models and analysis of stochastic oscillations*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
3. Hurd, H.L. (1991) Correlation theory of almost periodically correlated processes. *J. Multivariate Anal.*, **37**, 24–45. DOI: [https://doi.org/10.1016/0047-259X\(91\)90109-F](https://doi.org/10.1016/0047-259X(91)90109-F)
4. Matsko, I., Javorskyj, I., Isaev, I. et al. (2009) Methods for enhancement of the efficiency of statistical analysis of vibration signals from the bearing supports of turbines at thermal-electric power plants. *Mater. Sci.*, **45**(3), 378–391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9202-7>
5. Javorskyj, I., Kravets, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. (2017) Periodically correlated random processes: application in early diagnostics of mechanical systems. *Mech. Syst. and Sign. Process.*, **83**, 406–438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.022>
6. Javorskyj, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. et al. (2021) Methods of Hidden Periodicity Discovering for Gearbox Fault Detection. *Sensors*, **21**(18), 6138. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21186138>
7. McCormick, A.C.; Nandi, A.K. (1998) Cyclostationarity in rotating machine vibrations. *Mech. Syst. and Sign. Process.*, **12**(2), 225–242. DOI: <https://doi.org/10.1006/mssp.1997.0148>
8. Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis. *Mech. Syst. and Sign. Process.*, **14**(3), 371–385. DOI: <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1260>
9. Dalpiaz, G., Rivola, A., Rubini, R. (2000) Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears. *Mech. Syst. and Sign. Process.*, **14**(3), 387–412. DOI: <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1294>
10. Bouillout, L., Sidahmed, M. (2001) Cyclostationary approach and bilinear approach: comparison, applications to early diagnostics for helicopter gearbox and classification method based on HOCS. *Mech. Syst. and Sign. Process.*, **15**(5), 923–943. DOI: <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1412>
11. Antoniadis, I., Glossiotis, G. (2001) Cyclostationary analysis of rolling element bearing vibration signals. *J. Sound Vib.*, **248**(5), 829–845. DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3815>
12. Antoni, J., Bonnardot, F., Raad, A., El Badaoui, M. (2004) Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. *Mech. Syst. and Sign. Process.*, **18**, 1285–1314. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00088-8)
13. Li, L., Qu, L. (2003) Cyclic statistics in rolling bearing diagnosis. *J. Sound Vib.*, **267**(2), 253–265. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01412-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01412-8)
14. Zhu, Z., Kong, F. (2005) Cyclostationary analysis for gearbox condition monitoring: approaches and effectiveness. *Mech. Syst. and Sign. Process.*, **19**(3), 467–482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.02.007>
15. (1994) *Cyclostationarity in Communications and Signal Processing*. Ed. by W.A. Gardner. IEEE Press, New York.
16. Gardner, W.A. (1985) *Introduction to Random Processes with Application to Signals and Systems*. New York, Macmillan.
17. Hurd, H.L., Miamee, A. (2007) *Periodically Correlated Random Sequences. Spectral Theory and Practice*. Wiley-Interscience, New Jersey.
18. Dehay, D., Hurd, H.L. (1994) *Representation and estimation for periodically and almost periodically correlated random processes. Cyclostationarity in Communications and Signal Processing*. IEEE Press, New York, 295–326.
19. Antoni, J. (2009) Cyclostationarity by examples. *Mech. Syst. and Sign. Process.*, **23**(4), 987–1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2008.10.010>
20. Randall, R.B., Antoni, J. (2011) Rolling element bearing diagnostics – A tutorial. *Mech. Syst. and Sign. Process.*, **25**(2), 485–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.07.017>
21. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Zakrzewski, Z. (2022) The least square estimation of the basic frequency for periodically non-stationary random signals. *Digit. Signal Process.*, **122**, 103333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103333>

SELECTION AND ANALYSIS OF THE DETERMINISTIC COMPONENT OF VIBRATIONS BY THE LEAST SQUARES METHOD

R.M. Yuzefovych^{1,2}, I.M. Javorskyj^{1,3}, O.V. Lychak¹, V.V. Gnatyshyn², M.Z. Varyvoda¹

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Lviv Polytechnic National University. 12 S. Bandery str., 79000, Lviv, Ukraine.

³Bydgoszcz University of Sciences and Technology. 7, Prof. S. Kaliskiego al., 85796, Bydgoszcz, Poland.

The results of investigations by the least squares method of the mathematical expectation of periodically nonstationary random processes as a mathematical model of stochastic vibrations are considered. Analysis of the dependencies which determine the statistical characteristics of evaluation was performed. Examples of analysis of typical processes are given. 20 Ref., 2 Fig.

Keywords: periodically correlated random processes (PCRP), vibration, mathematical expectation, correlation function, evaluation by the least squares method, dispersion

Надійшла до редакції 28.04.2023

НЕРУЙНІВНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ НА БАЗІ ПОЄДНАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ТА ЕЛЕКТРОННОЇ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Л.М. Лобанов¹, В.В. Книш¹, М.О. Пашин¹, В.Г. Кот¹, О.Л. Міходуй¹, Є.Д. Пекар¹,
Luyi Huang², А.О. Альошин³

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

²Zhejiang Special Equipment Research Institute. 211 Kaixuan Road, Hangzhou, China. E-mail: yuxf@zjtj.org

³ТОВ «Зовнішньоекономічне представництво Китайсько-українського Інституту зварювання ім. Є.О. Патона». 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: ft.cupiw.pwi@gmail.com

Встановлено, що поєднання переваг ультразвукового методу та електронної спекл-інтерферометрії при усуненні їх недоліків є підставою для розробки методу неруйнівного визначення залишкових зварювальних напружень у натурних конструкціях. Розроблено методику неруйнівного визначення розподілу залишкових зварювальних напружень розтягу в зоні шва стикового з'єднання, яка базується на сумісному застосуванні ультразвукового методу і електронної спекл-інтерферометрії та дотриманні умови «рівності площ» епюр зрівноважених залишкових напружень стиску та розтягу. Методику запропоновано для використання на зразках однопрохідних зварних з'єднань тонколистових конструкцій з металевих матеріалів зі стабільною структурою. Предметом дослідження є залишкові зварювальні напруження у зразку стикового з'єднання зі структурно стабільного алюмінієвого сплаву 1561, який було виконано зварюванням MIG. Проведено оцінювання поздовжньої по відношенню до зварного шва компоненти σ_x залишкових зварювальних напружень на центральній ділянці пластини. Встановлено, що розходження значень залишкових зварювальних напружень біля центру зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 1561 становить близько $0,1\sigma_{0,2}$ для даного матеріалу, що відповідає заявленій точності методів. За результатами досліджень запропоновано низку методик неруйнівного визначення залишкових зварювальних напружень у натурних зварних конструкціях на базі поєднання ультразвукового методу та електронної спекл-інтерферометрії. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: залишкові зварювальні напруження, ультразвуковий метод (УЗ-метод), електронна спекл-інтерферометрія (ESPI-метод), зразок стикового з'єднання, зварювання MIG, напруження стиску та розтягу, поздовжня компонента напружень, алюмінієвий сплав, методика неруйнівного визначення напружень

Вступ. Актуальність та мета роботи. Залишкові зварювальні напруження (ЗЗН), що виникають після зварювання в елементах конструкцій, є одним з факторів, які визначають міцність, надійність і довговічність виробів. Для інженерної практики традиційно актуальною є розробка та вдосконалення експериментальних методів визначення напружень, які поділені на дві групи – руйнівні та неруйнівні [1].

Руйнівні методи базуються на вимірюванні деформацій, що виникають при повному або частковому руйнуванні елемента зварної конструкції. Вони є досить поширеними у наукових дослідженнях. Але на натурних виробках з високою собівартістю та на конструкціях, що експлуатуються, застосування руйнівних методів не завжди є доцільним. Тому в інженерній практиці використовуються неруйнівні методи оцінки ЗЗН, при реалізації яких конструкція, що досліджується, за-

лишається неушкодженою. Це є основною перевагою неруйнівних методів перед руйнівними.

З неруйнівних методів найвідомішими є рентгенівський, магнітний та ультразвуковий (УЗ-метод) [2]. Останній застосовується в теперішній час як в промисловості України, так і за кордоном для вимірювання усереднених за товщиною матеріалу залишкових напружень [3–5]. Але для коректної оцінки ЗЗН УЗ-метод має певні обмеження, які пов'язані з особливостями формування зварних з'єднань. Так, зону розтягу (активну) ЗЗН у зварному шві та на ділянці навколо нього формує поле пластичних деформацій стиску, значення яких характеризуються досить високим градієнтом. Достовірне оцінювання компонент плоского напруженого стану при застосуванні УЗ-методу, що базується на розповсюдженні пружних хвиль у металевих матеріалах, можливе лише в полі пружних напружень [1]. У зоні розтягуючих ЗЗН, які сформувалися внаслідок пластичного деформу-

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Книш В.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1289-4462>,

Пашин М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Кот В.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4759-9992>,

Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Luyi Huang – <https://orcid.org/0000-0003-4155-2824>,

Альошин А.О. – <https://orcid.org/0000-001-9696-6800>

© Л.М. Лобанов, В.В. Книш, М.О. Пашин, В.Г. Кот, О.Л. Міходуй, Є.Д. Пекар, Luyi Huang, А.О. Альошин, 2023

вання металу шва та пришовної зони при усадці наплавленого металу, значення пружно-акустичних коефіцієнтів відрізняються від їх значень у пружно-деформованому металі [6]. Це знижує достовірність оцінки ЗЗН у пластично-деформованій зоні металу без встановлення їх значень для цієї зони [7].

Для інженерної практики актуальним є отримання достовірних значень ЗЗН розтягу, які (на відміну від ЗЗН стиску) чинять негативний вплив на довговічність зварних конструкцій. До того ж, значення ЗЗН при застосуванні УЗ-методу усереднюються на вимірвальній базі $V_{УЗ}$ давача УЗ-хвиль, яка становить 10 мм. Напівширина розподілу ЗЗН розтягу в зоні шва, які мають високий градієнт, є співставною з величиною $V_{УЗ}$. Тому використання УЗ-методу не дозволяє встановлювати пікові значення ЗЗН у центрі шва та близько до нього. Проте визначення ЗЗН УЗ-методом у реактивній зоні стиску, яка характеризується незначним градієнтом напружень, відсутністю пластичних деформацій та усадки металу шва, реалізується із задовільною точністю (табл. 1).

У сучасних дослідженнях для визначення ЗЗН застосовують метод електронної спекл-інтерферометрії (ESPI-метод), що базується на пружному розвантаженні ЗЗН унаслідок висвердлювання отворів діаметром $d_{отв}$ і глибиною $h_{отв}$ до 1 мм на поверхнях досліджуваних ділянок зварного з'єднання, і може вважатися умовно неруйнівним [8]. ЗЗН розтягу при вимірюванні ESPI-методом усереднюються на базі $V_{ESPI} = d_{отв}$. Це реалізує локалізоване визначення ЗЗН, тобто мінімізує їх усереднення за рахунок малої бази вимірювання, наслідком чого є висока достовірність оцінки пікових значень напружень у центрі шва (на відміну від УЗ-методу).

Характеристики, переваги та недоліки обох методів оцінки ЗЗН узагальнено у табл. 1, з даних

Таблиця 1. Характеристики методів оцінки ЗЗН

Номер	Метод визначення ЗЗН/Наявність стандарту	Товщина металу із ЗЗН δ , мм	База вимір. V , мм	Точність методу	Переваги методу	Недоліки методу
1	ESPI-метод/ДСТУ 8852:2019	≥ 2	1,0	$\pm 0,1\sigma_{0,2}$ на усіх ділянках ЗЗН	1. Можливість реєстрації ЗЗН на поверхні металу і мембранних. 2. Можливість реєстрації ЗЗН на базі $V_{ESPI} = 1$ мм.	1. Локальне пошкодження поверхні при свердленні. 2. Труднощі при свердленні твердих матеріалів.
2	УЗ-метод/Немає	≥ 3	10,0	$\pm 0,1\sigma_{0,2}$ у зонах з'єднань, у яких експериментально встановлені значення пружно-акустичних коефіцієнтів	1. Відсутня потреба в руйнуванні металу при реєстрації ЗЗН. 2. Можливість застосування методу на натурних конструкціях.	1. Неможливість отримання ЗЗН на поверхні металу. 2. Усереднення ЗЗН на базі вимірювання $V_{УЗ} = 10$ мм. 3. Необхідність визначення пружно-акустичних коефіцієнтів різних зон зварного з'єднання.

якої можна бачити, що поєднання переваг обох методів при виключенні їх недоліків дозволить підвищити достовірність неруйнівного визначення ЗЗН у натурних зварних конструкціях.

Метою роботи є розробка методики оцінки ЗЗН, яка базується на поєднанні переваг УЗ- і ESPI-методів.

Методика, об'єкт та предмет досліджень. У якості об'єкта досліджували процеси визначення ЗЗН у зразку стикового з'єднання при застосуванні УЗ- та ESPI-методів.

Досліджували ЗЗН у зварних з'єднаннях з алюмінієвого сплаву зі стабільною структурою, при зварюванні якого в зоні плавлення і ЗТВ не відбуваються мікроструктурні фазові перетворення, які пов'язані з об'ємними ефектами та можуть призвести до зміни залишкових напружень з розтягуючих до стискаючих.

Розгляд залишкового напруженого стану зварного з'єднання при порівнянні мембранних і поверхневих напружень є коректним для малих товщин і при зварюванні за один прохід. Тому предметом дослідження були ЗЗН у пластині із структурно стабільного алюмінієвого сплаву 1561 розмірами $320 \times 205 \times 5$ мм з поздовжнім стиковим швом (рис. 1, а), який було виконано зварюванням MIG за один прохід. Зовнішній вигляд макрошліфа зварного з'єднання показано на рис. 1, б. Режим зварювання MIG, залишкові поздовжні f_1-f_3 і поперечні Δ_1, Δ_2 прогини пластини після зварювання представлено в табл. 2.

Можна бачити, що величини f_1-f_3 і Δ_1, Δ_2 є незначними і не перевищують 1,5 мм, що виключає значні відмінності між величинами мембранних ЗЗН і на поверхнях пластини.

Проводили діагностику поздовжньої (вздовж зварного шва) компоненти σ_x ЗЗН на центральній ділянці пластини із застосуванням ESPI- та УЗ-методів [8, 9]. Вибір компоненти σ_x (рис. 1)

Таблиця 2. Режими зварювання MIG і прогини зразка стикового з'єднання зі сплаву 1561

Швидкість зварювання $V_{зв}$, мм/с	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Напруга зварювання U , В	Марка/діаметр присадки $d_{пр}$, мм	$f_1^*/f_2/f_3$, мм	Δ_1/Δ_2 , мм	$\sigma_{0,2}$, МПа (для ОМ)
10	240	26,5	ER5356/1,6	1,0/1,5/1,2	1,5/1,5	180

Примітка. f_1^* і f_3 – прогини поздовжніх крайків пластини; f_2 – поздовжній прогин пластини вздовж зварного шва; Δ_1 і Δ_2 – прогини поперечних крайків пластини відповідно на початку та кінці зварного шва; ОМ – основний метал.

для оцінювання ЗЗН обумовлено її більшими значеннями на ділянці розтягу (у порівнянні з поперечною компонентою σ_y). Наслідком цього є вагомий вплив σ_x (у порівнянні з σ_y) на особливості навантаження з'єднань в умовах експлуатації.

При реєстрації значень напружень σ_x із використанням УЗ-методу здійснювали пересування давача УЗ-хвиль по поверхні пластини з боку кореня шва вздовж її центрального поперечного перерізу у напрямках, що вказані пунктирними стрілками на рис. 1, а.

При застосуванні ESPI-методу реєстрацію значень напружень на поверхні зразка σ_x виконували з обох боків пластини в центрі шва та на відстані 7 мм від нього у напрямках згідно з пунктирною стрілкою (рис. 1, а). Величини мембранних σ_x отримували усередненням за товщиною значень напружень на поверхні зразка на відповідних ділянках зовнішньої і зворотної поверхонь пластини.

Результати експериментів та їх обговорення. На рис. 2 представлено розподіли напружень σ_x (крива 1) у центральному поперечному перерізі зразка зварного з'єднання (рис. 1), які отримано УЗ-методом. Пряма 2 відображає градієнт збільшення ЗЗН розтягу в активній зоні.

З урахуванням того, що застосування УЗ-методу виключає визначення напружень у центрі шва, оцінювання величини σ_x на даній ділянці здійснювали ESPI-методом (точка D на рис. 2). Епю-

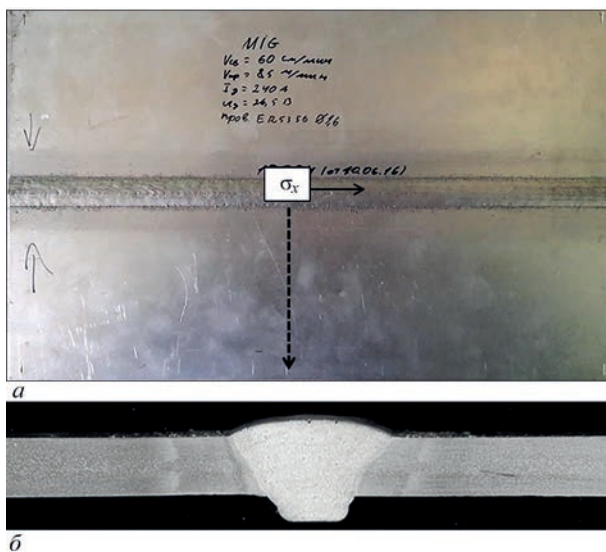


Рис. 1. Зразок стикового з'єднання зі сплаву 1561: а – зовнішній вигляд зразка стикового з'єднання, де суцільною стрілкою показано напрямком дії σ_x , пунктиром – напрямком реєстрації напружень методами дії УЗ та ESPI; б – макрошліф зварного з'єднання

ри ЗЗН розтягу та стиску повинні мати рівні площі, тобто бути «врівноваженими». Таким чином, площа $S1$ криволінійної поверхні між віссю 0–Y і кривою AB (зона стиску) повинна дорівнювати площі $S2$ чотирикутника BCDO (зона розтягу) (рис. 2). Проте в цьому чотирикутнику положення точки C залишається невизначеним на прямій 2, оскільки УЗ-метод не дозволяє виконувати вимірювання розтягуючих напружень σ_x на ділянці, близькій до металу шва.

У чотирикутнику BCDO є незмінними довжина сторони BO (розмір ширини зони розтягуючих напружень) і довжина сторони DO біля прямого кута, яка у вибраному масштабі осі ординат відповідає значенню розтягуючих напружень σ_x у центрі шва, що були отримані ESPI-методом. Таким чином, умова рівності площ $S1 = S2$ задається положенням точки C на прямій 2 (рис. 2). Координата цієї точки C на осі ординат (при виконанні умови $S1 = S2$) визначає величину напружень σ_x на ділянці біля зварного шва, а на осі абсцис 0–Y – центру шва. Таким чином, виконання умови $S1 = S2$ визначає положення точки C на прямій 2 (рис. 2).

Розподіл напружень σ_x у центральному поперечному перерізі пластини (УЗ-метод), який подовжено до точки C, наведено на рис. 3 (крива 1). Координати точки C визначені за умови рівності

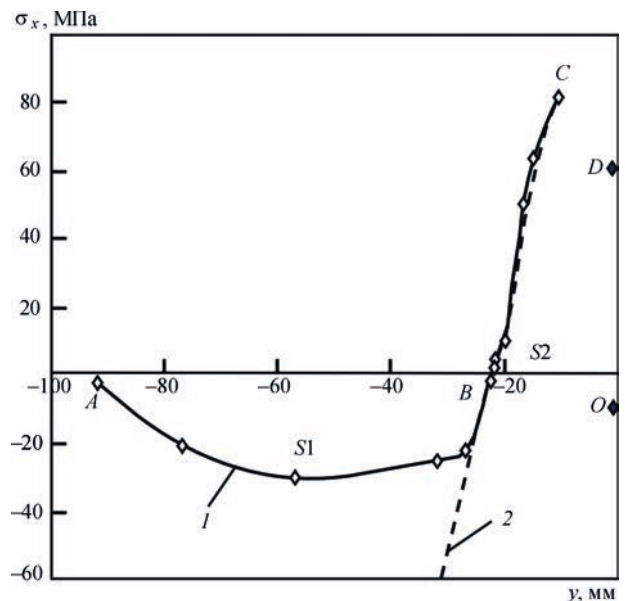


Рис. 2. Напруження σ_x у центральному поперечному перерізі зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561 (рис. 1), отримані УЗ-методом (крива 1) та ESPI-методом (точка D), де 2 – пряма, що відображає градієнт зростання розтягуючих ЗЗН, $S1$ – площа епюри стиску, $S2$ – площа епюри розтягу

відповідних площ епюр розтягу і стиску. Із застосуванням ESPI-методу отримано значення мембранних σ_x у центрі шва (точка D) та біля нього (точка $C1$), які відображено прямою 2. Слід зазначити, що отримання достовірних значень величин σ_x на ділянці $C1-D$ неможливе УЗ-методом.

При порівнянні значень σ_x у точках C і $C1$ (рис. 3), отриманих методами УЗ і ESPI відповідно, можна бачити, що їх розходження не перевищує 18 МПа, тобто близьке до $0,1\sigma_{0,2}$ для сплаву 1561 (табл. 2), що відповідає заявленій точності (табл. 1).

Виходячи з наведених вище результатів, перспективною представляється методика діагностування ЗЗН у тонколистових натурних конструкціях з однопрохідними зварними швами, яка базується на сумісному застосуванні методів УЗ і ESPI. Але слід зазначити, що запропонована методика має певні обмеження. Так, при значних товщинах і багатопрохідному зварюванні завжди присутній нерівномірний розподіл залишкових напружень по товщині, навіть зі зміною знака, і визначення усереднених по товщині напружень не представляє інтересу. Усунення цих обмежень є напрямком подальших досліджень, у тому числі із застосуванням методів, що базуються на інших фізичних принципах.

Можливим є застосування методики у трьох варіантах.

Варіант 1 (рис. 4) – експрес-оцінка ЗЗН УЗ-методом, яка дозволяє швидко провести неруйнівне визначення загального рівня напружень розтягу в активній зоні на натурній конструкції. При застосуванні методики приймається умова рівності напружень в центрі шва (точка D) та біля нього

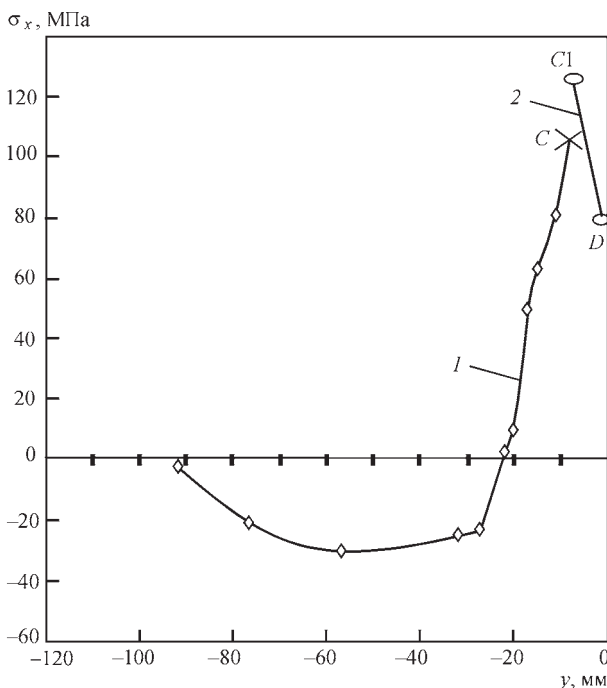


Рис. 3. Залишкові напруження σ_x у центральному поперечному перерізі зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561 (рис. 1), отримані УЗ-методом (крива 1) та ESPI-методом (крива 2)

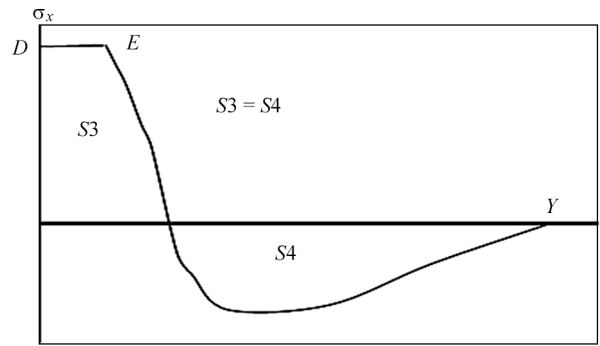


Рис. 4. Епюра мембранних ЗЗН, яку отримано із застосуванням методики за варіантом 1, де $S3$ і $S4$ – площі епюр розтягу та стиску відповідно, точки D і E – значення ЗЗН у центрі шва та в зоні сплавлення

(точка E). При цьому геометрична форма епюри розтягу приймається у вигляді трапеції (рис. 4). Це виключає визначення особливостей формування ЗЗН на центральній ділянці з'єднання, що є недоліком даної методики попри такі її переваги, як швидкість і легкість реалізації.

1. Етапи оцінювання ЗЗН за варіантом 1:

1.1. Визначається УЗ-методом розподіл ЗЗН в реактивній зоні (стиску).

1.2. Вираховується площа епюри $S4$ стиску (рис. 4).

1.3. За умови $S3 = S4$ вираховується висота трапеції площею $S3$ епюри розтягуючих напружень (рис. 4), яка на осі ординат визначає значення ЗЗН у точках D (центр шва) і E (зона сплавлення).

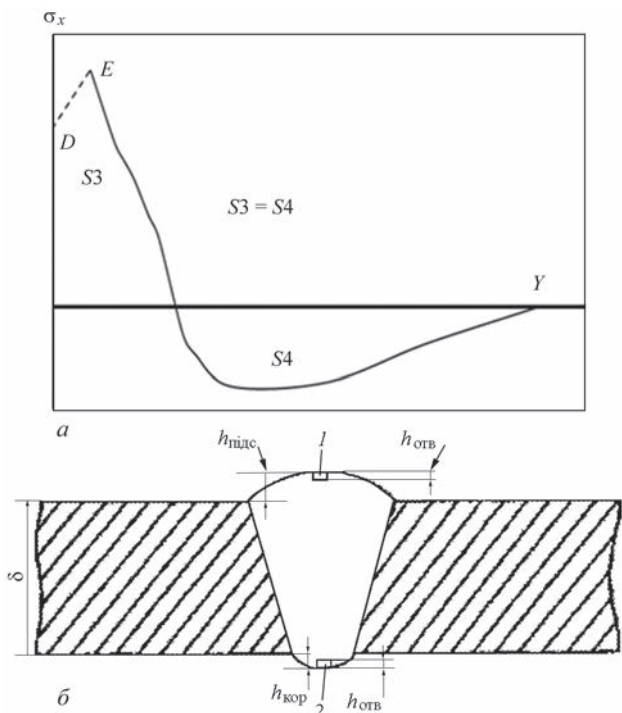


Рис. 5. Методика оцінювання ЗЗН за варіантом 2: a – епюра мембранних ЗЗН, де площі $S3$, $S4$, точки D і E – аналогічно рис. 4; b – розташування отворів 1 і 2 для оцінювання напружень ESPI-методом відповідно на зовнішній і зворотній поверхнях зварного шва

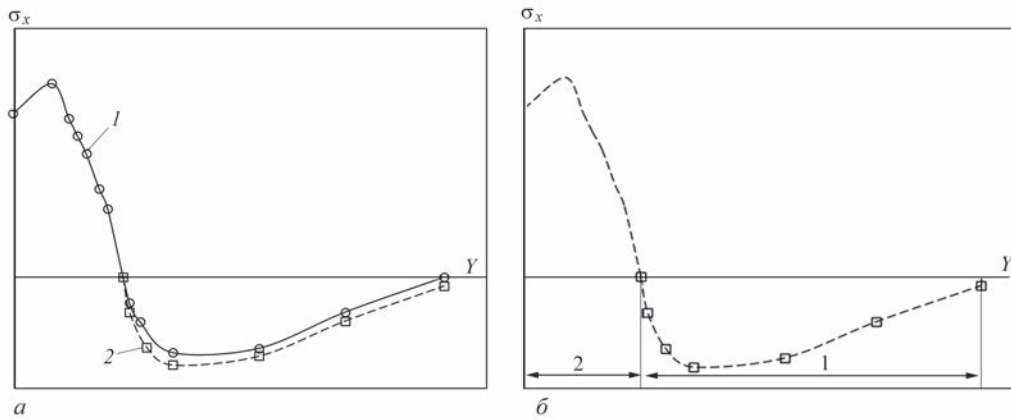


Рис. 6. Методика оцінювання ЗЗН за варіантом 3: а – крива 1 – епюра мембранних ЗЗН, отримана ESPI-методом на зразку-свідку; крива 2 – епюра мембранних ЗЗН, отримана УЗ-методом у реактивній зоні стиску зразка-свідка; б – 1 – ділянка епюри мембранних ЗЗН стиску, отриманої УЗ-методом на конструкції, 2 – ділянка епюри мембранних ЗЗН розтягу, яка побудована за методом аналогій

Варіант 2 – оцінка ЗЗН (рис. 5) поєднанням методів ESPI та УЗ, що дозволяє отримати значення ЗЗН розтягу в активній зоні на натурній конструкції при мінімальному механічному впливі на поверхню металу шва.

Мінімізація впливу досягається завдяки застосуванню ESPI-метода для визначення ЗЗН (на рис. 5, а, точка D) виключно на ділянках підсилення кореня у центрі шва (за умови вільного доступу до них). При цьому висоти підсилення $h_{\text{підс}}$ і кореня $h_{\text{кор}}$ зварного шва мають бути більшими за $h_{\text{отв}}$, як показано на рис. 5, б. Після визначення величин ЗЗН на обох поверхнях шва отвори для реєстрації напружень можуть бути (при необхідності) видалені механічним зняттям із зазначених поверхонь шарів металу за умови зберігання товщини δ робочого перерізу основного металу.

2. Етапи оцінювання ЗЗН за варіантом 2:

2.1. ESPI-методом визначається значення мембранних ЗЗН в центрі шва (на рис. 5, а, точка D).

2.2. УЗ-методом визначається розподіл ЗЗН в реактивній зоні (стиску).

2.3. Вираховується площа напружень стиску S_4 (рис. 5, а).

2.4. За умови $S_3 = S_4$, де S_3 – площа епюри напружень розтягу, вираховуються координати точки E і відповідне значення ЗЗН (рис. 5, а) аналогічно до методики, що відповідає рис. 2.

Варіант 3 – неруйнівна оцінка ЗЗН (рис. 6) в натурних конструкціях шляхом поєднання методів ESPI та УЗ із супутнім застосуванням зразка-свідка з аналогічного матеріалу. Методика дозволяє на базі методу аналогій отримати значення мембранних ЗЗН розтягу у зразку, які дорівнюють напруженням у натурній конструкції. Похибка між розподілами ЗЗН стиску у зразку та конструкції не має перевищувати заявленої точності методів (табл. 1). Це досягається еквівалентністю таких складових критерію подібності зразка та

конструкції, як їх геометричні характеристики та режими зварювання.

3. Етапи оцінювання ЗЗН за варіантом 3 (рис. 6):

3.1. ESPI-методом визначається розподіл мембранних ЗЗН у зразку-свідку (на рис. 6, а, крива 1).

3.2. УЗ-методом визначається розподіл ЗЗН в реактивній зоні (стиску) у зразку-свідку (на рис. 6, а, крива 2).

3.3. УЗ-методом визначається розподіл ЗЗН в реактивній зоні (стиску) в натурній конструкції (на рис. 6, б, ділянка 1).

3.4. Проводиться порівняння характеристик епюр напружень стиску зразка та конструкції відповідно до кривої 2 (рис. 6, а) і кривої на ділянці 1 (рис. 6, б) та встановлюється їх ідентичність у межах прийнятої похибки вимірювань.

3.5. З урахуванням результатів п. 3.4 (ідентичності епюр напружень стиску зразка та конструкції) методом аналогій будується розподіл ЗЗН розтягу в конструкції (на рис. 6, б, ділянка 2).

Аналізуючи наведені вище результати, слід зазначити, що сумісне застосування УЗ- та ESPI-методів дозволяє мінімізувати їх недоліки (табл. 1) при поєднанні їх переваг. Це створює передумови для розробки низки методик неруйнівного визначення напружених станів у натурних зварних конструкціях.

Висновки

1. Встановлено, що поєднання переваг УЗ- та ESPI-методів при усуненні їх недоліків є підставою для розробки методу неруйнівного визначення ЗЗН у натурних конструкціях.

2. Встановлено, що відмінність значень ЗЗН розтягу в зоні шва стикового зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 1561, отриманих УЗ- і ESPI-методами, є близькою до показника $0,1\sigma_{0,2}$ для даного матеріалу, що відповідає заявленій точності методів.

3. Розроблено методику неруйнівного визначення пікових значень і розподілу ЗЗН розтягу в зоні шва стикового зварного з'єднання, яка базується на сумісному застосуванні УЗ- і ESPI-методів та дотриманні умови «рівності площ» епюр зрівноважених залишкових напружень розтягу та стиску.

4. За результатами досліджень запропоновано три різновиди методик неруйнівного визначення ЗЗН у натурних зварних конструкціях на базі поєднання УЗ- і ESPI-методів.

Список літератури

1. Гузь А.Н. (1986) *Упругие волны в телах с начальными напряжениями. Т.2. Закономерности распространения*. Киев, Наукова думка.
2. Касаткин Б.С. и др. (1981) *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений*. Киев, Наукова думка.
3. Луценко Т.М. (2022) Нові системи та технології неруйнівного контролю для промисловості України за поточних умов. *Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України: Тези допов. наук. конф.* Київ, Міжнародна Асоціація «Зварювання», 66.
4. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. (2000) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded railway bridge. *Structural Materials Technology. NDT Conference. Atlantic City, NJ, February 28–March 3, 2000*, pp. 213–218.
5. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Polezhaeva, H. (2011) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded elements of ship structure. *Applied Mechanics and Materials*, **70**, 273–278. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.70.273>
6. Javadi, Y., Akhlaghi M., Najafabadi M. (2013) Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. *J. Mater. Des.*, **45**, 628–642. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.038>
7. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуща О.Й. (1977) *Введение в акустоупругость*. Киев, Наукова думка.

8. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, **1**, 25–30.
9. Гуща О. Й., Махорт Ф. Г. (1995) Применение акустического метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 8–15.

References

1. Guz, A.N. (1986) Elastic waves in bodies with initial stresses. Vol. 2: Regularities of propagation. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Kasatkin, B.S. et al. (1981) Experimental methods of stresses and strains examination. Kyiv, Nukova Dumka [in Russian].
3. Lutsenko, T.M. (2022) New systems and technologies of non-destructive testing for industry of Ukraine under current conditions. In: *Abstr. of Papers of Sci. Conf. on Welding and Technical Diagnostics for Economic Revival of Ukraine*. IAW, 66 [in Ukrainian].
4. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. (2000) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded railway bridge. *Structural Materials Technology. NDT Conf. (Atlantic City, NJ, February 28–March 3, 2000)*, 213–218.
5. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Polezhaeva, H. (2011) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded elements of ship structure. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. **70**, 273–278. DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.70.273>
6. Javadi, Y., Akhlaghi M., Najafabadi M. (2013) Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. *J. Mater. Des.*, Vol. **45**, 628–642. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.038>
7. Guz, A.N., Makhort, F.G., Gushcha, O.J. (1977) Introduction into acousto-elasticity. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
8. 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.
9. Gushcha, O.J. (1995), Makhort, F.G. (1995) Application of acoustic method for determination of residual stresses in welded structures. *Tekh. Diagnost. ta Nerazrush. Kontrol*, **4**, 8–15 [in Russian].

NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS ON THE BASE OF A COMBINATION OF ULTRASONIC TESTING AND SPECKLE-INTERFEROMETRY

L.M. Lobanov¹, V.V. Knysh¹, M.O. Pashchin¹, V.G. Kot¹, O.L. Mikhodui¹, Ye.D. Pekar¹, Luyi Huang², A.O. Alyoshyn³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: svarka2000@ukr.net

²Zhejiang Special Equipment Research Institute. 211 Kaixuan Road, Hangzhou, China. E-mail: yuxf@zjtj.org

³«Foreign Economy Representation of the E.O. Paton Chinese-Ukrainian Institute of Welding», Ltd. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: ft.cupiw.pwi@gmail.com

It was found that a combination of the advantages of ultrasonic testing and electron speckle-interferometry in the case of elimination of their disadvantages is the base for development of the method of nondestructive evaluation of residual welding stresses in full-scale structures. A procedure of nondestructive evaluation of the distribution of residual tensile welding stresses in the weld zone of a butt welded joint was developed. It is based on simultaneous application of ultrasonic testing and electron speckle-interferometry and fulfillment of the condition of «area equality» of the epures of balanced compressive and tensile residual stresses. The procedure was proposed for application on samples of single-pass welded joints of sheet constructions from metallic materials with a stable structure. The subject of the study are tensile residual welding stresses in a MIG-welded sample of a butt joint of structurally stable 1561 aluminium alloy. Residual welding stress component σ_x longitudinal relative to the weld was evaluated in the plate central area. It was found that the discrepancy of the values of residual welding stresses near the center of the welded joint of 1561 aluminium alloy is equal to approximately $0.1\sigma_{0.2}$ for this material, which corresponds to the claimed accuracy of the methods. Based on the investigation results, a range of procedures was proposed for nondestructive evaluation of the residual welding stresses in full-scale welded structures, based on a combination of ultrasonic testing and electron speckle-interferometry. 9 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: residual welding stresses, ultrasonic testing (UT), electronic speckle-interferometry (ESPI), butt joint sample, MIG welding, compressive and tensile testing, longitudinal component of stresses, aluminium alloy, procedure of nondestructive evaluation of stresses

Надійшла до редакції 24.03.2023

ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПАКЕТНИХ ІМПУЛЬСІВ ХВИЛЬ РЕЛЕЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТВЕРДОСТІ ПОВЕРХНЕВО ЗАГАРТОВАНИХ МЕТАЛІВ

С.Ю. Плєснецов, Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, Ю.О. Плєснецов, А.В. Донченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.
E-mail: Serhii.Pliesnetsov@khpi.edu.ua

Встановлено можливість неруйнівного контролю безконтактним ультразвуковим електромагнітно-акустичним методом твердості поверхнево загартованих металовиробів шляхом застосування ультразвукових поверхневих хвиль різної частоти. Наведено загальну характеристику механізму роботи електромагнітно-акустичного перетворювача при збудженні і прийомі ультразвукових хвиль з урахуванням можливого впливу зсувних і поздовжніх хвиль. Розглянуто особливості конструкції перетворювачів при збудженні хвиль Релея, які забезпечують проведення контролю твердості. Виготовлено стенд для проведення експериментальної перевірки результатів теоретичного та модельного досліджень. Експериментальні дослідження підтвердили можливість проведення неруйнівного контролю твердості з використанням електромагнітно-акустичних перетворювачів. Бібліогр. 9, рис. 4.

Ключові слова: твердість металу, загартований шар, ультразвуковий контроль, хвилі Релея, частота ультразвукових хвиль, електромагнітно-акустичний перетворювач

Вступ. Для підвищення експлуатаційних можливостей значна частина металургійної та машинобудівної продукції піддається зміцненню різними методами. Основною характеристикою зміцнення є твердість. Її величина повинна знаходитися в заданих межах, оскільки надмірна твердість призводить до підвищеної крихкості виробу, а недостатня твердість – до зниження терміну його експлуатації. Для контролю твердості застосовують методи та прилади, що використовують різні фізичні ефекти: вдавлювання в поверхню інденторів різної форми, відскок кульки, зміну швидкості поширення ультразвукових хвиль чи імпедансу, вимір залишкової намагніченості та ін. Згадані відомі методи контролю мають ряд суттєвих недоліків: порушують поверхневий шар металу; не враховують вплив низьковуглецевого поверхневого шару; схильні до впливу на результати контролю властивостей структури, особливо при високій локальності виміру; не визначається градація твердості за товщиною контрольованого шару та ін. Особливо яскраво відзначені недоліки проявляються при контролі твердості поверхнево зміцнених металовиробів.

Досить ефективним методом визначення фізико-механічних характеристик матеріалів з перерахованих, у тому числі контролю твердості, є ультразвуковий [1–4]. Проте традиційні електроакустичні перетворювачі вимагають застосування контактної рідини, яка істотно впливає на результати контролю, особливо при контролі твердості

поверхнево зміцнених металовиробів, наприклад рейок, труб, валів та ін. Потрібна зачистка поверхні виробів, що також спотворює результати вимірів.

Менш схильними до впливу факторів, що заважають (наявності контактної рідини, стану поверхні металу, зміни відстані між перетворювачем і металом тощо) є електромагнітно-акустичні (ЕМА) перетворювачі (ЕМАП) [5–9]. Вони дозволяють виконувати високоточний контроль швидкості поширення ультразвукових хвиль, у тому числі поверхневими хвилями Релея, які доцільно застосувати для пошарового контролю твердості металовиробів як на локальних, так і на протяжних ділянках. Істотною перевагою таких ЕМАП є можливість автоматизованого потокового контролю твердості, наприклад при виробництві поверхнево загартованих металовиробів.

Постановка задачі. Модель роботи ЕМАП під час збудження та прийому імпульсів хвиль Релея пояснюється на рис. 1. Основу такого перетворювача складає плоска котушка l індуктивності (індуктор), намотана зигзагоподібно так, що сусідні паралельні робочі витки, пронумеровані $1, 2, \dots, m$, розташовані на розрахунковій відстані, що дорівнює половині довжини ультразвукової поверхневої хвилі ($\lambda_0/2$). Котушка l розташовується над поверхнею об'єкта контролю (ОК) і живиться імпульсами струму у вигляді пакета із заповненням з певною кількістю періодів високої частоти. У поверхневому скін-шарі ОК формується вихро-

Плєснецов С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>, Сучков Г.М. – <https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>, Мигущенко Р.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3287-9772>, Кропачек О.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-5899-0252>, Плєснецов Ю.О. – <https://orcid.org/0000-0002-4782-263X>

© С.Ю. Плєснецов, Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, Ю.О. Плєснецов, А.В. Донченко, 2023

вий струм із конфігурацією, що повторює форму котушки I [7]. На цю ж ділянку поверхневого шару ОК діє магнітне поляризує поле, область 2 дії якого оконтурена рисками на рис. 1. Унаслідок взаємодії вихрового струму та поляризуєчного магнітного поля в скін-шарі металу на електроні діє осцилюєча сила Лоренца. За допомогою електронів цей вплив передається кристалічній решітці матеріалу. У разі феромагнітного матеріалу виробу у формуванні акустичного поля бере участь магнітострикційний ефект. Під кожним витком котушки I у поверхневому скін-шарі ОК відбувається складення амплітуд механічних коливань кристалічної решітки металу. У результаті вздовж поверхні в двох взаємно протилежних напрямках поширюються імпульси хвилі Релея (на рис. 1 стрілками показано тільки один напрям) з частотою, що збігається [6, 7] з частотою збуджуючого високочастотного струму в індукторі I . Цифрою 3 схематично позначено індуктор приймального ЕМАП.

На рис. 1 наведено схему, що встановлює основні положення моделювання механізму збудження хвиль Релея, яка реалізується для матеріалу ОК з відомою величиною швидкості C_r поширення поверхневої ультразвукової хвилі (наприклад, для калібрувального зразка). При цьому $\lambda = C_r/f$, де f – частота збуджених ультразвукових коливань (УЗК). Зміцнення металу призводить до зміни його пружних констант і, відповідно, до зміни C_r . Тоді $\lambda_x = \lambda \pm \Delta\lambda = (C_r \pm \Delta C_r)/f$, тобто змінюється довжина λ_x хвилі пружних коливань і її величина не буде відповідати розрахунковій відстані (кроку $a = \lambda_0/2$) між сусідніми робочими ділянками індуктора ЕМА перетворювача. Отже може виникнути необхідність або зміни конструкції індуктора ЕМАП, або зміни частоти f . Здійснити зміну f досить легко шляхом апаратної реалізації. Проте при цьому може змінюватись товщина контрольного шару металу $(1...1,5)\lambda$ [7], у якому поширюються УЗК. Це може бути неприпустимим, наприклад при діагностиці твердості поверхнево зміцнених ОК (на заданій товщині шару металу). Зміна конструкції індуктора ЕМАП шляхом регу-

лювання відстаней між робочими ділянками індуктора є складною і коштовною. Необхідно виготовляти набір перетворювачів із різною відстанню між робочими ділянками. Зазначене протиріччя необхідно дослідити, оцінити та розробити пропозицію, що дозволяє реалізувати переваги ЕМА способу.

У подальшому при теоретико-математичному моделюванні прийнято, що початкова амплітуда збуджуваного ультразвукового сигналу в поверхневому шарі металу під кожною робочою ділянкою індуктора збуджуючого ЕМАП складає A_0 . Прийmemo, що коефіцієнт послаблення хвиль Релея при розповсюдженні вздовж поверхні виробу дорівнює δ .

Зміст та результати розробки. На першому етапі роботи було виконано теоретичні дослідження процесів, які мають місце при збудженні та прийомі імпульсів поверхневих хвиль в металах. При теоретичному дослідженні розглянуто наступне. При встановленні збуджуючого ЕМАП на поверхню контрольного зразка під кожним його провідником одночасно збуджуються поверхневі, зсувні та поздовжні хвилі [8]. Механізми перетворення електромагнітних полів у пружні коливання різного типу як при збудженні, так і при прийомі, широко відомі та описані в працях багатьох науковців світу, наприклад в огляді [9].

При розповсюдженні поверхневих хвиль вздовж поверхні ОК вони поступають під сусідню робочу ділянку індуктора перетворювача, змінивши знак фази на π . Оскільки сусідня робоча ділянка включена за напругою зустрічно, то збуджені ультразвукові імпульси в поверхневому шарі складаються по амплітуді. У результаті з моменту подачі живлення на збуджуючий індуктор перетворювача при поширенні збудженої поверхневої хвилі від кожного робочого елемента індуктора під всі сусідні сумарна амплітуда сигналу буде поступово збільшуватися до деякого фіксованого максимального значення A_1 . Якщо в цей момент відключити живлення індуктора, то амплітуда збуджуваного УЗ сигналу буде поступово зменшуватися до нульового значення за рахунок зменшення

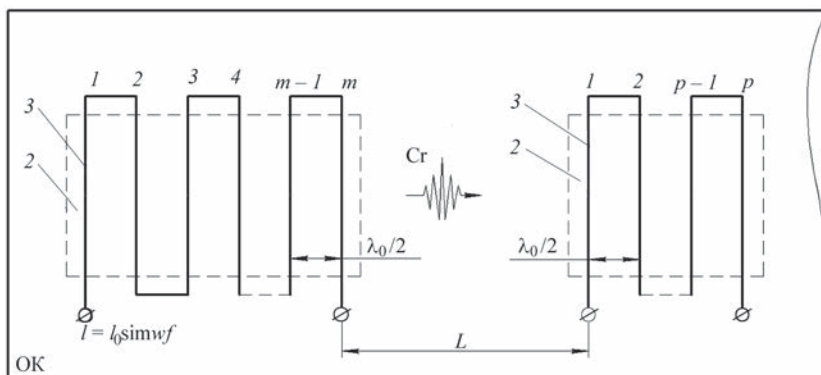


Рис. 1. Спосіб збудження та прийому ультразвукових хвиль Релея

кількості сигналів, що складаються. У результаті формується огинаюча дзвоноподібної форми збудженого ультразвукового імпульсу, який поширюється вздовж поверхні зразка. Отже, при $a = \lambda_0/2$ сумарне максимальне значення амплітуди A_1 змишень пружних коливань, що збуджуються, буде визначатися виразом:

$$A_1 = mA_0K_1 \cos(\omega t) \sum_{n=1}^m \exp\left(-\delta(m-n)\frac{\lambda_0}{2}\right) \quad (1)$$

де A_0 – початкова амплітуда пружних коливань, що збуджена одною ділянкою індуктора; K_1 – коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії в акустичну для даного ЕМАП і матеріалу ОК; ω_0 – кругова частота збуджених ультразвукових коливань; t – час; δ – коефіцієнт послаблення УЗК в матеріалі калібрувального зразка; λ_0 – розрахункова довжина хвилі УЗК для калібрувального зразка; m – кількість робочих ділянок індуктора ЕМАП.

Очевидно, що для забезпечення максимальної амплітуди збудженого імпульсу поверхневої хвилі необхідно живити індуктор I ЕМАП струмом з кількістю періодів частоти заповнення імпульсів струму, що перевищує половину числа робочих ділянок індуктора перетворювача.

У той же час зсувні і поздовжні хвилі, що збуджуються сусідніми ділянками індуктора ЕМАП і розповсюджуються нормально до поверхні металу, мають протилежну фазу і в результаті компенсуються. Сумарні амплітуди таких імпульсів є мінімальними. У порівнянні з амплітудою поверхневих хвиль вони менші в десятки і сотні разів. Тобто вплив зсувних та поздовжніх хвиль можна не враховувати.

Прийом імпульсів поверхневих хвиль здійснюється одним або декількома ЕМА-перетворювачами, наприклад індуктором 3 (рис. 1), також виконаним у вигляді зигзагу. Механізм перетворення при прийомі поверхневих пружних коливань з металів через електромагнітні поля в електричні імпульси широко відомий і описаний у працях багатьох науковців світу, наприклад в огляді [9]. Крок між робочими ділянками кожного приймального індуктора, так само як і для збуджуючого, повинен дорівнювати $a = \lambda_0/2$. Індуктори збуджуючого та приймаючих ЕМАП встановлюються на фіксованих відстанях один від одного. Після проходження відстані L від збуджуючого індуктора I ЕМАП до першої ділянки приймального індуктора 3 амплітуда хвилі Релея зменшиться за рахунок ослаблення. Отже при вході під приймальний індуктор 3 буде поширюватися хвиля, яка описується виразом:

$$A_2 = A_1 \exp(-\delta L) \quad (2)$$

Далі поверхнева хвиля з амплітудою (2) поступово переміщується під кожною робочою ділянкою (номери $1, 2, \dots, p$) індуктора 3 приймального

перетворювача. Кристалічна решітка металу коливається в магнітному полі (області 2 на рис. 1) під кожною сусідньою робочою ділянкою індуктора 3 протифазно для довжини хвилі λ_0 збуджених УЗК. Враховуючи, що кожен сусідній робочі ділянки включені за електричною напругою протифазно, у результаті амплітуди прийнятих імпульсів складаються максимально (тільки для довжини хвилі λ_0 збудженої УЗК). Сумарна наведена ЕРС в індукторі 3 дорівнюватиме:

$$A_3 = pA_2K_2 \sum_{q=1}^p \exp\left(-\delta(p-q)\frac{\lambda_0}{2}\right), \quad (3)$$

де K_2 – коефіцієнт перетворення акустичної енергії в електричну для даного ЕМАП та матеріалу ОК; p – кількість робочих ділянок індуктора приймального ЕМАП.

Аналіз (3) показує, що максимальна прийнята амплітуда імпульсу поверхневої хвилі в цьому випадку буде залежати тільки від кількості робочих ділянок збуджуючого та приймального індукторів, коефіцієнтів перетворення електричної енергії в акустичну і навпаки, а також від ослаблення поверхневої хвилі. При незначному ослабленні амплітуди імпульсів УЗК, малих величинах L і λ_0 вираз (3) набуде вигляду: $A_3 \approx A_0 mpK_1K_2 \cos(\omega t)$.

При контролі твердості ОК збуджуючий і приймальні ЕМАП встановлюються на виріб з невідомими пружними характеристиками і, відповідно, з невідомою швидкістю поширення поверхневих УЗ коливань. При цьому довжина збуджуваних поверхневих хвиль не буде співпадати з розрахунковою λ_0 і максимальне значення випромінюваної амплітуди поверхневої хвилі буде мати вигляд:

$$A'_1 = mA_0K_1 \times \sum_{n=1}^m \exp\left(-\delta(m-n)\frac{\lambda_0}{2}\right) \cos(\omega t + (m-n)\pi\lambda_0 / \lambda_x), \quad (4)$$

де $\omega_0 = 2\pi f_0$ – кругова частота УЗК при налаштуванні приладу на контрольному зразку; f_0 – частота пружних коливань, що збуджуються; t – час; K_1 – коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії в акустичну для даного ЕМАП та матеріалу ОК; m – кількість робочих ділянок збуджуючого індуктора ЕМАП; λ_0 – довжина хвилі ультразвукових коливань у матеріалі поверхневого шару контрольного зразка; λ_x – довжина хвилі УЗК у матеріалі досліджуваного ОК; $\pi = 3,14$.

При підсумовуванні в (4) значень величин їх необхідно брати зі знаком плюс, оскільки це обумовлено конструкцією індуктора перетворювача з протифазним включенням сусідніх робочих ділянок, розташованих на відстані $\lambda_0/2$ одна від одної.

На відміну від випадку (1) аналіз (4) показує, що фази пружних коливань під сусідніми ділянками

ми індуктора l не будуть кратними π . У результаті невідповідності довжини хвилі, що збуджується, розрахунковому кроку робочих ділянок індуктора ($\lambda_x/2 \neq a = \lambda_0/2$) виникає зсув часового положення максимуму амплітуди збудженого інформаційного сигналу та його фази. У (4) $\phi_x = (m - n)\pi\lambda_0/\lambda_x$ – фаза хвиль УЗК, що переміщуються у поверхневому шарі ОК під робочими ділянками індуктора. Простий розрахунок показує, що зміни фази УЗ коливань через зміни твердості для загартованих сталей можуть досягати декількох градусів. Це може призвести до суттєвих помилок у результатах контролю твердості металу.

При поширенні збуджених УЗК (4) у поверхні досліджуваного ОК під індуктором 3 приймального ЕМАП (рис. 1) наведена ЕРС буде мати вигляд:

$$A'_2 = pmA_0K_1K_2 \exp(-\delta L) \sum_{q=1}^p (-\delta(p-q)) \times \sum_{n=1}^m \exp(-\delta(m-n)\lambda_0/2) \cos(\omega t + (p+m-n-q)\pi\lambda_0/\lambda_x), \quad (5)$$

де p – кількість робочих ділянок приймального індуктора 3.

Аналіз (5) показує, що за відмінності довжини хвиль поверхневих УЗК в контрольному зразку і в ОК інформаційний сигнал буде спотворюватися як при збудженні, так і при прийомі, що може призвести до істотного збільшення величини помилки контролю твердості металу.

З наведених теоретичних досліджень випливає необхідність формування інформаційного гармонійного сигналу, який збуджуватиме УЗК з довжиною хвилі, відповідної до розрахункового кроку робочих ділянок збуджувача індуктора і котушок індуктивності приймальних ЕМАП. Тобто необхідно виконати рівність $\lambda_x = \lambda_0$ або $C_x/f_x = C_0/f_0$. Цього можна досягти шляхом регулювання частоти збуджуваних УЗК до отримання максимального прийнятого сигналу, що легко реалі-

зувати автоматично. У цьому випадку (5) набуде вигляду:

$$A'_2 = pmA_0K_1K_2 \exp(-\delta L) \cos \omega t \times \sum_{q=1}^p \exp(-\delta(p-q)\lambda_0/2) \sum_{n=1}^m \exp(-\delta(m-n)\lambda_0/2). \quad (6)$$

Згідно з (6) ЕРС, наведена в індукторі 3, буде максимальною через складання амплітуд імпульсів поверхневих хвиль, що збуджуються і приймаються. При цьому форма прийнятого сигналу буде гармонійною. Такий підхід у результаті дасть можливість з високою точністю вимірювати часові проміжки, наприклад при переході сигналу через нуль і, як наслідок, підвищити точність контролю твердості поверхневого шару ОК.

При надходженні під індуктор об'ємних зсувних або поздовжніх хвиль ЕРС, що наводиться на сусідніх ділянках індуктора 3 (рис. 1), відрізняється на π і в результаті віднімається. Тому вплив об'ємних зсувних та поздовжніх хвиль при прийомі також можна не враховувати. Підтвердженням такого висновку є результати експериментальних досліджень (рис. 2) розповсюдження поверхневих хвиль Релея по периметру зразка труби, що була в експлуатації, та по периметру зразка цільнометалевої заготовки діаметром 220 мм.

Аналіз даних, наведених на рис. 2, підтверджує, що, крім поверхневих хвиль, додаткові імпульси хвиль іншого типу не збуджуються і не приймаються.

На другому етапі для оцінки результатів теоретичних досліджень, наведених у виразах (5) та (6), виконано математичне моделювання впливу твердості поверхневого шару металовиробу на характеристики хвиль Релея, тобто для випадків $\lambda_x = \lambda_0$ і $\lambda_x \neq \lambda_0$. Результати моделювання наведено на рис. 3.

При моделюванні прийнято: $\lambda_0 = 3$ мм; $\lambda_0/\lambda_x = 1, 2, 3, 4$ і 5 %; $\delta = 0,1$ Нп/мм; $A_0 = 1$; $k = 6$; $p = 4$; $K_1 = 0,001$; $K_2 = 0,001$. Вплив частоти на ве-

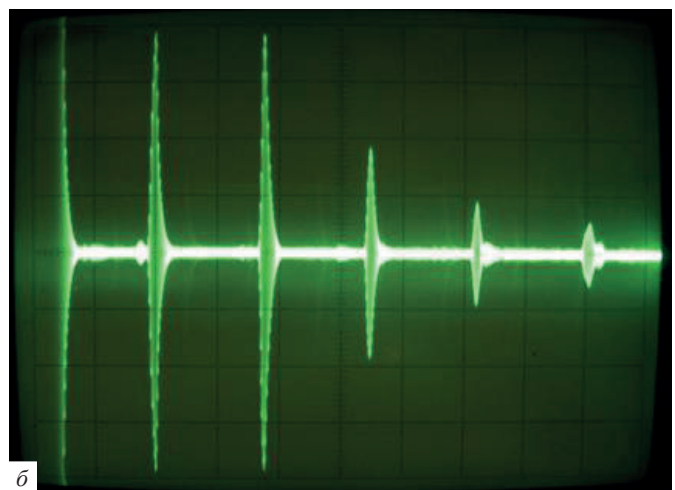


Рис. 2. Часові розгортки з імпульсами поверхневих хвиль, що багаторазово оббігають по периметру трубу діаметром 76 мм з товщиною стінки 4,2 мм (а) та по периметру заготовки діаметром 220 мм (б)

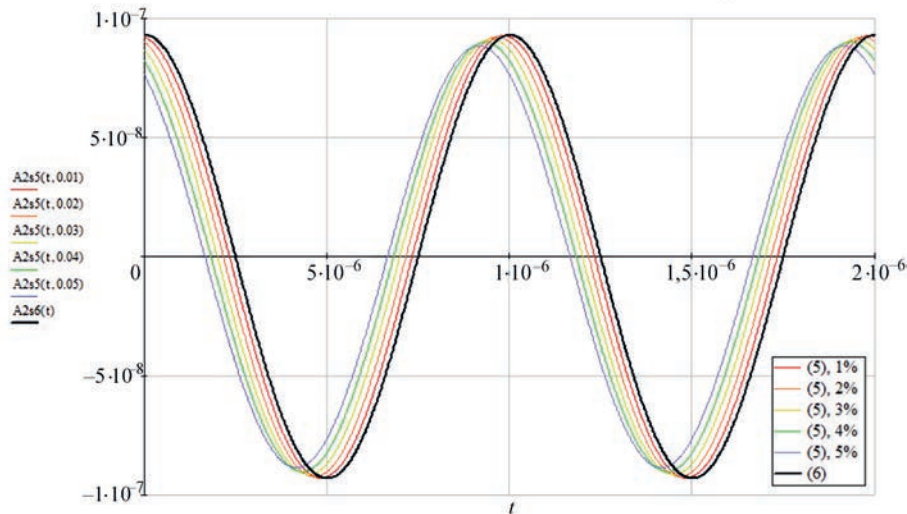


Рис. 3. Вплив відносної зміни довжини хвилі в ОК у контрольному зразку на зміну часу переходу прийнятого сигналу через нуль та положення в часі максимуму прийнятого сигналу

личину ослаблення УЗК та його розсіювання не враховували.

Аналіз результатів досліджень, наведених на рис. 3, підтверджує положення про можливість ефективного контролю твердості поверхнево загартованих ОК хвилями Релея з використанням електромагнітно-акустичних перетворювачів.

На основі теоретичних та модельних досліджень можна сформулювати наступні методики контролю твердості металовиробів імпульсами поверхневих хвиль з використанням ЕМАП.

Перший варіант методики контролю твердості поверхневого шару ОК має бути наступним. Розраховується крок збуджуючого індуктора та приймальної котушки індуктивності (одної або декількох) ЕМАП для відомої швидкості поширення ультразвукових коливань для заданого класу поверхнево загартованих металів. Потім ЕМАП встановлюється на контрольний зразок із відомим середнім значенням твердості в інтервалі, який визначається нормативно-технічною документацією, і за допомогою регулювання частоти отримують максимальне значення амплітуди прийнятого імпульсу. Отримані дані вносять у пам'ять контрольного приладу. Таку процедуру контролю повторюють на інших контрольних зразках з відомою твердістю в більшу та меншу сторону від середньої і отримані дані у відносних одиницях також вносять у пам'ять приладу. Отриману калібрувальну криву вводять в пам'ять контрольного приладу. Контроль твердості шару досліджуваного ОК роблять аналогічним чином, зіставляючи отримані значення частоти з раніше отриманою калібрувальною залежністю.

Другий варіант методики контролю твердості призначений для визначення відповідності твердості поверхневого шару ОК заданому інтервалу. Для цього калібрування виконують для двох кон-

трольних зразків, що мають крайні значення твердості. Далі за попередньою методикою виконують контроль. Деталі, які не відповідають встановленому інтервалу твердості, відсортовують. Такий варіант методики важливий для поточного експрес контролю ОК.

Для експериментальної перевірки розробленої методики контролю твердості був виготовлений стенд (рис. 4), де 1 – приймальний перетворювач; 2 – збуджуючий перетворювач; 3 – генератор зондуючих імпульсів з вбудованим блоком управління; 4 – попередній підсилювач; 5 – блок візуалізації (осцилограф); ОК – об'єкт контролю.

У якості зразка для досліджень використано трубу з прямокутним перерізом зі сталі 45. Експеримент був проведений у три етапи: спочатку на зразку без спеціальної підготовки поверхні, потім після зачистки поверхні зі зняттям тонкого шару до 0,1 мм, і далі зі зняттям шару металу завтовшки 0,3 мм. Тобто частково або повністю видалявся шар металу, насичений вуглецем. Результати експериментів підтвердили, що різниця в результатах на різних ділянках зразка відрізняється на 20...30%. Тобто результати теоретичних і модельних досліджень можна вважати підтвердженими.

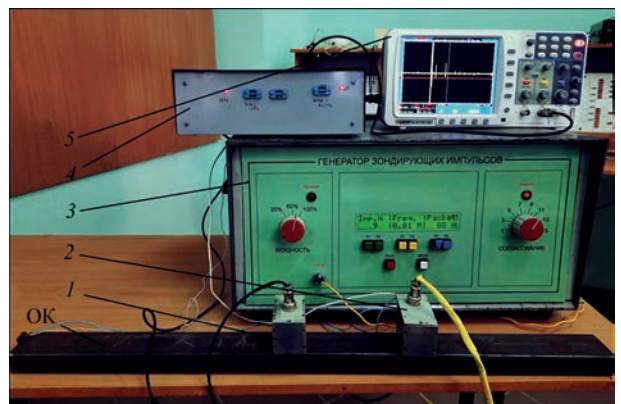


Рис. 4. Стенд для виконання експериментальних досліджень

Висновки

Виконано теоретичні та модельні дослідження можливості контролю твердості поверхнево загартованих металовиробів хвилями Релея, які збуджуються і приймаються електромагнітно-акустичними перетворювачами.

На основі виконаних досліджень розроблено дві методики контролю твердості поверхні металів, у тому числі експрес метод, для поточного контролю деталей, що є важливим для сортування виробів за твердістю поверхні в заданому діапазоні.

Згідно з методиками для забезпечення якісної діагностики твердості поверхнево зміцнених металовиробів необхідно калібрувати вимірювальний прилад за залежністю твердість-частота застосовуваних ультразвукових поверхневих коливань, встановленою за контрольними зразками із заданою твердістю. Такий підхід є зручним для реалізації у приладах контролю твердості.

Список літератури

1. Cole, P.T. (1988) *Series: The Capabilities and Limitations of NDT. Part 7. Acoustic Emission (INST087)*. British Institute of Non-Destructive Testing. ISBN 978-0-903132-08-4.
2. Christian U. Grosse, Masayasu Ohtsu (2008) *Acoustic Emission Testing*. Springer Verlag. ISBN 978-3-642-08937-4.
3. Sotirios J. Vahaviolos (1999) *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*. Vol. STP-135, Philadelphia, PA: ASTM International (publishing), p. 81. ISBN 978-0-8031-2498-1.
4. Blitz, J., Simpson, G. (1991) *Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing*. Springer-Verlag New York, LLC. ISBN 978-0-412-60470-6.
5. Hirao, M., Ogi, H., Yasui, H. (2001) Contactless measurement of bolt axial stress using a shear-wave electromagnetic acoustic transducer. *NDT & E International*, 34, 3, 179–183, ISSN 0963-8695.
6. Suchkov, G.M., Taranenko, Yu.K., Khomyak, Yu.V. (2016) A Non-Contact Multifunctional Ultrasonic Transducer for Measurements and Non-Destructive Testing. *Measurement Techniques*, 59, 990–993. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1081-3>
7. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.М. и др. (2017) Информационно-измерительные электроакустические преобразователи для оценки качества поверхности ферромагнитных металлоизделий ультразвуковыми

волнами Релея. *Техническая электродинамика*, 2, 70–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.070>

8. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.М., Десятниченко О.В. (2016) *Теорія та практика електромагнітно-акустичного контролю. Частина 5. Особливості конструювання та практичного застосування ЕМА пристроїв ультразвукового контролю виробів*. Монографія. Харків, ТОВ «Планета-принт».
9. Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. (2018) Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования (обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 24–31. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.02.03>

References

1. Cole, P.T. (1988) *Series: The Capabilities and Limitations of NDT. Pt 7. Acoustic Emission (INST087)*. British Institute of Non-Destructive Testing. ISBN 978-0-903132-08-4.
2. (2008) *Acoustic Emission Testing*. Eds by Christian U. Grosse, Masayasu Ohtsu, Springer Verlag. ISBN 978-3-642-08937-4.
3. Sotirios J. Vahaviolos (1999) *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*. Vol. STP-135, Philadelphia, PA: ASTM Int. 81. ISBN 978-0-8031-2498-1.
4. Blitz, J., Simpson, G. (1991) *Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing*. Springer-Verlag New York, LLC. ISBN 978-0-412-60470-6.
5. Hirao, M., Ogi, H., Yasui, H. (2001) Contactless measurement of bolt axial stress using a shear-wave electromagnetic acoustic transducer. *NDT & E Intern.*, Vol. 34, Issue 3, 179–183, ISSN 0963-8695.
6. Suchkov, G.M., Taranenko, Yu.K., Khomyak, Yu.V. (2016) A non-contact multifunctional ultrasonic transducer for measurements and non-destructive testing. *Measurement Techniques*, 12, Vol. 59, Issue 9, 990–993. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11018-016-1081-3>
7. Migushchenko, R.P., Suchkov, G.M., Petrishchev, O.M., Bolyukh, V.F., Plesnetsov, S.Yu., Kocherga, A.I. (2017) Information-measurement electromechanical transducers for evaluation of surface quality of ferromagnetic metal products by ultrasonic Rayleigh waves. *Техническая Электродинамика*, 2, 70–76 [in Russian] DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2017.02.070>
8. Migushchenko, R.P., Suchkov, G.M., Petrishchev, O.M., Desyatnichenko, O.V. (2016) *Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Pt 5: Peculiarities of design and practical application of EMA devices for ultrasonic testing of products*. In: Monography. Kharkiv, Planeta-print [in Ukrainian].
9. Plesnetsov, S.Yu., Suchkov, G.M., Korzh, A.I., Suvorova, M.D. (2018) New theoretical investigations and developments in the field of electromagneto-acoustic transformation (review). *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, 2, 24–31 [in Russian] DOI:<http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.02.03>

APPLICATION OF ULTRASONIC PACKET PULSES OF RALEIGH WAVES FOR TESTING THE HARDNESS OF SURFACE-HARDENED METALS

S.Yu. Pliesnetsov, G.M. Suchkov, R.P. Mygushchenko, O.Yu. Kropachek, Yu.O. Pliesnetsov, A.V. Donchenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: Serhii.Pliesnetsov@kphi.edu.ua

The possibility of nondestructive testing of hardness of surface-hardened metal products by contactless ultrasonic electromagnetoacoustic method with application of waves of different frequency was established. General characterization of the mechanism of operation of the electromagnetoacoustic transducer at excitation and reception of ultrasonic waves is given, taking into account the possible influence of shear and longitudinal waves. The features of the transducer design at excitation of Raleigh waves are considered, which ensure performance of hardness control. A stand was made to conduct the experimental verification of the results of theoretical and model investigations. Experimental investigations confirmed the possibility of performance of nondestructive hardness control, using electromagnetoacoustic transducers. 9 Ref., Fig. 4.

Keywords: metal hardness, hardened layer, ultrasonic testing, Raleigh waves, ultrasonic wave frequency, electromagnetoacoustic transducer

Надійшла до редакції 16.01.2023

AUTOMATION OF THE PROCESS OF SEGMENTATION OF IMAGES OF METAL SURFACE DEFECTS USING THE NEURAL NETWORK U-NET

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ДЕФЕКТІВ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ U-NET

Y.V. Steshenko, A.S. Momot, A.G. Protasov O.V. Muraviov
Я.В. Стешенко, А.С. Момот, А.Г. Протасов, О.В. Муравйов

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Avenue, 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: yaroslav.steshenko@ukr.net; drewmomot@gmail.com

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: yaroslav.steshenko@ukr.net; drewmomot@gmail.com

The paper deals with the task of automated segmentation of images of defects metal surfaces. The aim of the study is to improve segmentation algorithms using deep learning methods. The expediency of using the U-Net neural network, which is effective in the tasks of semantic image segmentation, is substantiated. With the help of a special architecture, the network can create segmentation masks with high efficiency. The training dataset for the neural network contained images of four classes of defects, including chips, cracks, and stains. As a result of analyzing the distribution of defect classes in the training dataset, it was concluded that the classes were unbalanced, which negatively affects the training results. To evaluate the quality of network training, a set of metrics such as Accuracy, F1 Score, and IOUScore is considered. The feasibility of using these metrics is analyzed, taking into account the features of the training data set. It is proved that under conditions of significant imbalance of classes, the Accuracy metric does not reflect the real quality of the model. The influence of different variants of the ResNet architecture backbone on the training results is analyzed. It is determined that the best results are shown by the ResNet18 model, which managed to obtain a Dice coefficient of 69 % and an IOUScore of 53 % on the test data set. It is proved that an increase in the number of model parameters does not always lead to an improvement in the reliability of the results. The article provides examples of test images and defect masks and countures predicted by the neural network. 13 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

У статті розглядається актуальне завдання автоматизованої сегментації зображень дефектів металевих поверхонь. Мета дослідження полягає у вдосконаленні алгоритмів сегментації з використанням методів глибинного навчання. Обґрунтовано доцільність використання нейронної мережі U-Net, яка є ефективною в завданнях семантичної сегментації зображень. За допомогою спеціальної архітектури мережа здатна створювати маски сегментації з високою ефективністю. Навчальний набір даних для нейронної мережі містить зображення дефектів чотирьох класів, включаючи відколи, тріщини та плями. У результаті аналізу розподілу класів дефектів у навчальному наборі даних зроблено висновок про незбалансованість класів, що негативно впливає на результати навчання. Для оцінки якості навчання мережі розглянуто набір метрик, таких як Accurasy, F1 Score та IOUScore. Проаналізовано доцільність використання даних метрик із врахуванням особливостей навчального набору даних. Доведено, що в умовах значної незбалансованості класів метрика Accurasy не відображає реальної якості моделі. Проведено аналіз впливу різних варіантів бекбону архітектури ResNet на результати навчання. Визначено, що найкращі результати показує модель ResNet18, за допомогою якої вдалося отримати значення коефіцієнту Дайса на рівні 69 % та показника IOUScore на рівні 53 % на тестовому наборі даних. Доведено, що збільшення кількості параметрів моделі не завжди призводить до покращення достовірності результатів. Наведено приклади тестових зображень та прогнозованих нейронної мережею масок і контурів дефектів. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 7.

Keywords: metal surfaces, image segmentation, neural networks

Ключові слова: металеві поверхні, сегментація зображень, нейронні мережі

Introduction. Defect detection is an important step in any product manufacturing and operation process. It helps ensure product quality and reliability and reduces the risk of negative consequences for users and manufacturers.

Metal products are widely used in various applications. Therefore, it is an urgent task to recognize their surface defects, which can significantly impair the quality and reliability of the product. Such defects can be-

come an obstacle during the processing or use of the product, which can lead to emergencies and negatively affect human safety and health. Early detection of defects allows you to analyze the causes of their occurrence and make appropriate changes to production processes. This helps to improve the efficiency and cost-effectiveness of production, as well as reduce the percentage of waste. To improve the efficiency of defect detection and recognition, this process can be automated [1].

Стешенко Я.В. – <https://orcid.org/0009-0003-5367-1529>, Момот А.С. – <https://orcid.org/0000-0001-9092-6699>, Протасов А.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-2965-3334>, Муравйов О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7699-0245>
© Y.V. Steshenko, A.S. Momot, 2023

There are various methods of metal surface inspection: visual, visual-optical, eddy current, ultrasonic, magnetic particle, etc. However, the visual-optical method is more productive in terms of inspection speed. For example, compared to the eddy current method, the visual-optical inspection method allows you to control a large area of the object with one camera image. This method is quite simple and cheap to use, requires simpler equipment than other methods, and can be applied directly on the production line.

There are different approaches to automating the process of detecting defects in camera images. One of them is detection, i.e. localization and classification of a defect by circling it in a rectangular box on the image. However, detection does not allow you to accurately determine the boundaries of the defect and does not provide information about its area, shape, and other parameters that may be important for further analysis.

Another approach uses image segmentation to more accurately identify the location of the defect and separate it from the defect-free area of the inspected object. As a result of the segmentation, special masks are superimposed on the image, which reflects the reliable prints or contours of the detected defects. The masks or contours can be painted with different colors that correspond to different classes of defects. The use of segmentation can help automate the defect detection process and reduce the time required to analyze a large number of images. This can be especially important in a production environment where you need to quickly and accurately identify defects to ensure high product quality.

Although there are various methods for segmentation, not all of them allow you to classify the detected objects. Given the rapid development of deep learning technologies, neural network models are the most promising option for automated segmentation tasks. It is neural networks that currently show the best results in the field of image processing [2].

Review of previous studies. The authors of [3] developed an experimental system for controlling rolled metal products capable of real-time operation in production conditions. The visual-optical control method is used. The illumination scheme of the product can be adjusted to optimize the contrast of various defects, depending on the surface roughness of the base material and defects. The good functioning of the illumination and especially its support in defect recognition has greatly simplified image analysis algorithms. Defect recognition is based on the analysis of blobs (binary large objects) in images. The authors found that the classification process using statistical methods is complicated by large variations in different types of defects and the lack of accurate models for their shape. The classification of larger defects, such as longitudinal and transverse scratches, works well. But the

system is not reliable for defects consisting of several small defects, such as spills. Also, the disadvantage of all statistical methods is low resistance to interference, low versatility, and poor generalization properties.

In article [4], a new approach is proposed aimed at increasing the reliability of corrosion damage segmentation results using traditional methods. The segmentation results are negatively affected by uneven illumination, protective coating similar to the corrosion colors, and the presence of corrosion spots. Each of these factors can cause over- or under-segmentation of the corrosion damage area. The authors propose an intelligent digital image processing algorithm for segmenting corrosion defects on painted steel surfaces. After image preprocessing, an alpha-matting procedure is applied. This procedure uses segmentation with a Gaussian mixture model.

The proposed method creates visible image distortions around the shadow boundaries. A similar problem occurs when detecting corrosion spots using alpha matting. This problem is partially solved by selecting some threshold values. However, this approach is only effective for small image areas, as different areas of the image may require different thresholds for proper segmentation. In addition, the proposed method for detecting corrosion on a red background has a high probability of error for images that contain only corroded or only undamaged areas.

In work [5], computer vision technologies are proposed for detecting defects on metal surfaces. The approach uses the architecture of deep convolutional neural networks for segmentation. The overall segmentation model uses various image preprocessing and post-processing techniques to optimize the algorithm to make it practical for use. The system accurately segments the defective areas and has a classification accuracy of 93.46 %, even if the images contain many distortions. Qualitative and quantitative analysis confirms the performance of the algorithm. Another advantage of the proposed model is that it can be easily redesigned to solve similar problems of segmentation of other objects with minor modifications to the algorithm.

At the same time, the system under consideration is designed to segment images of only one type of defect - metal cracks. This is a disadvantage since it is often necessary to detect and classify more than one defect. Therefore, there is a need to develop a neural network that can segment images with several different types of defects.

To solve the problem of detecting atypical defects, the authors of [6] introduce a hierarchical method for classifying and detecting defects in steel surfaces. The proposed approach uses a hierarchical structure for dividing objects into two classes at the first stage, and object detection and semantic segmentation algorithms

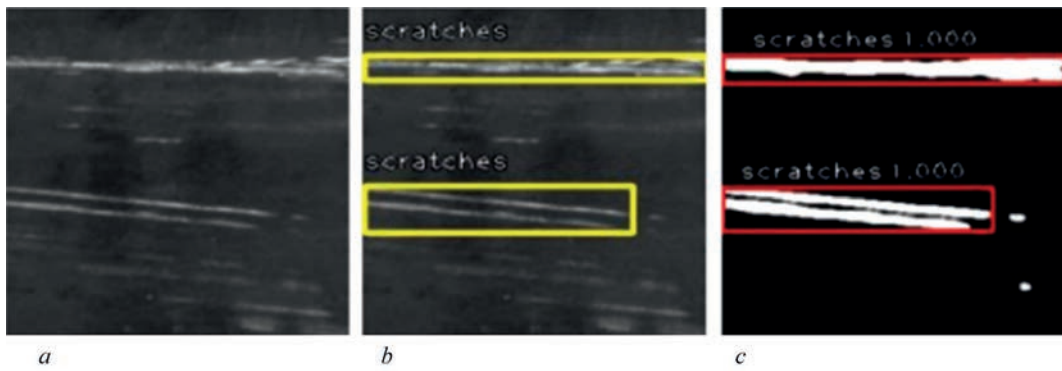


Fig.1. Detection of defects in the form of scratches: *a* — input image; *b* — annotation of the input image; *c* — output image

at the second stage. It demonstrates a mean accuracy rate (mAP) of 77.12 % in detecting surface defects.

An example of the detection result and the generated defect map on the test data are shown in Fig. 1. In the figure, you can see the input image, the corresponding ground truth (GT) annotation, i.e. the correct answers to the input image, and the final image predicted by the neural networks. The similarity between the predicted image and the GT annotated image is obvious. Also, the model was able to detect faint scratches, although the annotation did not provide information about them.

The disadvantage of this development is that classification and segmentation are performed by two separate neural networks. This architecture is complicated because instead of one network, two need to be trained. This significantly reduces the adaptability of the system and the requirements for the training dataset. In addition, the authors point out that some defects still cannot be detected because the difference between the defect and the background is not clear. The defect detection is also complicated by the disadvantage of the chosen network architecture for detection, namely the limited set of anchor boxes.

Thus, an urgent task is to improve the method of segmenting images of metal surface defects. In par-

ticular, it is promising to use a single neural network, the architecture of which will be devoid of the disadvantages discussed in the analytical review.

Statement of the problem. This study aims to improve algorithms for automated segmentation of images of surface defects of metal surfaces. Such a system should automatically detect the location of defects, determine their contours, and classify them by type. The input images of the object under inspection are received by the intelligent digital processing unit from a special camera installed on the production line or directly above the product. The output of the system is an image with highlighted contours of the detected defects. The color of the contour corresponds to a certain class (type) of the defect.

Based on the above review of existing works, segmentation methods based on deep learning are promising. The developed automated segmentation algorithms should have no less efficiency and reliability than existing analogs. The system should be free of the architectural limitations discussed earlier and be flexible and convenient for practical use in industrial environments.

Description of the model for segmentation. To date, the best results in image segmentation tasks are demonstrated by the U-Net neural network [7]. This network has a special convolutional architecture op-

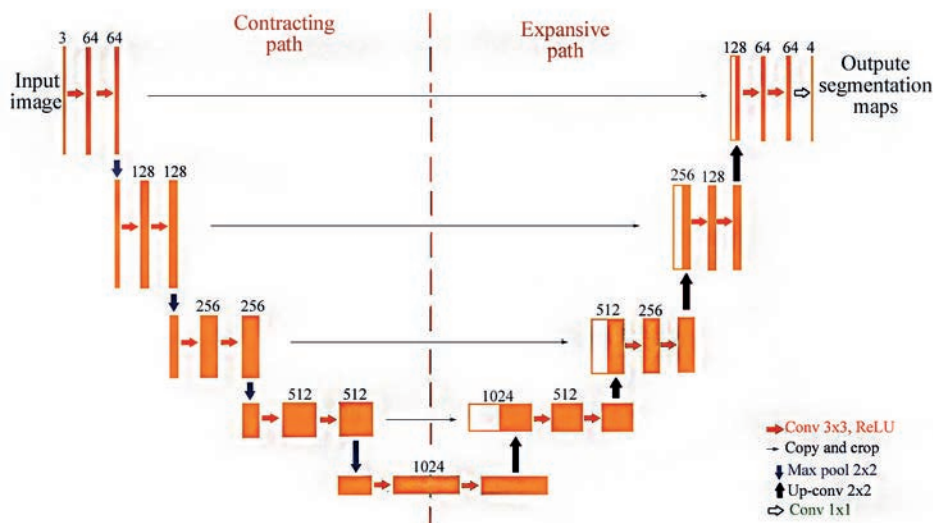


Fig. 2. The basic architecture of the U-Net neural network

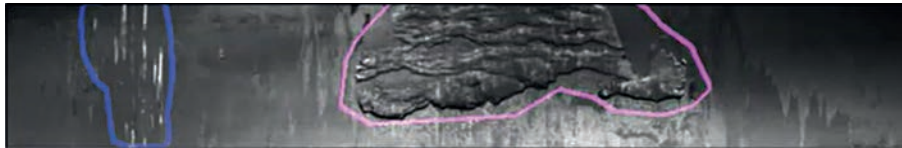


Fig. 3. Example image from the training dataset

timized for semantic image segmentation (Fig. 2). Its main idea is that the network has two data paths: contracting and expansive. The contracting path is responsible for reducing the size of the image and obtaining its abstract features - diagnostic features. The expansive path is designed to restore the original image size and accurately recreate the segmentation mask.

The contracting path consists of several consecutive convolutional layers with the ReLU activation function, as well as a max pool subsampling layer. This process reduces the image size and helps to select the most important informative features.

Expansive path layers contain up-sampling operators that increase the size of feature maps. After that, convolutional layers are used to reduce the number of feature channels. Then, using concatenation with the corresponding feature maps from the contracting path, the network tries to preserve the details of the input image and refine the segmentation masks.

The last layer in the network is a convolutional layer with 1×1 filters, which reduces the number of channels to the number of classes that the network determines. For example, if the network defines two classes, the last convolutional layer will return two channels. Each channel will contain a segmentation mask for the type of defect it defines.

In general, U-Net can restore images with high confidence [8]. The U-Net method also uses «skip-connections» that provide information transfer between different layers of the network. This allows for more efficient use of information from different resolution levels and helps to avoid the problem of losing context from small details.

U-Net's packetized blocks are organized in the form of backbones [9]. A backbone is a basic architecture used to build more complex networks. Most often, the ResNet architecture is used as a backbone in the U-Net network. In this case, the architecture of the contracting path of the U-Net network will be identical to the ResNet architecture. And the expansive path will be an inverse copy of the ResNet network. The computing power of the network varies depending on the complexity (depth) of the backbone.

Description of the training dataset. To train the neural network model, we used an open dataset from Severstal [10]. This is a ready-made set of images created using high-frequency cameras for the training and validation of neural networks. An object in each image may have no defects, a defect of one class, or

several defects of different classes. In total, there are 4 different classes of defects in the images, namely: multiple chips, a single vertical crack, multiple vertical cracks, and multiple large patches on the surface. The mask for each class of defects is encoded in a single line, even if there are several unrelated defective areas in the image. The dataset contains 12568 images for training and 5506 images for testing. The material in the images used to train and test the neural network is steel. The shooting conditions are unknown. The resolution of the images is 800×128 pixels.

To reduce the size of the annotation file, a special way of encoding the length of the pixel value sequence is used. Instead of providing an exhaustive list of indices for segmentation, pairs of values containing the starting position and length of the sequence are provided. For example, '1 3' means that starting from pixel 1, 3 pixels (1, 2, 3) should be considered. Thus, the code '1 3 10 5' means that pixels 1, 2, 3, 10, 11, 12, 13, 14 should be included in the mask. The encoding algorithm additionally checks that the number pairs are sorted, have positive values and that the decoded pixel values are not duplicated. The pixels are numbered from top to bottom, then from left to right: pixel 1 is pixel (1,1), pixel 2 is pixel (2,1), and so on. Fig. 3 shows an example with defects of the third and fourth classes, each of which is highlighted by a contour of a certain color.

Fig. 4 shows a graph that displays the distribution of defect classes in the training dataset. Analyzing the graph, we conclude that the classes are not balanced. The majority (77.3 %) of the images contain a third-class defect and only 3.7 % contain a second-class defect. The imbalance of classes is caused by the fact that during production, some defects occur much more often than others. And some, on the contrary, occur quite rarely. Therefore, it is not possible to take more images of, for example, a second-class defect.

Description of metrics for segmentation. The segmentation task requires the use of specialized metrics that should take into account both the accuracy of the obtained defect masks and the quality of classification. The classical accuracy metric reflects the proportion of correctly classified pixels relative

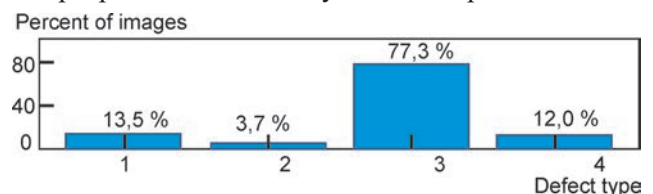


Fig. 4. Distribution of defect classes

to the total number of pixels in the dataset. For example, if the model classifies 90 out of 100 pixels correctly, the accuracy will be 90 %. The disadvantage is that this metric does not work well for unbalanced classes [11].

More reliable estimates can be obtained using metrics based on the assessment of first- and second-order errors. Thus, the precision metric reflects the proportion of correctly classified defective pixels relative to all pixels that the model has assigned to the defective class. For example, if the model classifies 100 pixels as defective, 80 of them are really defective, and 20 are identified incorrectly, then the precision will be equal to 80 %.

Recall is a metric that measures the proportion of defective pixels detected by the model in relation to the total number of pixels that are actually defective. Recall evaluates how efficiently the model finds defective pixels.

For the final evaluation of the classification quality, F1 Score is usually used. This metric allows you to assess the balance between precision and recall. F1 Score is maximized when precision and recall have the same high value. This means that the model is equally good at detecting and classifying defective pixels. This indicator is calculated by the formula:

$$F1_Score = \frac{2(\text{precision} \times \text{recall})}{(\text{precision} + \text{recall})} \quad (1)$$

If you use the F1_Score metric to evaluate the quality of segmentation, the formula for calculating it looks like this:

$$F1_Score = \frac{2 \times |X \cap Y|}{(|X| + |Y|)}, \quad (2)$$

where $|X|$ and $|Y|$ are the number of elements in the samples X and Y , respectively, $|X \cap Y|$ is the number of common elements in the samples X and Y . In our case, X is the annotated pixels from the training dataset, Y is the pixels processed by the neural network. The F1 Score metric presented in this form is called the Dice coefficient [12]. The Dice coefficient takes values from 0 to 1, where 0 means a complete absence of common elements, and 1 means a complete match between the samples.

Another metric for evaluating the quality of segmentation is the IOU (Intersection over Union) or Jac-

card index. It reflects the ratio of the intersection area of the predicted mask and the true mask to the area of their union. Intuitively, IOU can be interpreted as a measure of similarity between the predicted and true masks. This allows you to evaluate the reliability of the model segmentation for a particular image, as well as to make a generalized assessment of the quality of the model segmentation for the entire dataset.

In practical applications, modified versions of IOU are often used, such as Mean IOU or IOU Score, which are calculated for the entire dataset and allow us to obtain a generalized assessment of the quality of model segmentation. IOU Score is calculated as the average IOU value over all images in the dataset. This metric is usually used in multiple segmentation tasks when each image contains several classes of objects, which is suitable for assessing the quality of the network with the proposed U-Net architecture.

Results analysis. Figure 5 shows a graph of the model training using ResNet18, which illustrates the change in the Dice coefficient over 30 epochs. The following settings were chosen for training: activation function – ‘sigmoid’ (converts any input signal into a range of values from 0 to 1), optimizer – ‘adam’ (adaptive gradient descent optimization method), loss function – ‘binary_crossentropy’ (used to determine which of the two classes a given input element belongs to).

During the training, five different variants of the ResNet architecture backbones were tested. The averaged results of the network using each of the backbones are shown in table. At first glance, the accuracy parameter shows incredibly good results. However, when calculating this parameter, the background class that occupies most of the image is taken into account. This leads to a critical imbalance of classes, which makes the accuracy metric unreliable for these conditions [11].

The best results are shown by the model using the Resnet18 backbone, which has a Dice coefficient of 69 % and an IOUScore of 53 %. At the same time,

Comparison of the results of different backbones

Backbone	Params	Acc	Dice	IOUScore
Resnet18	11M	0.9922	0.6912	0.5306
Resnet34	21M	0.9923	0.6724	0.5092
Resnet50	23M	0.9920	0.6721	0.5088
Resnet101	42M	0.9922	0.6744	0.5112
Resnet152	58M	0.9921	0.6660	0.5024

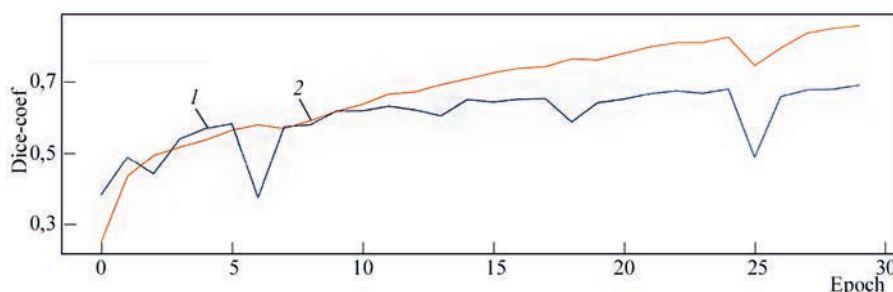


Fig. 5. Graph of Dice coefficient changes during epochs using the ResNet18: 1 – val-dice-coef, 2 – trn-dice-coef

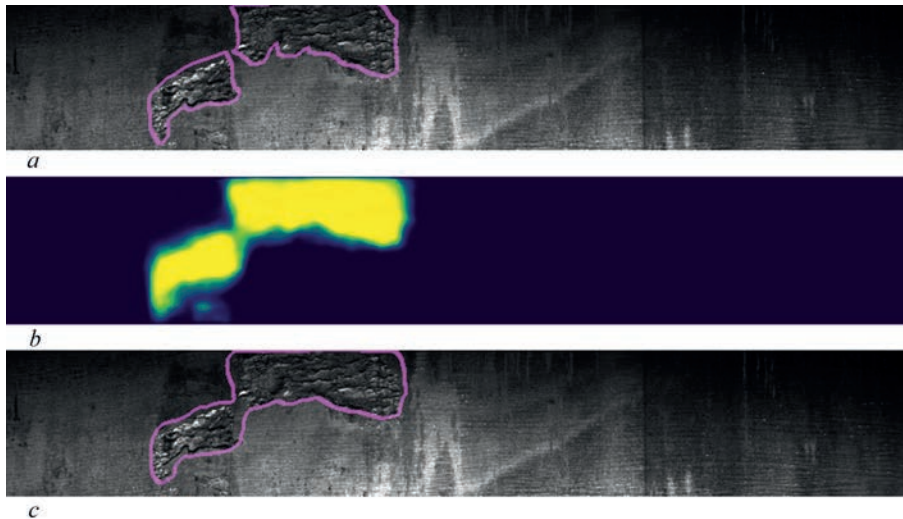


Fig. 6. Testing of the neural network: *a* — annotated image from the training dataset, *b* — mask at the output of the neural network, *c* — predicted defect contour

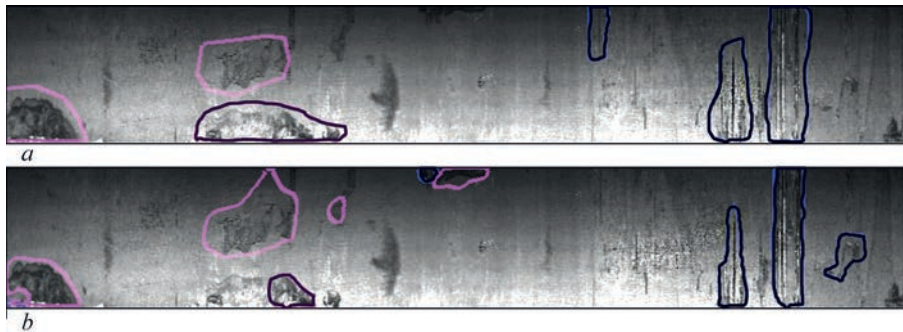


Fig. 7. Examples of image segmentation with defects: *a* — correct contours from the training dataset, *b* — contours predicted by the neural network

this model has the smallest number of parameters. That is, it will take much less time to train it compared to more complex backbones. The worst results were obtained for the ResNet152 backbone, although this network has the largest number of parameters.

Table shows that quite significant changes in the number of parameters have little impact on the quality of the model. Thus, it can be concluded that increasing the number of model parameters does not always lead to an improvement in its efficiency. In addition, the table shows that all the models under consideration have a Dice coefficient value of up to 69.12 %. This means that the resulting segmentation masks are reliable. The reliability of the segmentation is also evidenced by the relatively high value of the IOUScore [13].

Fig. 6 shows examples of annotated images for testing and the corresponding masks and defect contours predicted by the neural network. In the process of processing the original image, masks are first predicted (Fig. 6, *b*), which are then filtered by threshold level to obtain defect contours (Fig. 6, *c*). Comparing the contours of the defect detected by the network with the annotated contours (Fig. 6, *a*), we can conclude that the segmentation quality is high. This is confirmed by the quantitative indicators discussed earlier.

Fig. 7 shows a test image with defects of two different classes. Comparing the annotated image (Fig. 7, *a*) and the one predicted by the network (Fig. 7, *b*), we can see that the model found all the defects that are present on the surface. At the same time, some areas were mistakenly labeled as defective. The classes of correctly detected defects are correctly identified by the system.

Conclusions

According to the results of the analytical review, the prospects of improving the methods of automated image segmentation for detecting defects in metal surfaces by the visual-optical method have been established. The use of deep learning models has several advantages over classical segmentation methods. This provides greater control efficiency and higher system adaptability compared to traditional approaches.

It has been determined that the U-Net architecture currently demonstrates high-quality results in the segmentation of images with surface defects. For the used dataset, the Dice coefficient was obtained at the level of up to 69.12 % and the IOUScore up to 53.06 %. Additionally, we compared different backbones to determine the impact of their complexity

on the overall performance of the model. The results showed that more complex backbones do not provide higher control reliability.

Among the existing limitations, we can highlight the fact that training a neural network requires a large number of annotated images of metal surface defects. An insufficient number of images or their low representativeness leads to a deterioration in the quality of segmentation, which is a common drawback for all deep learning models. The use of the U-Net neural network may have limitations in the quality of segmentation if the defects on the metal surface are more complex than those on which the network was trained.

One possible area for further research is to improve the architecture of the neural network to improve the values of the obtained metrics. It is also interesting to investigate the possibility of using other types of neural networks or their hybrid models. Another important task is to expand the training data set. In particular, increasing the resolution of images, increasing the number of defect classes, and the quality of their annotations.

Due to the high adaptability of this method, we can consider using it for other purposes in the future. For example, for automated segmentation of defects on other types of surfaces. The use of neural networks in automated image segmentation has great potential for application in many fields, including medicine, industry, transportation, and many others.

References

1. Storozhyk, D.V., Protasov, A.G. (2022) Image processing technologies based on complexing data. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **4**, 17–26 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.03>
2. Skladchykov, I.O., Momot, A.S., Galagan, R.M., Bohdan, G.A., Trotsiuk, K.M. (2022) Application of YOLOX deep learning model for automated object detection on thermograms. *Information Extraction and Process*, **50**, 69–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2022.50.069>
3. Piironen, T., Silven, O., Pietikäinen, M., Laitinen, T., Strömmer, E. (1990) Automated Visual Inspection of Rolled Metal Surfaces. *Machine Vision and Applications*, **3**, 247–254.
4. Vorobel, R., Ivashenko, I., Berehulyak, O., Mandziy, T. (2021) Segmentation of rust defects on painted steel surfaces by intelligent image analysis. *Automation in Construction*, **123**, 103515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103515>
5. Aslam, Y., Santhi, N., Ramasamy, N., Ramar, K. (2020) Localization and segmentation of metal cracks using deep learning. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, **12**, 4205–4213. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01803-8>
6. Sharma, M., Lim, J., Lee, H. (2022) The Amalgamation of the Object Detection and Semantic Segmentation for Steel Surface Defect Detection. *Applied Sciences*, Vol. **12**, Issue 12, 6004. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12126004>
7. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015) U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham.
8. Steshenko, Y.V., Momot, A.S. (2022) Review of the effectiveness of neural network architectures for automated image segmentation. In: *Proc. of XVIII All-Ukrainian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists «Efficiency and automation of engineering solutions in instrument construction» (Kyiv, Ukraine, 06–07 December 2022)*, KPI, 226–229 [in Ukrainian].
9. Xiao, L., Zhu, Y., Punithakumar, K., Le, L.H., Li, B. (2020). Esophagus Segmentation in Computed Tomography Images Using a U-Net Neural Network with a Semiautomatic Labeling Method. *IEEE Access*, **8**, 202459–202468. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035772>
10. (2020) *Severstal: Steel Defect Detection*. Kaggle. Available at: <https://www.kaggle.com/competitions/severstal-steel-defect-detection/data> (Accessed: April 3, 2023).
11. He, H., Garcia, E.A. (2009) Learning from Imbalanced Data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. **21**(9), 1263–1284. DOI: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2008.239>
12. Maxwell, A.E., Bester, M.S., Guillen, L.A., Ramezan, C.A., Carpinello, D.J., Fan, Y., Hartley, F.M., Maynard, S.M., Pyyron, J.L. (2020) Semantic Segmentation Deep Learning for Extracting Surface Mine Extents from Historic Topographic Maps. *Remote Sensing*, Vol. **12**, Issue 24, 4145. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12244145>
13. Benjdira, B., Ammar, A., Koubaa, A., Ouni, K. (2020) Data-Efficient Domain Adaptation for Semantic Segmentation of Aerial Imagery Using Generative Adversarial Networks. *Applied Sciences*, Vol. **10**, Issue 3, 1092. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10031092>

Надійшла до редакції 12.04.2023



Проект «СОКРАТ» — програмно-апаратний пристрій для швидкого виявлення нерозірваних боеприпасів та мін з дистанційного знаходження вибухонебезпечних предметів на базі БПЛА.

Швидке обстеження великих територій, виявлення з високою точністю небезпечних об'єктів. Знайдені міни, боеприпаси будуть позначені на картах для подальшої утилізації.

Технологія «Дистанційне знаходження вибухонебезпечних предметів» на базі БПЛА з приладом пульсуючого електромагнітного зондування (ПЕМЗ) та LEM1-026 успішно пройшла попередні польові випробування.

Технологія визначення територій вибухонебезпечних предметів заснована на динамічному багатопараметричному методі ПЕМЗ та магнітометрії — зондування разом із аналізом випромінювань локальних аномалій пошукових об'єктів, що дозволяє дистанційно досліджувати фізичні показники територій вибухонебезпечних предметів з визначенням їхньої просторової локації.

Це принципово новий підхід, що дозволяє оперативно в дистанційному режимі з використанням БПЛА проводити дослідження по виявленню локації вибухонебезпечних предметів та після обробки даних надавати карту знаходження вибухонебезпечних предметів з прив'язкою до системи координат GPS та визначення можливих глибин залягання вибухонебезпечних предметів.

ДП «ГЕОРЕСУРС» (м. Київ)

ВПЛИВ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ ВОДНЮ З МЕТАНОМ НА ФІЗИЧНУ ТА ХІМІЧНУ СТРУКТУРУ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ ДІЮЧИХ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ

М.В. Юрженко^{1,2}, М.О. Ковальчук¹, В.Ю. Кондратенко¹, В.Л. Демченко^{1,2}, К.Г. Гусакова²,
В.С. Вербовський³, Г.В. Жук³, К.П. Костогриз⁴, І.А. Гоцик⁵

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: 4chewip@gmail.com

²Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України. 02160, м. Київ, вул. Харківське шосе, 48.
E-mail: dvaleriy1@ukr.net

³Інститут газу НАН України. 03113, м. Київ, вул. Дехтярівська, 39. E-mail: Verbovsky@nas.gov.ua

⁴ТОВ «Нафтогазбудінформатика». 04053, м. Київ, вул. Кудрявський узвіз, 56. E-mail: Kostohryz@nas.gov.ua

⁵ТОВ «Регіональна газова компанія». 01010, м. Київ, вул. Князів Острозьких, 32/2

У роботі досліджено вплив сумішей газоподібного водню з природним газом у співвідношеннях 10 % H₂/90 % CH₄ та 20 % H₂/80 % CH₄ на полімерні труби з ПЕ-80. Представлено результати комплексних структурних досліджень матеріалу поліетиленових труб з ПЕ-80, які попередньо експлуатувались у чинних газорозподільних мережах України, після 6-ти місяців їх наводнювання. Встановлено вплив газових сумішей на структуру матеріалу, що проявляється в зменшенні кількості кристалічної фази, розмірів кристалітів поліетилену та їх упорядкованості. Змін у хімічній структурі матеріалу поліетиленових труб не виявлено. Бібліогр. 10, табл. 5, рис. 8.

Ключові слова: поліетилен, ПЕ-80, суміші природного газу, суміші водню, транспорт водню

Вступ. Існуючі екологічні тренди із заміщення природного газу як основного виду палива як для промисловості, так і побутових споживачів ставлять нові виклики для полімерного матеріалознавства та науки в цілому. У розрізі збройної агресії РФ проти України питання використання альтернативних джерел палива наразі є більш ніж актуальним як для України, так і для світу. У даній роботі проведено дослідження впливу сумішей водню з природним газом на фізичну та хімічну структуру матеріалу поліетиленових труб з ПЕ-80 як найрозповсюдженішого матеріалу у діючих газорозподільних мережах України. Представлені результати є підґрунтям для майбутнього масштабнішого дослідження, метою якого є вивчення можливості транспортування чистого водню та водневих сумішей з природним газом діючими в Україні та ЄС газорозподільними мережами.

Матеріали. Для комплексних досліджень використовували дві газові суміші водню з метаном у співвідношенні 10 % H₂/90 % CH₄ та 20 % H₂/80 % CH₄. Для вивчення впливу газових сумішей на структуру матеріалу поліетиленових труб з використанням їх натурних зразків було побудовано науково-дослідний стенд (рис. 1). Для досліджень були відібрані зразки поліетиленових труб з ПЕ-80 зовнішнім діаметром 63 мм, товщиною стінки 3,6 мм, SDR 17,6, які були в експлуатації в діючих газопроводах протягом 15-ти років [1],

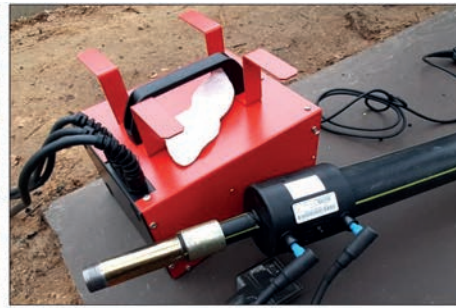
виробництва компаній ТОВ «Пластконструкція» (рис. 2, а) – позначені надалі як ST1 та ТОВ «Пластпайп» (рис. 2, б) – позначені надалі як ST2.

Зварювання поліетиленовими терморезисторними заглушками з ПЕ-100 для труб із зовнішнім діаметром 63 мм та діапазону SDR 11...17 виробництва компанії «Trans Quadro» проводили з використанням зварювального апарату «Оптіма 231» виробництва ТОВ «Терполімергаз» у відповідності до діючих нормативів та інструкції до зварювального обладнання [2].

Для наводнювання в зазначені терморезисторні заглушки попередньо були вварені трубні перехідники поліетилен ПЕ-80 (із зовнішнім діаметром 20 мм) – метал (зовнішнім діаметром 2/3 дюйма) з проточеною різьбою. Герметичність з'єднань було перевірено пневматично стиснутим повітрям при тиску 8 бар.

Методи досліджень. Для проведення структурних досліджень зі стінок поліетиленових труб вирізали зразки завтовшки 1 мм, як показано на рис. 3.

Структурні дослідження матеріалу внутрішньої поверхні стінки поліетиленових труб у повздовжньому напрямку до основної осі труби досліджували методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів на відбиття за допомогою рентгенівського дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu, Японія) за рентгенооптичною схемою за Бреггом-Брентано на відбиття первин-



б

Рис. 1. Науково-дослідний стенд для вивчення впливу водню та його газових сумішей з метаном на матеріал поліетиленових труб: загальний вигляд науково-дослідного стенду (а); процес терморезисторного зварювання стенду (б)



Рис. 2. Зразки поліетиленових труб з PE-80: ST1 (а) та ST2(б)



Рис. 3. Напрямок вирізання шліфів γ зі стінок поліетиленових труб для проведення структурних та теплофізичних досліджень

ного пучка досліджуваним зразком з використанням $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) і графітового монохроматора. Дослідження проведено методом автоматичного покрокового сканування в режимі 30 кВ, 30 мА в інтервалі кутів розсіювання (2θ) $3 \dots 60^\circ$ за часу експозиції 5 с [3, 4]. Температура проведення досліджень становила $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Інфрачервону спектроскопію матеріалу внутрішньої поверхні стінок та об'єму (на глибині 1 мм від внутрішньої поверхні стінки) поліетиленових труб проводили на відбиття на спектрометрі з Фур'є перетворенням «Tensor 37» виробництва компанії Bruker Corp. (Німеччина) в інтервалі довжин хвиль $600 \dots 3800 \text{ см}^{-1}$ [5] за температури $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ в режимі на відбиття з обох сторін зразків. Згідно з паспортом приладу відносна помилка вимірювань складала $< 2 \%$. На другому етапі робіт поліетиленові труби, які були наводнені газовими сумішами, розводнювали та продували газоподібним азотом.

Для транспортування зразків поліетиленових труб з найменшим впливом зовнішнього середовища їх вакуумували безпосередньо на полігоні (рис. 4), надалі транспортували до лабораторій у коробці, що виключала також дію світла.

Результати досліджень. 4.1. Рентгеноструктурний аналіз. На рис. 5 наведено результати рентгеноструктурного аналізу матеріалу поліетиленових труб до наводнювання. Аналіз широкоталкуватих рентгенівських дифрактограм зразків матеріалу поліетиленових труб показав, що всі вони



Рис. 4. Вакуумовані зразки поліетиленових труб для структурних досліджень

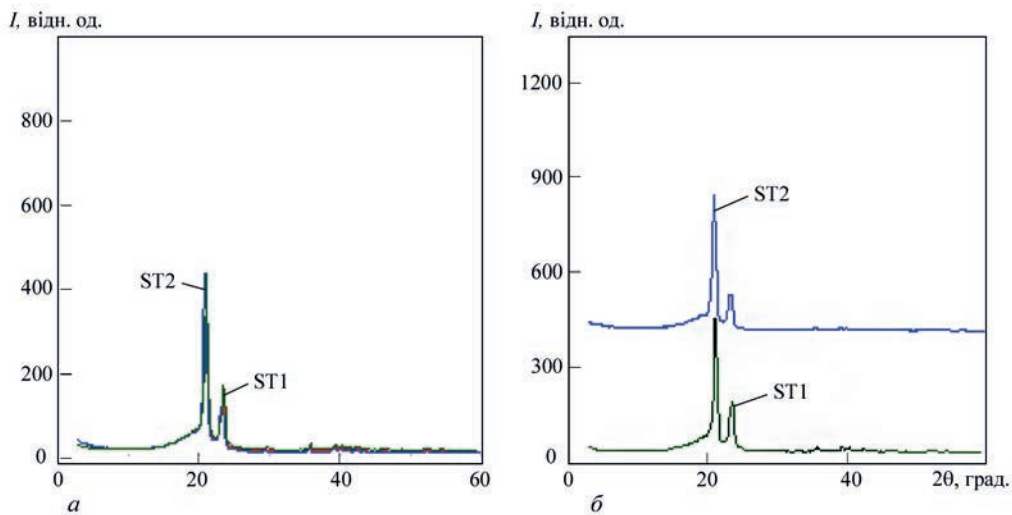


Рис. 5. Ширококутові дифракційні криві рентгеноструктурного аналізу матеріалу поліетиленових труб до наводнювання (а) та їх порівняльний графік (б): I , відн. од. – відносна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка

мають аморфно-кристалічну структуру, на що вказує присутність кристалічних дифракційних максимумів на фоні уявного аморфного гало з вершиною при $2\theta_{\max} \approx 20^\circ$ [6].

Відносний рівень кристалічності ($X_{\text{кр}}$) досліджуваних полімерних зразків обчислено за методом Метьюза [7]:

$$X_{\text{кр}} = Q_{\text{кр}}(Q_{\text{кр}} + Q_{\text{ам}})^{-1} \cdot 100 \quad (1)$$

де $Q_{\text{кр}}$ – площа дифракційних максимумів, які характеризують кристалічну структуру полімеру; $Q_{\text{кр}} + Q_{\text{ам}}$ – площа всієї дифрактограми в інтервалі кутів розсіювання ($2\theta_1 \div 2\theta_2$), у якому проявляється аморфно-кристалічна структура полімеру.

Результати розрахунку ступенів кристалічності матеріалу поліетиленових труб наведено в табл. 1. Оцінка показала, що для зразка поліетилену ST1 $X_{\text{кр}} = 63,18\%$, а для зразка та ST2 $X_{\text{кр}} = 62,38\%$.

Оцінка ефективного розміру кристалітів (L) зразків, проведена за методом Шеррера [8]:

$$L = K\lambda(\beta \cos\theta_{\max})^{-1}, \quad (2)$$

де K – стала, пов'язана з формою кристалітів (при невідомій їх формі $K = 0,9$), а β – кутова напівширина (ширина на половині висоти) дифракційного максимуму, показала, що середнє значення $L \approx 17,22$ нм та $14,39$ нм для ST1 та ST2 відповідно. Розмір кристалітів за окремими дифракційними максимумами для зразків ST1 і ST2 наведено в табл. 2, 3 відповідно, де ПШПМ – повна ширина на половині максимуму (ширина спектральної кривої, виміряна між тими точками на осі Y , які є половиною максимальної амплітуди), ПШПМ сум. – повна ширина на половині максимуму сумарна, ПШПМ інстр. – повна ширина на половині максимуму інструментальна.

Результати рентгеноструктурного аналізу матеріалу поліетиленових труб після 6-ти місяців наводнювання наведено на рис. 6. Встановлено, що зразки матеріалів поліетиленових труб ST1 і ST2, які були під дією газових сумішей, так само як і вихідні зразки, характеризуються аморфно-кристалічною структурою, на що вказує присутність кристалічних дифракційних максимумів на фоні уявного аморфного гало з вершиною при $2\theta_{\max} \approx 20^\circ$. Виявлено, що під дією газових сумі-

Таблиця 1. Ступінь кристалічності матеріалу поліетиленових труб, розрахована за даними рентгеноструктурного аналізу

Зразок	$X_{\text{кр}}$, %	L , нм
ST1	63,18	17,22
ST2	62,38	14,39

Таблиця 2. Розміри кристалітів за дифракційними максимумами зразка труби ST1

2θ, град.	d, Å	Спроб	ПШПМ сум., град.	ПШПМ інстр., град.	ПШПМ зразка, град.	Розмір кристалітів, Å
21,100	4,2106	19324	0,4000	0,1303	0,2697	299,9
23,500	3,7858	10260	0,6000	0,1303	0,4697	172,9
29,700	3,0081	640	0,8000	0,1267	0,6733	122,2
35,800	2,5083	899	0,6000	0,1132	0,4868	171,6
39,300	2,2926	1127	0,8000	0,1074	0,6926	121,9
40,300	2,2380	2986	2,6000	0,1059	2,4941	43,0
42,500	2,1271	692	0,8000	0,1029	0,6971	122,4
46,400	1,9570	428	0,8000	0,0984	0,7016	123,3
52,600	1,7400	607	0,8000	0,1011	0,6989	126,9

Таблиця 3. Розміри кристалітів за дифракційними максимумами зразка труби ST2

2θ, град.	d, Å	Спроб	ПШПМ сум., град.	ПШПМ інстр., град.	ПШПМ зразка, град.	Розмір кристалітів, Å
20,900	4,2505	29650	0,6000	0,1313	0,4697	172,1
23,250	3,8259	7690	0,6000	0,1313	0,4697	172,8
35,550	2,5253	534	0,4000	0,1137	0,2863	291,6
39,100	2,3039	800	0,8000	0,1077	0,6923	121,9
40,050	2,2514	462	0,6000	0,1063	0,4937	171,9
40,950	2,2039	557	0,9000	0,1050	0,7950	106,8
42,300	2,1367	529	0,8000	0,1032	0,6968	122,3

I, відн. од.

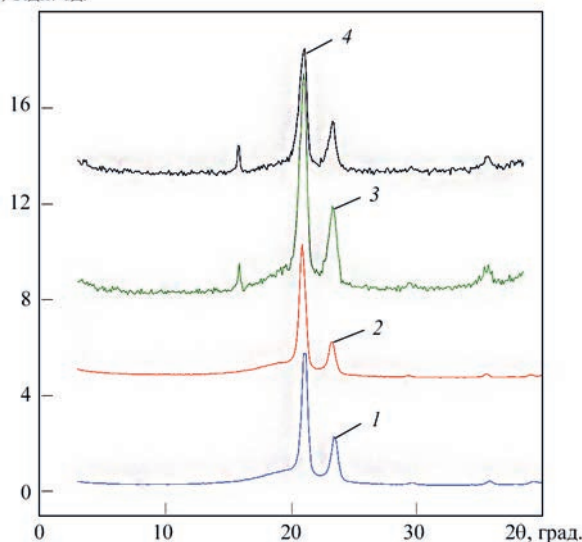


Рис. 6. Порівняльний графік ширококутових дифракційних кривих рентгеноструктурного аналізу матеріалу поліетиленових труб ST1 і ST2 до та після наводнювання: 1 – ST1, 2 – ST2, 3 – ST1 10 % H₂, 4 – ST2 20 % H₂

шей у матеріалі поліетиленових труб змінюється їх кристалічна структура, зокрема з'являються нові кристалічні піки при $2\theta_{\max} \approx 15,9^\circ$, а також зростає інтенсивність піків при $2\theta_{\max} \approx 29,5^\circ$ та $35,5^\circ$, що пов'язано зі зростанням кристалічності поліетилену [9]. Встановлено, що відносний ступінь кристалічності $X_{кр}$ матеріалу поліетиленових

труб ST1 та ST2, які знаходилися під дією газових сумішей 10 % H₂/90 % CH₄ та 20 % H₂/80 % CH₄ відповідно, є вищим у порівнянні з вихідним матеріалом (табл. 4).

Аналіз результатів рентгеноструктурного аналізу показав, що під дією газових сумішей відбувається зміна кристалічної структури, зокрема зменшення середнього розміру кристалітів L (зразки ST1 та ST1 10 % H₂). Для розрахунків використовували дифракційні максимуми при $2\theta_{\max} \approx 21,0^\circ$ та $23,4^\circ$. Розмір кристалітів та міжплощинні відстані за окремими дифракційними максимумами для зразків ST1 10 % H₂ та ST2 20 % H₂, які перебували під дією газових сумішей 10 % H₂/90 % CH₄ та 20 % H₂/80 % CH₄ відповідно, наведено в табл. 5, 6.

4.2. Інфрачервона спектроскопія. На рис. 7 наведено спектри інфрачервоної (ІЧ) спектроскопії матеріалу з внутрішньої поверхні та об'єму стінок зразків труб ST1 (рис. 7, а), ST2 (рис. 7, б) до наводнювання.

Таблиця 4. Ступінь кристалічності матеріалу поліетиленових труб, розрахований за даними рентгеноструктурного аналізу

Зразок	X _{кр} , %	L, нм
ST1	63,18	17,22
ST2	62,38	14,39
ST1 10 % H ₂	68,91	13,19
ST2 20 % H ₂	76,01	15,81

Таблиця 5. Розміри кристалітів за дифракційними максимумами зразка ST1 10 % H₂

2θ, град.	d, Å	Спроб	ПШПМ сум., град.	ПШПМ інстр., град.	ПШПМ зразка, град.	Розмір кристалітів, Å
17,250	5,1386	8	0,2000	0,1303	0,0697	1153,7
22,400	3,9658	821	0,7000	0,1303	0,5697	142,3
24,750	3,5943	321	0,8000	0,1303	0,6697	121,5
37,050	2,4246	61	0,8000	0,1110	0,6890	121,7

Таблиця 6. Розміри кристалітів за дифракційними максимумами зразка ST2 20 % H₂

2θ, град.	d, Å	Спроб	ПШПМ сум., град.	ПШПМ інстр., град.	ПШПМ зразка, град.	Розмір кристалітів, Å
17,250	5,1355	21	0,2000	0,1303	0,0697	1153,7
22,450	3,9571	269	0,4000	0,1303	0,2697	300,5
24,700	3,6012	149	0,6000	0,1303	0,4697	173,3
37,050	2,4245	47	0,8000	0,1110	0,6890	121,7
39,000	2,3076	6	0,4000	0,1078	0,2922	288,7

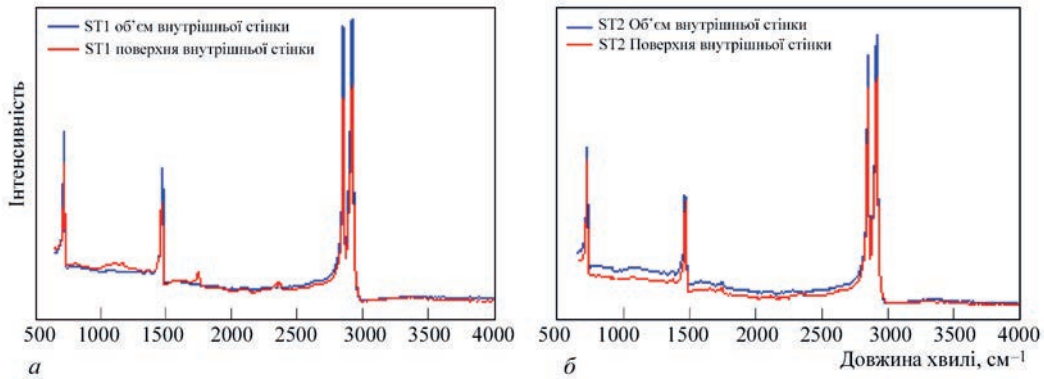


Рис. 7. ІЧ спектри матеріалу внутрішньої поверхні та об'єму стінок зразків труб до наводнювання: а – ST1; б – ST2

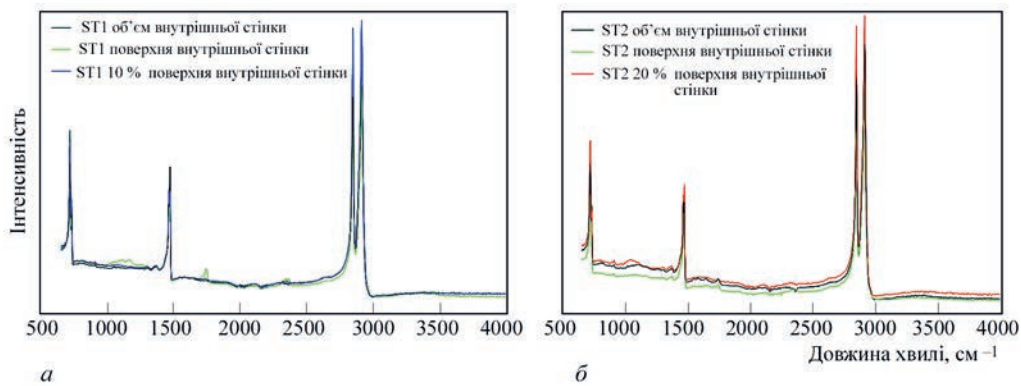


Рис. 8. Порівняльні ІЧ спектри матеріалу внутрішньої поверхні та об'єму стінок зразків труб до та після наводнювання: а – ST1 (10 % H₂/90 % CH₄); б – ST2 (20 % H₂/80 % CH₄)

Видно, що спектри поглинання для усіх зразків подібні і є типовими для поліетиленів. Однак тут необхідно зосередити увагу на появі додаткових ліній поглинання на спектрах зразків матеріалу з внутрішньої поверхні стінок труб ST1 та ST2 у порівнянні зі спектрами зразків матеріалу з об'єму стінок цих труб. Наявність ліній поглинання близько довжини хвилі 2400 см⁻¹, які відповідають за коливання CO₂ груп, може бути артефактом вимірювань, що пов'язано з оточуючим середовищем і наявним в ньому вуглекислим газом. Поява нових вище зазначених ліній поглинання у зразків з внутрішньої поверхні стінок труб ST1 та ST2 та їх відсутність у зразках з об'єму стінок цих труб може свідчити про певний вплив природного газу, який протягом 15-ти років транспортувався по цих трубах, на хімічну структуру поліетилену, з якого виготовлено труби ST1 та ST2. Цей факт необхідно враховувати при подальших дослідженнях усіх труб

після наступних етапів роботи, тобто після їх наводнювання.

Результати інфрачервоної спектроскопії після 6-ти місяців наводнювання представлено на рис. 8. З порівняльних ІЧ спектрів до і після 6-ти місяців наводнювання зразків усіх матеріалів поліетиленових труб видно, що хімічна структура поліетилену не зазнала змін, що впливає з відсутності нових або зсуву існуючих піків, які відповідають за хімічні зв'язки або групи атомів. Варто зазначити, що після наводнювання спектри з поверхні внутрішньої стінки труби зразків труб, які знаходилися в експлуатації, є подібними до спектрів зразків матеріалу цих труб з об'єму, тобто можна говорити, що хімічна структура матеріалу поверхні цих труб стала ідентичною до структури матеріалу об'єму.

Окремо необхідно зазначити, що на спектрах зразків, які знаходилися під дією газової суміші 20 % H₂/80 % CH₄, підвищується інтенсив-

ність піків у діапазоні довжин хвиль 1000...1200 та 3300...3500 cm^{-1} , які відповідають за коливання С-О-Н та -ОН груп, що може свідчити про певну взаємодію молекул водню з полімерними ланцюгами поліетилену, ймовірно дипольного характеру, з їх бічними групами атомів [10].

Висновки

У роботі проведено комплексні дослідження впливу газових сумішей водню з метаном у двох співвідношеннях 10 % H_2 /90 % CH_4 та 20 % H_2 /80 % CH_4 на фізичну та хімічну структуру матеріалу поліетиленових труб з ПЕ-80, які були в експлуатації в діючих газорозподільних мережах України протягом 15-ти років.

Встановлено, що матеріали труб, які були в експлуатації протягом 15-ти років, зазнали певних структурних змін, ймовірно під дією природного газу, що проявляється в зменшенні кількості кристалічної фази та розмірів кристалітів поліетилену, а також у появі додаткових хімічних груп у матеріалі внутрішньої поверхні труб.

Встановлено наявність впливу газових сумішей 10 % H_2 /80 % CH_4 та 20 % H_2 /80 % CH_4 на кристалічну фазу. Виявлено зменшення розмірів кристалітів поліетилену та їх упорядкованості під дією газових сумішей в об'ємі труб. При цьому на поверхні внутрішньої стінки труб виявлено появу кристалітів нової форми. Вплив газових сумішей на матеріал поліетиленових труб має фізичний характер.

Змін у хімічній структурі матеріалу поліетиленових труб не виявлено.

Список літератури/References

1. Byrne, N., Ghanei, S., Manjarres Espinosa, S., Neave, M. (2023) Influence of hydrogen on vintage polyethylene pipes: slow crack growth performance and material properties.

International Journal of Energy Research, Vol. 2023, Article ID 6056999. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6056999>

2. Юрженко М.В., Шестопал А.М., Гохфельд В.Л. та ін. (2018) *Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас*. Патон Б.Є. (ред.); НАН України, Ін-т електрозварювання ім. С.О. Патона. Київ, Наукова думка.

Yurzhenko, M.V., Shestopal, A.M., Hochfeld, V.L. et al. (2018) *Dictionary-handbook on welding and gluing of plastics*. Ed. by B.E. Paton, NASU, E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Naukova dumka [in Ukrainian].

3. Липатов Ю.С., Шилов В.В., Гомза Ю.П., Кругляк Н.Е. (1982) *Рентгенографические методы исследования полимеров*. Киев, Наукова думка.

Lipatov, Yu.S., Shilov, V.V., Gomza, Yu.P., Kruglyak N.E. (1982) *X-ray research methods of polymers*. Kyiv, Naukova dumka. [in Ukrainian].

4. Kratky, O., Pilz, I., Schmitz, P.J. (1966) Absolute intensity measurement of small-angle x-ray scattering by means of a standard sample. *J. Colloid Interface Sci.*, 21(1), 24–34.

5. Matkowska, M.V., Iurzhenko, Ye.P., Mamunya, V. et al. (2018) *Chapter 11. Structure and electrical/dielectric properties of ion-conductive polymer composites based on aliphatic epoxy resin and lithium perchlorate salt*. *Springer Proceedings in Physics. Nanochemistry, Biotechnology, Nanomaterials, and Their Application*, Cham, Switzerland: Springer International Publ., 177–203.

6. Galchun, A., Korab, N., Kondratenko, V. et al. (2015) Nanostructurization and thermal properties of polyethylenes' welds. *Nanoscale Res. Lett.*, 10, Article number 138. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0832-4>

7. Штомпель В.И., Керча Ю.Ю. (2008) *Структура линейных полиуретанов*. Киев, Наукова думка.

Stoppel, V.I., Kercha, Yu.Yu. (2008) *The structure of linear polyurethanes*. Kiev, Naukova dumka [in Russian].

8. Гинье А. (1961) *Рентгенография кристаллов. Теория и практика*. Пер. с англ. Москва, Физматгиз.

Ginye, A. (1961) *Radiography of crystals. Theory and practice*. Trans. from English. Moskov, Fizmatgiz [in Russian].

9. Demchenko, V., Iurzhenko, M., Shadrin, A. et al. (2017) Relaxation behavior of polyethylene welded joints. *Nanoscale Res. Lett.*, 12, Article number 280. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2059-z>

10. Klopffer, M.-H., Berne, P., Espuche, E. (2015) Development of innovating materials for distributing mixtures of hydrogen and natural gas. Study of the barrier properties and durability of polymer pipes. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 70(2), 305–315. DOI: <https://doi.org/10.2516/ogst/2014008>

INFLUENCE OF HYDROGEN-METHANE GAS MIXTURES ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL STRUCTURE OF POLYETHYLENE PIPES OF THE OPERATING GAS-DISTRIBUTION NETWORKS OF UKRAINE

M.V. Iurzhenko², M.O. Kovalchuk¹, V.Yu. Kondratenko¹, V.L. Demchenko^{1,2}, K.G. Gusakova², V.S. Verbovskiy³, G.V. Zhuk³, K.P. Kostohryz⁴, I.A. Gotsyk⁵

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: svarka2000@ukr.net

²Institute of Macromolecular Chemistry of NASU. 48 Kharkiv Hwy, 02160, Kyiv, Ukraine. E-mail: dvaleriy@ukr.net

³Gas Institute of NASU. 39 Dekhtyarivs'ka str., 03113, Kyiv, Ukraine. E-mail: Verbovsky@nas.gov.ua

⁴«Naftogasbudinformatika» Company. 5b Kudryavsky uzvyz, 04053, Kyiv, Ukraine. E-mail: Kostohryz@nas.gov.ua

⁵«Regional Gas Company» LLC. 32/2 Princes of Ostroh str., Kyiv, Ukraine

The work is a study of the influence of mixtures of gaseous hydrogen with natural gas with the ratios of 10 % H_2 /90 % CH_4 and 20 % H_2 /80 % CH_4 on PE-80 polymer pipes. The paper presents the results of complex structural investigations of the material of polyethylene pipes from PE-80, which were used earlier in the operating gas distribution networks of Ukraine, after 6 months of their hydrogenation. The influence of gas mixtures on the material structure was established, which is manifested in reduction of the quantity of the crystalline phase, polyethylene crystallite dimensions and their orderliness. No changes in the chemical structure of the polyethylene pipe material were found. 10 Ref., 5 Tabl., 8 Fig.

Keywords: Polyethylene, PE-80, natural gas mixtures, hydrogen mixtures, hydrogen transportation

Надійшла до редакції 03.05.2023

В.М. УЧАНІНУ – 75!



Колектив Інституту електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, редколегія та редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» щиро вітають доктора технічних наук, провідного наукового співробітника Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, заступника головного редактора нашого журналу Валентина Миколайовича Учаніна з ювілеєм!

В.М. Учанін — відомий науковець та експерт у галузі неруйнівного контролю і діагностики матеріалів електромагнітними методами. У Фізико-механічному інституті працює з 1971 р. по даний час, де пройшов шлях від інженера до завідувача лабораторії. У 1992–2000 рр. працював начальником відділу у науково-дослідному і проєктному інституті приладів автоматичного регулювання і систем управління «Промприлад». У 1983 р. успішно захистив кандидатську, а у 2017 р. — докторську дисертацію. В.М. Учаніним розроблено наукові основи створення нових засобів і технологій вихрострумової дефектоскопії і структуроскопії матеріалів та об'єктів, що характеризуються високим рівнем завод. Ним запропоновано принципи побудови вихрострумівих перетворювачів подвійного диференціювання, вихрострумівих дефектоскопів і структуроскопів для контролю відповідальних конструкцій в умовах виробництва та експлуатації, які також стали основою низки автоматизованих систем контролю (НВФ «Ультракон-сервіс», НВФ «Промприлад»). Нові технічні рішення використано для створення дефектоскопів типу ДУЕТ, ПОЛІТ, ЛЕОТЕСТ (ВД 3.01, ВД 3.02, ВД 3.03, ВД 4.01, ВД. 3.03АН), ОКО-01, ВД3-71, ВД3-81 і ЕДДІКОН. Прилади впроваджено в космічній та авіаційній галузі (КБ «Туполєв», ДП «Антонов», ПАТ «Мотор-Січ», ДП «Івченко-Прогрес», ДКБ «Південне», Авіакомпанія «МАУ», Миколаївський, Конотопський, Львівський, Одеський авіаремонтні заводи) та інших галузях (ДП «Завод ім. В. Малишева», ПАТ ДТЕК «Західенерго», ГПУ «Львівгазвидобування», НВФ «Зонд», Карпатському та Полтавському експертно-технічних центрах, Нововолинському ливарному заводі тощо). Створено структуроскопи типу Альфа та Дельта для виявлення газонасичених шарів титанових сплавів в інтересах авіаційного двигунобудування. Запропоновано принципи побудови приладів для безконтактного вимірювання

електропровідності алюмінієвих сплавів, на базі яких створено нову методологію визначення технічного стану об'єктів довготривалої експлуатації за параметрами циклічної тріщиностійкості. Це використано для оцінювання деградації алюмінієвих сплавів літаків довготривалої експлуатації та оптимізації режимів зварювання конструкцій із алюмінієвих сплавів (ДП «Антонов»). Запропоновано нові способи та засоби для визначення напруженого стану конструкцій із феромагнітних сталей за змінами магнітної анізотропії, які використано для визначення залишкових і робочих напружень у зоні зварних швів, моніторингу мостових конструкцій під час монтажу. Протягом багатьох років Валентин Миколайович організовував і проводив щорічну Карпатську конференцію з неруйнівного контролю в Славську. В.М. Учанін є автором 130 патентів і авторських свідоцтв, понад 320 публікацій і 5 монографій. Він є членом Міжнародної академії неруйнівного контролю (Брешія, Італія), членом правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, заступником головного редактора журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», членом редакційної колегії журналів «Відбір і обробка інформації», «The Paton Welding Journal» і «Методи та прилади контролю якості». За роботи, пов'язані з розв'язанням проблем діагностики авіаційної техніки, у 2017 р. В.М. Учаніну було присуджено Державну премію України в галузі науки і техніки, а у 2020 р. за вагомий особистий внесок у розвиток вітчизняної науки, зміцнення науково-технічного потенціалу України, багаторічну сумлінну працю та високий професіоналізм було присвоєно почесне звання «Заслужений винахідник України».

Валентин Миколайович — талановита людина не тільки в науці. Він є відомим українським джазовим музикантом-саксофоністом, учасником легендарних груп «Клуб шанувальників чаю», «Тендер блюз» і «Dzyga Jazz Quintet», що представляли Львів та Україну на фестивалях і концертах по всьому світу та назавжди завойовували любов шанувальників в Україні та далеко за її кордонами. Його ім'я можна знайти в Енциклопедії Українського джазу.

Валентин Миколайович Учанін все своє життя присвятив науковій діяльності, його праці — безцінний внесок у розвиток науки і техніки нашої країни!

Щиро бажаємо ювіляру міцного здоров'я, успіхів і благополуччя!



НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

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



ПРЕДСТАВЛЯЄМО НОВИХ ЧЛЕНІВ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА НКТД

The New Members of Ukrainian Society for NDT

- **Пуларія Андрій Луарсабович**
к.т.н., доцент кафедри «Вагони та вагонне господарство» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро
- **Смолін Юрій Олександрович**
к.т.н., професор кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики» НТУУ «Харківський політехнічний інститут»
- **Шведова Вікторія Вікторівна**
к.т.н., доцентка кафедри «Інформаційно-вимірвальні технології» НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Зельніченко Олександр Тимофійович**
к.ф.-м.н., директор Міжнародної Асоціації «Зварювання», м. Київ
- **Синиця Валентин Іванович**
к.т.н., доцент кафедри «Інформаційно-вимірвальні технології» НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Аніськов Олександр Володимирович**
Науково-дослідний гірничорудний інститут Криворізького національного університету
- **Полянський Дмитро Анатолійович**
ТОВ «ТЮФ ТЮРИНГЕН УКРАЇНА», м. Київ
- **Романова Ірина Юрївна**
к.т.н., старша наукова співробітниця Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ

ІСТОРІЯ ЗАПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ СИСТЕМИ СЕРТИФІКАЦІЇ ПЕРСОНАЛУ

В.О. Троїцький

Багато подій у нашій діяльності пов'язано із запровадженням в Україні трирівневої системи сертифікації фахівців з НК. Тут є що згадати цікаве. А саме, як ця система потрапила до України, де на той час панувала розрядна система кваліфікації дефектоскопістів.

Був час, коли ми співпрацювали з трьома організаціями Данії:

- електротехнічною фірмою Migatronіc, що виробляє зварювальні джерела живлення;
- інститутом FORCE (інститут, подібний до Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та ВАРМ, Німеччина);
- громадським інститутом JOM, який конкурує з Міжнародним інститутом зварювання (IIV).

Про кожну з цих організацій можна розповісти багато чого. Бувало, що ми за одне відрядження відвідували всі ці три організації.

Наше знайомство з трирівневою системою почалося з того, що данська електротехнічна фірма Migatronіc зацікавилася моїми розробками щодо джерел живлення та запропонувала співпрацю у цій галузі: розробляти разом сучасні джерела зварювального струму. На жаль, це відбувалося в період завершення моєї діяльності в галузі зварювальної електротехніки. Враховуючи дешеву робочу силу, низькі зарплати в Україні та високу вартість зварювального обладнання на Заході, до-

цільною представлялася кооперація, яка полягала в тому, щоб на Дослідному заводі зварювального устаткування ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (нині ТОВ «Патон Інтернешнл») із сучасних комплектуючих, що виготовляються в Данії, збирати електронні панелі, трансформатори, блоки силових випрямлячів та інші вузли. Ці блоки мали надходити на збирання з них готового обладнання та подальшу реалізацію до Данії. Планувалося зробити спільне виробництво. Цю ідею підтримали Б.Є. Патон, заступник директора В.К. Лебедев, дирекція Дослідного заводу ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Для запровадження такої співпраці до Данії було направлено групу фахівців, до якої входили В.О. Троїцький, Ю.К. Бондаренко, Ю.К. Коржов та два технологи заводу. Протягом місяця ми працювали з данськими колегами над спільними розробками. У результаті було випущено партію зварювальних випрямлячів. Крім мене та Ю.К. Бондаренка згодом на фірмі Migatronіc побували Б.Є. Патон та В.К. Лебедев. У свою чергу, керівництво фірми Migatronіc відвідало ІЕЗ та наш Дослідний завод.

Основним замовником обладнання, що виробляється фірмою Migatronіc є Данський інститут зварювання FORCE. Ця організація за своєю структурою нагадує ІЕЗ, має деяке державне фінансування під конкретні роботи. В інституті FORCE добре розвинені зварювальні та дефек-

тоскопічні напрямки. Там же була розташована штаб-квартира Данського товариства НК. Після чорнобильської катастрофи для виконання завдань з дефектоскопії на українських АЕС інститут FORCE поставив в Україну свою знамениту систему «P-scan» і навчив нас новим на той час цифровим технологіям УЗК: TOFD, SAFT. Велика група співробітників нашого відділу (Є.О.Давидов, Ю.К. Бондаренко, О.М. Козін, А.Л. Шекеро, В.В. Кузьмін, С.П. Чуйков) більше місяця навчалася в Інституті FORCE і отримала відповідні сертифікати. Використовуючи систему «P-scan», ми пізніше проводили роботи на Чорнобильській, Хмельницькій та інших АЕС України. Технології TOFD та SAFT стали згодом відтворювати й інші приладобудівники.

Інститут JOM — це третя організація Данії, з якою ми співпрацювали багато років. Це громадський інститут, подібний до Міжнародного інституту зварювання (IIW), який існує на членські внески організацій, що до нього входять. У сесіях інституту JOM, постійними учасниками яких були й ми, брало участь багато різних організацій, включаючи дружні фірми Migatronіс і FORCE. На Шостій щорічній сесії цього інституту з нами були Б.Є. Патон та В.К. Лебедев. Згодом керівники інституту JOM були в ІЕЗ. На жаль, лоббі Міжнародного інституту зварювання «вбило» інтерес у Б.Є. Патона до інституту JOM. Зварники ІЕЗ ігнорували JOM, оскільки боялися погіршення відносин із IIW. Інститут JOM у своїй діяльності копіював та критикував IIW. Однак наш відділ продовжував співпрацю з JOM, відвідував їхні сесії і це відіграло важливу роль у нашому розвитку, зокрема, у знайомстві та освоєнні тривірневої системи атестації та сертифікації персоналу з НК.

В один з наших приїздів до Данії після відвідин фірми Migatronіс ми заїхали до інституту FORCE. Наполіг на цій поїздки Ben Larsen, провідний дефектоскопіст цього інституту, президент Данського товариства НК. Він запевнив нас, що в Інституті FORCE цього разу буде дуже цікаво, що на нас чекає історична подія. Ми потрапили на засідання Європейської комісії із заснування та обговорення стандарту EN 473 — першого основоположного документа з тривірневої системи атестації та сертифікації фахівців з НК. Ми не були делегатами цих зборів. Ба більше, ми були

присутні «через завісу». Нас на цей захід приватним порядком провів Ben Larsen, який поділився з нами ухваленими на цій комісії документами та першою версією стандарту EN 473. Усі матеріали було надруковано данською мовою. Саме таким чином інформація про тривірневу (а не розрядну) систему сертифікації фахівців, про новий стандарт EN 473 потрапила до нас. Трохи згодом EN 473 надійшов до нас через Берлінський інститут ВАМ і Німецьке товариство НК (DGZfP). Через кілька років ми разом з Н.Г. Білим, Ю.К. Бондаренком та іншими освоювали правила, що встановлював цей стандарт у SIMENS-містечку Берліна, де знаходилася штаб-квартира Німецького товариства НК.

У всіх країнах Європи сертифікацією персоналу з НК опікуються національні товариства неруйнівного контролю. Тому цим процесом в Україні зайнялося УТ НКТД. Для організації в Україні системи сертифікації персоналу, що виконує роботи з дефектоскопії, розробки галузевих нормативних документів з сертифікації персоналу, у 1994 р. спільним наказом Міністерства освіти та науки України, Національної академії наук України, Міністерства праці та соціальної політики і Міністерства палива та енергетики в структурі УТ НКТД був створений Національний атестаційний комітет України з неруйнівного контролю (НАКУНК). Велику активність у цьому процесі виявили кафедри провідних ВНЗ, зацікавлені у просуванні дефектоскопічних знань, своїх розробок у виробництво. Назви зацікавлених кафедр були різні і тоді не було такого поняття як «інженер з НК», але завданнями дефектоскопії займалися на багатьох, переважно, електротехнічних та акустичних кафедри. Незабаром УТ НКТД заснувало в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона перший в Україні Атестаційний центр неруйнівного контролю (АЦНК при ІЕЗ ім. Є.О.Патона), створили Центр сертифікації (ЦС при УТ НКТД) та почали створювати аналогічні центри в інших містах України.

Сертифікація за EN 473 стосувалася переважно робітників-дефектоскопістів, раніше атестованих за розрядною робочою сіткою. До честі нашої професії слід зазначити, що робітники-дефектоскопісти належали до категорій високого розряду, не нижче п'ятого. Тільки елітна частина фахівців,



Спеціалісти ІЕЗ ім. Є.О. Патона на стажуванні Данському інституті зварювання FORCE, 1995 р.

що мала вищу освіту та вчені ступені, отримали третій рівень кваліфікації. Практично всі галузі промисловості в Україні (хіба що за виключенням атомної енергетики) впровадили тоді трирівневу систему сертифікацію персоналу з НК. Нині Європейський стандарт EN 473 припинив свою дію, оскільки був замінений на аналогічний міжнародний стандарт ISO 9712.

Усе те, що було описано вище, відбувалося задовго до появи в країні Національного агентства з акредитації (НААУ). Сьогодні процесом сертифікації персоналу НК в Україні займаються вісім органів із сертифікації і пара десятків атестаційних центрів, які часто не мають а ні традицій, а ні хорошого обладнання, а ні досвідчених фахівців, але мають атестат НААУ, тоді як у всьому світі цим процесом займаються національні товариства з НК, у яких об'єднано досвідчених фахівців з фізичних методів контролю якості.

Професія НК є емпіричною. Треба не тільки щось знати з теорії, але й уміти працювати своїми

руками, а цей досвід здобувається роками, у процесі виконання конкретних робіт. У цьому плані Центр сертифікації при УТ НКТД і АЦНК при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона помітно виділяються серед численних закладів, які видають документи дефектоскопістам. Відділ №4 ІЕЗ займається дефектоскопією понад 50 років. Наш колектив дефектоскопістів зберігає свої традиції, має практичні та технологічні можливості, відповідні лабораторії та обладнання, тому в ІЕЗ можна отримати як теоретичні, так і практичні знання з НК. ЦС при УТ НКТД проводить сертифікацію персоналу НК за трьома стандартами: EN ISO 9712, американським SNT-TC-1A і стандартом Українського товариства НКТД. Ми допомагаємо створювати навчальні центри з дефектоскопії в інших країнах, удосконалюємо процеси навчання персоналу, вводимо комп'ютеризацію окремих процедур і тренінг із використанням відповідних тренажерів.

Делегації спеціалістів УТ НКТД завжди були бажаними учасниками всіх європейських та все-



7-а Європейська конференція з НК в Копенгагені (1998 р.)



15-а Всесвітня конференція з НК в Римі (2000 р.)



8-а Європейська конференція з НК в Барселоні (2002 р.)



16-а Всесвітня конференція з НК в Монреалі (2004 р.)



9-а Європейська конференція з НК в Берліні (2006 р.)



17-а Всесвітня конференція з НК в Шанхаї (2008 р.)



10-а Європейська конференція з НК в Москві (2010 р.)



18-а Всесвітня конференція з НК в Дурбані (2012 р.)



19-а Всесвітня конференція з НК в Мюнхені (2016 р.)

світніх конференцій з НК, які відбуваються кожні два роки. Європейська федерація з неруйнівного контролю (EFNDT) та Міжнародний комітет з неруйнівного контролю (ICNDT) встановили традицію проводити свої заходи один раз на 4 роки зі зміщенням на 2 роки. Так, наші фахівці, які активно працюють в УТ НКТД, побували на цих грандіозних міжнародних форумах в Данії (1998 р.), Італії (2000 р.), Іспанії (2002 р.), Канаді (2004 р.), Німеччині (2006 р.), КНР (2008 р.), Росії (2010 р.), ПАР (2012 р.), Чехії (2016 р.), знову в Німеччині (2016 р.), а також на національних конференціях в Хорватії, Греції, Польщі та в інших країнах, де проводилися заходи EFNDT, ICNDT та ANDTI. На всіх конференціях, які проводили EFNDT та ICNDT, були доповіді українських спеціалістів, а УТ НКТД мала свій представницький стенд, на якому часто тулилися представники інших країн колишнього СРСР. Впевнений, що заходи EFNDT та ICNDT згодом відбуватимуться й в Україні.

Усі 50 років, які я займаюся проблемами НК, ми розраховуємо на краще майбутнє, як і сьогодні. Зараз мені як члену Американського товариства неруйнівного контролю (ASNT), автору статей в американських журналах, запропонували організувати філію ASNT в Україні. Членами ASNT, крім мене, є ще кілька представників УТ НКТД. Щороку згідно з Договором про двостороннє співробітництво між УТ НКТД і ASNT Товариство приймає до своїх лав президента і виконавчого директора ASNT і, відповідно, оновлюємо власне членство в ASNT. Щорічно ми отримуємо запрошення на заходи, які проводяться ASNT.



ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТИТАНОВИХ СУГЛОБНИХ ІМПЛАНТАТІВ

В.О. Троїцький, М.Ю. Косякова, С.Р. Михайлов, Л.В. Мартинова,
Р.О. Пастовенський, М.М. Карманов

Виготовлення титанових суглобних імплантатів (ендопротезів) є однією з важливих задач медичної техніки, які застосовуються в травматології, ортопедії та онкоортопедії у клінічних установах. Такі вироби виготовляються на ТОВ «КОРТЕКС» на основі 3D друку заготовок з подальшою термічною обробкою. Це так звані адитивні технології (АТ) [1]. Для 3D друку заготовок ендопротезів тазостегнового суглобу використовується порошок з титанового сплаву. Друк здійснюється за допомогою 3D принтера «Concept Laser M2». Термічна обробка проводиться в захисному шарі аргону.

Ендопротези включають різновиди компонентів, які призначені для безцементного, цементного та гібридного ендопротезування тазостегнового суглоба. Деталі ендопротезів мають трабекулярну (пористу) структуру, що передбачає шорсткість поверхонь. Найрозповсюдженішими методами АТ для виготовлення металевих структур з функціональним градієнтом є методи селективного лазерного та електронно-променевого плавлення. Градієнтні структури, отримані методом АТ, дозволяють забезпечувати зниження модуля пружності за рахунок наявності в них значного об'єму пор. Існує широкий асортимент імплантатів як з наскрізною пористістю, так і з суцільною основою з наявною пористою структурою на їх поверхні. Їх виготовляють відомі світові виробники (рис. 1).

Кожен з цих елементів може бути виготовлений під індивідуальне замовлення, якщо до опе-

рації хворий пройшов вимірювальне рентгено-телевізійне обстеження та було отримано його цифрове радіоскопічне зображення. Далі йде виготовлення точної копії елемента суглоба. Спочатку модель елемента, далі реальний виріб. У доопераційний період важливим є оцінювання розмірів кісток, де планується розміщення імплантату. Це можливо зробити за допомогою гострофокусного випромінювача та радіоскопічного сенсора, що дають можливість побудувати образ потрібного пацієнту імплантату з урахуванням усіх індивідуальних даних.

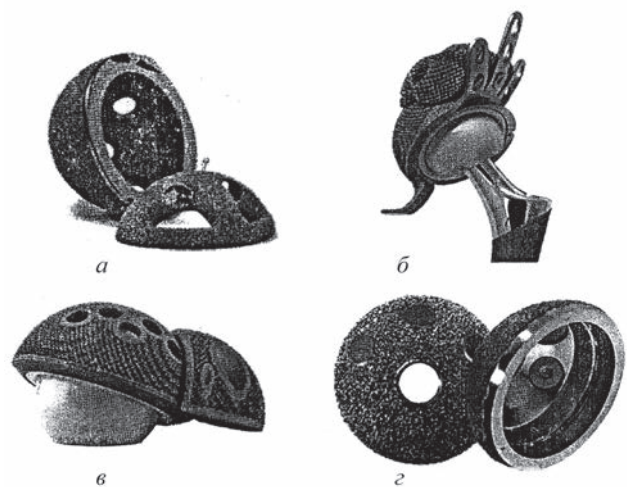


Рис. 1. Зовнішній вигляд імплантатів, отриманих із застосуванням АТ технологій: а — Zimmer Biomet Trabecular Metal™; б — Lima Corporate Trabecular Titanium; в — Gruppo Bioimplant Fin System; з — Permedica Orthopedics Trabecular Titanium TRASER

Невиконання належного доопераційного планування призводить до помилок (з точки зору вибору типу протезу і правильного розміру імплантату).

Операцію слід точно спланувати на основі результатів радіоскопії та просторової реконструкції з виготовленням моделі на основі комп'ютерної томографії. Таке обстеження забезпечує важливу інформацію щодо вибору типу імплантату, його розміру та можливих комбінацій.

Для забезпечення високої якості елементів імплантатів необхідно провести дослідження радіаційним методом контролю. При цьому досліджується цілісність компонентів ендопротезів, стан внутрішньої структури, наявність тріщин та інших дефектів у штучних суглобах.

Радіаційний метод оцінки якості поділяється на плівкову радіографію та радіоскопію. Радіографія з використанням радіографічної плівки широко застосовуються в промисловості. Проте плівкова радіографія має істотні недоліки: неможливість проводити дослідження об'єктів у реальному часі, низьку продуктивність, малу придатність для багаторазового обстеження.

Альтернативою плівковій радіографії слугують цифрові радіоскопічні системи, які забезпечують високу чутливість і роздільну здатність, дозволяють проводити обстеження виробів у реальному часі та значно підвищують продуктивність. Такі системи, разом з підвищенням продуктивності та зниженням вартості, дозволяють також здійснювати комп'ютерну обробку і аналіз цифрових зображень, створювати електронні архіви пошарових цифрових зображень, документувати зображення, будувати цифрові моделі з використанням комп'ютерних мереж.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ для компанії «КОРТЕКС» контроль якості компонента ендопротезу тазостегнового суглобу виконувався за допомогою цифрової радіоскопічної системи РТВ-4 (рис. 2). Система РТВ-4 побудована за схемою «сцинтилятор-ПЗЗ». Сцинтиляційний екран перетворює тіньове рентгенівське зображення контрольованого об'єкта у видиме. Перенесення видимого зображення з екрана на ПЗЗ-матрицю телевізійної камери відбувається з його поворотом на 90°. Оптична система складається з об'єктива та дзеркала. Для захисту від прямого рентгенівського випромінювання, яке може негативно впливати на ПЗЗ-матрицю, телевізійну камеру розміщено в захисному свинцевому екрані. У якості сцинтилятора в системі застосовується оксисульфід гадолінію, активований тербієм Gd202S:Tb.

На рис. 3, 4 наведено цифрові зображення, що були отримані в процесі проведення радіоскопічного контролю при наступних параметрах: прискорююча напруга — 70 кВ, анодний струм — 10 мА, фокусна відстань — 700 мм, час накопичення зображення — 13 с. Задіяне обладнання: рентге-

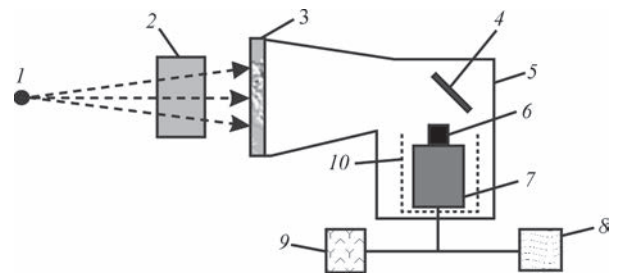


Рис. 2. Схема установки РТВ-4: 1 – рентгенівський апарат, 2 – об'єкт, що контролюється, 3 – сцинтилятор, 4 – дзеркало, 5 – корпус, 6 – об'єктив, 7 – ПЗЗ-камера, 8 – комп'ютер, 9 – монітор, 10 – свинцевий екран

нівський апарат РАП 150/300 та цифрова радіоскопічна система РТВ-4. Структура готового ендопротезу є пористою. Максимальний розмір пор достатньо великий — 200...300 мкм. Оптимальна пористість визначається біологічними вимогами. При інших АТ середній діаметр пор може бути 500...600 мкм.

Роздільна здатність у РТВ-4 дорівнює 80 мкм, що відповідає мінімальному розміру тріщин, що виявляються. Якщо недостатньо такого виявлення мікрodefектів, наприклад тріщин з розкриттям порядку 20...30 мкм, для цієї підвищеною чутливості, застосовується інша скануюча рентгенотелевізійна система на основі твердотільного рентгенівського міні-сенсора, показаного на рис. 5, який широко використовується у стоматології [2, 3].

Типові технічні характеристики такого сенсора:

- робоча зона 34×24 мм;
- роздільна здатність 1700×1200 пікселів (25 пар ліній на мм);
- АЦП 12 біт;
- розмір пікселя 20 мкм;
- розмір датчика 42,5×30×13 мм.

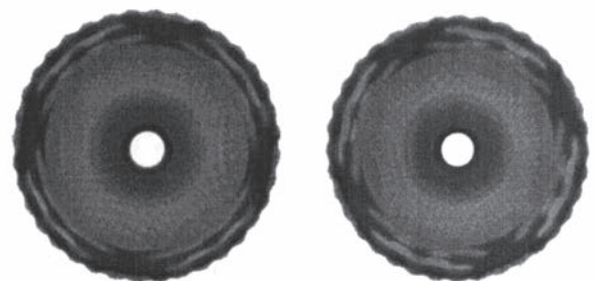


Рис. 3. Цифрові радіоскопічні зображення компонента ендопротеза тазостегнового суглобу

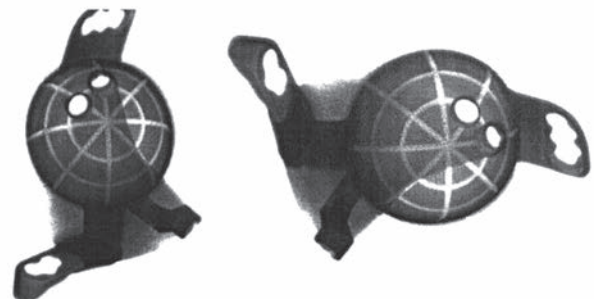


Рис. 4. Цифрові радіоскопічні зображення компонента ендопротеза тазостегнового суглобу

Для дослідження великих об'єктів використовується сканування поверхні об'єкта з наступним цифровим (програмним) зшиванням окремих суміжних фрагментів послідовно зчитаних рентгенівських зображень. У цьому випадку для контролю зони 100×100 мм знадобиться виконати сканування 4×3 фрагментів цифрового зображення. Цифрова обробка такого зображення не перевищує трьох хвилин. Схему сканування великої площі мініатюрним сенсором показано на рис. 6.

Застосування мініатюрних ПЗЗ-матриць є цікавим при дослідженнях, направлених на запобігання ефекту екранування напружень в системі імплантат-кістка, від яких залежить успіх операції. У [1, 4] наведено огляд методів запобігання таким напруженням.

АТ технології дозволяють отримувати деталі різноманітної геометричної форми шляхом пошарового нанесення матеріалу на підкладку або елемент виробу виходячи з цифрової моделі. На першому етапі задаються геометричні параметри шару, проводиться його формування. Ширина, висота, профіль є базовими елементами АТ. Усі види АТ (електронно-дугова, лазерна, плазово-дугова) мають особисті переваги та недоліки. Однак всі вони є спільними в необхідності пошарового контролю якості фізичними безконтактними методами. Найперспективнішим для цих цілей є рентгенотелеві-



Рис. 5. Стоматологічний міні-сенсор

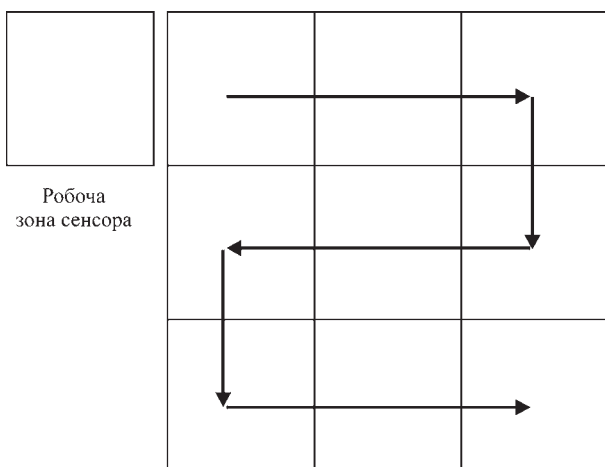


Рис. 6. Схема сканування контрольованого об'єкта за допомогою міні сенсора

зійний контроль (РТК) на основі міні-ПЗЗ-сенсорів та лазерних систем стеження високої роздільної здатності. Особливо це важливо при виготовленні індивідуальних імплантатів. Точна відповідність скелетним кісткам пацієнта знижує ефект екранних напружень в системі імплантат-кістка.

На рис. 7 [4] показано розподіл модуля пружності між кісткою та імплантатом. Ефект екранування напружень уповільнює процеси відновлення форми та загоєння кістки, яке знижує щільність кісткової тканини зі збільшенням її пористості, що може спровокувати відмову функціонування імплантату, а саме нестабільність фіксації імплантату в кістці через її структурні зміни. Нестабільність ендопротезу призводить до збільшення дефектності кістки. Тому пошук шляхів підвищення терміну експлуатації ендопротезів на сьогодні є актуальною задачею не лише в галузі матеріалознавства, але і в механічній біоінженерії та дефектоскопії.

Однією з основних причин відмови імплантату є його асептичне розхитування через зниження щільності кісткової тканини, що викликано недостатнім навантаженням, яке діє на оточуючу ендопротез кістку, оскільки кісткова тканина утворюється та закріплюється в напрямку ліній дії механічних напружень. У літературі таке явище називають «екрануванням напружень» (stress shielding), виникнення якого зумовлене тим, що при виготовленні імплантатів використовують метали і сплави, модуль пружності яких значно перевищує відповідну характеристику кісткової тканини, що призводить до виникнення дотичних напружень в зоні контакту між кісткою та її заміником.

Найпростішим технологічним рішенням пригнічення ефекту екранування напружень та отри-

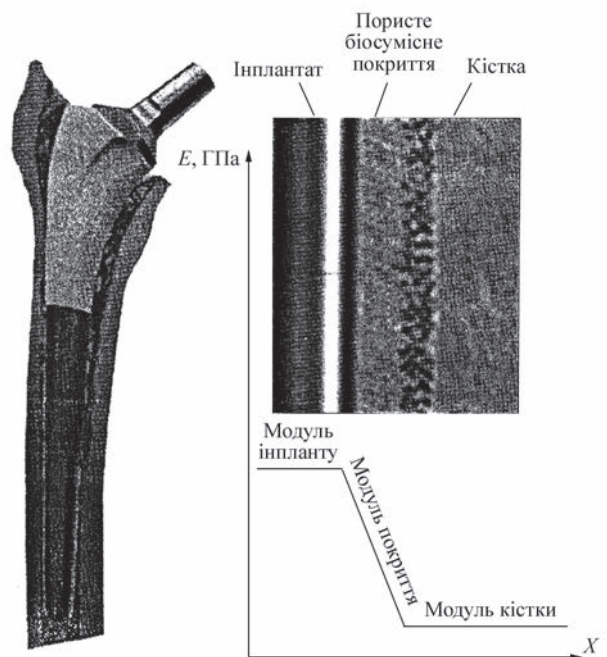


Рис. 7. Розподіл модуля пружності між кісткою та імплантатом

мання позитивних результатів щодо подовження терміну їх експлуатації є надання металічним імплантатам пористої структури, у тому числі з використання пористих покриттів. Крім того відомо, що пористість поверхні імплантату сприяє його остеоінтеграції. Так, дослідження показали покращене прикріплення кістки до імплантату завдяки відтворенню внутрішньої пористості кістки на його поверхні. Фіксація імплантату досягається шляхом з'єднання між кісткою та його пористою матрицею. У результаті проростання кістки в пори імплантату забезпечує не тільки закріплення, а й систему, що дозволяє передавати навантаження від імплантату до кістки.

АТ також використовують для зниження ефекту екранування напружень шляхом отримання структур з градієнтом розміру та форми пор від поверхні до центру деталі. Такі імплантати мають низку унікальних переваг, таких як висока біосумісність, відкрита взаємозв'язана структура пор, яка сприяє росту кісткової тканини, та наближений до кісткового модуль пружності. Найвагомішою перепоною на шляху до масового застосування АТ у виготовленні імплантатів є їх працездатність і матеріаломісткість. При цьому всі етапи виготовлення повинні бути узгоджені як з боку лікарів, так і технологів-дефектоскопістів.

Попит на ортопедичні імплантати зростає невіддільно з інтенсивним розвитком технологій імплантації. Сучасні технології виготовлення ендопротезів дозволяють отримувати як стандартні імплантати, так й індивідуальні, тобто сформовані з урахуванням усіх дефектів кістки конкретного

пацієнта, із забезпеченням пористої або трабекулярної структури поверхні.

Розвиток АТ технології повинен йти паралельно з рентгенотелевізійними технологіями задля максимального обліку індивідуальних особливостей ураження пацієнта. І сьогодні, в ході військової агресії РФ проти незалежної України, наш Інститут разом з дослідними заводами, інженерними центрами та іншими організаціями, що входять до складу НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України», продовжує активну роботу в цьому напрямі.

Список літератури

1. Новодранов А.С., Топчев Д.Д., Мангольд А.М., Шаповалов Є.В., Коляда В.О. (2023) Застосування зварювальних адитивних технологій при виготовленні металевих деталей складної форми (Огляд). *Автоматичне зварювання*, 1, 16–21. DOI:<https://doi.org/10.37434/as2023.01.03>

2. Троїцький В.О. (2022) *Моніторинг стану конструкцій*. Київ, НВП «Інтерсервіс».

3. Троїцький В.О., Карманов М.М., Шалаєв В.О. (2020) *Портативна система рентгенотелевізійного контролю зварних з'єднань*. Патент UA 145831, 06.01.2021.

4. Молжасов А.В., Войнарович С.Г., Димань М.М., Калюжний С.М., Бурбурська С.В. (2023) Методи запобігання ефекту екранування напружень в системі імплантат-кістка (Огляд). *Автоматичне зварювання*, 1, 38–45. DOI:<https://doi.org/10.37434/as2023.01.06>

Увага!

Шукаємо замовників для співпраці

МЕТАЛО- (МІНО-) ШУКАЧ НАПІВАВТОМАТИЧНИЙ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПОЛІВ

В.О. Троїцький, М.В. Лукашев, С.М. Шкарупа, О.О. Ліченко

Через повномасштабне вторгнення російських військ в Україну на сьогодні стає найактуальнішим питання розмінування сільськогосподарських угідь, лісів, доріг та інших територій.

Немає універсальних металошукачів, які однаково добре шукають, наприклад, літаки, що затонули в болотах, та дрібні монети з кольорових металів. Те, що є властивим для одних приладів, призначених для виявлення металевих дрібнот, не потрібно іншим. Для України зараз актуальним є виявлення та знешкодження мін, що залягають на глибині декількох десятків сантиметрів.

Наразі в Україні у сільськогосподарських полях, лісах, шляхах знаходяться багато протитанкових і протитанкових мін, снарядів, що не вибухнули, тощо. Вирішенню цієї проблеми присвячена запропонована конструкція (рис. 1), яка може бути виготовлена багатьма українцями самостійно, оскільки складається із стандартних (покупних) приладів та підручних засобів.

Для пошуку мін поширеними є ручні міношукачі. Вони складаються з однієї або кількох індукційних котушок, штанги, пульта керування та кріплення на руці (рис. 2). Робота всіх металошукачів базується на наступному принципі. Рухома котушка генерує електромагнітні хвилі. Під впливом цих хвиль у металі міни виникають власні вихрові струми, які породжують свої електромагнітні хвилі, спрямовані зустрічно на поле пошукової індукційної котушки. Ці хвилі від предмета в землі і реєструє металошукач.

TR-металошукачі. TR-металошукачі використовують під час роботи дві збалансовані котушки, що знаходяться в одній площині: одна передає, а друга приймає. Сигнал від першої котушки надходить у ґрунт, а друга реєструє сигнал, що повертається. За різницею фаз сигналів робиться висновок про наявність (або відсутність) металу під котушкою. Ці прилади працюють на частотах до 20 кГц.

VLF/TR-металодетектори. VLF – Very Low Frequency (дуже низька частота). VLF-принцип роботи металодетектора є на сьогоднішній день найпоширенішим. Це — різновид TR-металодетектора. У них також є дві котушки, але до них пред'являються жорсткіші вимоги щодо узгодженості. Котушки також розташовані в одній площині, одна передає, інша приймає, за фазовим зсувом робиться висновок про наявність цілі пошуку. Робоча частота — 1...10 кГц.

RF – Radio Frequency (радіо частота). Це металодетектори, що працюють за тим же принципом, що і TR, тільки частота роботи у них вища — 50...500 кГц, а котушки розташовані не в одній площині, як це було в VLF і TR, а перпендикулярно і рознесені на певну відстань. Приклад такого металодетектора — Fisher Gemini-3.

ВФО-металодетектори працюють за принципом биття. Здійснюється порівняння двох частот і робиться висновок про наявність цілі пошуку. Частота даних приладів — 40...500 кГц.

Усі принципи мають свої переваги і недоліки. TR-металодетектори — це висока чутливість, хороше розрізнення металів та балансування по ґрунту. Недолік — при збільшенні глибини втрачається чутливість до дрібних цілей. RF-металодетектори — це вкрай слабка чутливість до дрібних цілей. Цей принцип застосовують у глибинних металодетекторах.

Є й інші фізичні принципи пошуку та різні види механізації процесу пошуку мін, що розташовуються на невеликій глибині. Загальним недоліком всіх ручних міношукачів є нестабільність відстані індуктора від поверхні, що залежить від втоми, уважності та суб'єктивних можливостей оператора, нестабільність та різномірність відстані пошуку, помилки, пов'язані з однаковими тривалими рухами. Перелічені недоліки ручного пошуку можуть призвести до летальних наслідків через можливий пропуск мін.

На відміну від ручного металодетектування в пропонуваному самохідному широкозахватному міношукачі (рис. 1):

- 1) зменшується вплив суб'єктивності оператора;
- 2) знижується вплив стомлюваності, підвищується відсоток виявлення мін;
- 3) вводиться візуальний аналіз поверхні як основа для пошуку, порівняльний аналіз трав'яного покриття. Виявлення слідів свіжого ґрунту – важлива інформаційна складова пошуку;
- 4) автоматично забороняється можливість руху за наявності негативної візуальної чи електромагнітної інформації;
- 5) дається можливість пересувати міношукач як вручну, так і за допомогою двох електродвигунів провідного мотоколеса з фрезою;
- 6) оператор спостерігає за рівномірністю поверхні та допомагає долати перешкоди, забезпечує попередній візуальний пошук, а також покос трави (якщо це необхідно);

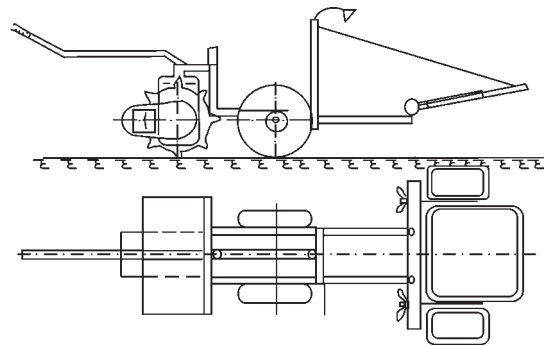


Рис. 1. Конструкція міношукача, що розробляється



Рис. 2. Ручні міношукачі різних країн: 1 – індукційна котушка; 2 – штанга; 3 – пульт; 4 – кріплення на руці

7) відеокамера з освітлювачем на штанзі міношукача покращує аналіз поверхні;

8) дається сигнал тривоги, якщо спостерігаються перешкоди або сліди установки мін;

9) при виявленні індуктором у землі металу візуальним оглядом проводиться уточнення його розмірів за допомогою ручного гострофокусного УЗ-шукача. При необхідності знімається дерн за допомогою фрези мотоколеса, виконується хімічний аналіз випарів поверхні та інші уточнення для прийняття рішень.

На рис. 3, 4 наведено приклади з механізації пошуку мін.

На рис. 3 зображено принципову схему пошуку мін за допомогою переміщення катка, всередині якого знаходяться прилади для виявлення мін. Міношукання за рис. 4 можна назвати напівавтоматичним, так як включає дрон і значний набір фізичних засобів виявлення ознак мін.

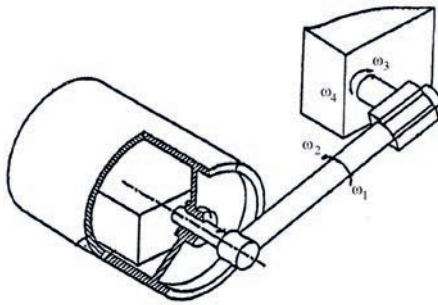


Рис. 3. Механізований пошук мін. Винахід відноситься до пристроїв для виявлення прихованих об'єктів на великих площах, що стосується пристроїв, спеціально призначених для використання при переміщенні, наприклад, людиною або наземним транспортом. Патент RU 2135932 C1, опубл. 27.08.1999, «Пристрій пошуку в ґрунті об'єктів»

Існує досить багато патентів з міношукування на основі броньованих автомобілів та інших засобів. Кожен із прототипів механізації (рис. 3, 4) має свої принципові відмінності від пропонованої нами конструкції та є малоприматним для пошуку металу на великих сільськогосподарських полях.

На рис. 1 зображено повну комплектацію пристрою. Основними елементами його конструкції є: індуктор (радар), відеокамера з освітлювачем, провідне колесо з електроприводом та керуванням. Даний пристрій передбачає роботу на складній місцевості з нерегулярним трав'яним покривом. Порівняльний візуальний аналіз поверхні дає багато корисної інформації про місце роботи мінерів, сліди їхньої роботи та розміри закладки. Колесо із загостреними дисками та електроприводом забезпечує високу прохідність і підтримку налаштованої відстані індуктора від поверхні ґрунту. Провідне колесо знаходиться у задній частині конструкції.

Спрощена комплектація пристрою передбачає роботу металошукача на стабільній поверхні з рівномірним трав'яним покривом. Даним міно-

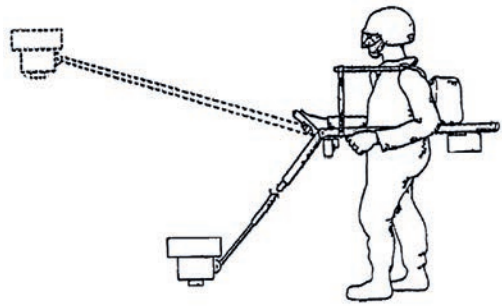


Рис. 4. Напівавтоматичний пошук мін. Винахід відноситься до систем пошуку та виявлення мін, що знаходяться на земній поверхні або під нею, і може бути використаний в переносному варіанті або на рухомій платформі. Патент RU 2485556 C1, Бюл. № 17, 2013 «Система пошуку мін»

шукачем продуктивно може перевірятися смуга завширшки близько 1,5 м. Оператор з пультом управління йде перевіреною смугою, а міношукач рухається самостійно. Оператор знаходиться набагато далі від місця пошуку, ніж у прототипі. На відміну від прототипів, у пропонованому міношукачі сигнали тривоги за схемою порівняльного аналізу поверхні ґрунту можуть надходити як від індуктора, так і від оптоелектронного реєстратора. Задачею пропонованої конструкції є полегшений та безпечний пошук і надійне позначення меж небезпечної зони, яка уточнюється оператором за допомогою гостронаправленого металошукача, наприклад, поширеного пінпоінтера (унікального класу мініатюрних металошукачів у вигляді великого олівця з гострим випромінюванням). За допомогою пінпоінтера можна точно визначити межі будь-якого металевого об'єкту в ґрунті. Встановлені межі залягання міни позначаються червоними прапорцями. Координати небезпечної зони повідомляються службі розмінування (ліквідації) мін.

РОЗ'ЯСНЕННЯ НАЦІОНАЛЬНОГО ОРГАНУ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ЩОДО ПРИЙНЯТТЯ В УКРАЇНІ АМЕРИКАНСЬКИХ СТАНДАРТІВ

Відповідно до Закону України «Про стандартизацію» ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» виконує функції національного органу стандартизації України (далі – НОС). НОС представляє інтереси України в міжнародних та регіональних організаціях стандартизації, приймає рішення про приєднання до них, укладає договори про співробітництво та проведення робіт у сфері стандартизації з національними органами стандартизації інших держав.

Україна є повноправним членом Міжнародної організації зі стандартизації (ISO) та Міжнародної електротехнічної комісії (IEC), а також афілійова-

ним членом Європейського комітету стандартизації (CEN) і Європейського комітету стандартизації в галузі електротехніки (CENELEC).

У рамках міжнародного та регіонального співробітництва НОС укладено ліцензійні угоди з:

- Американським товариством випробування матеріалів (ASTM International);
- Німецьким інститутом стандартів (DIN);
- Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI);
- Міжнародною електротехнічною комісією (IEC).

Також НОС укладено низку меморандумів про взаєморозуміння з національними органами стандартизації інших держав та іншими організаціями

у сфері стандартизації, зокрема з такими американськими організаціями:

- Американським товариством випробування матеріалів (ASTM);
- Американським національним інститутом стандартів (ANSI);
- Американським товариством інженерів-механіків (ASME);
- Американським нафтовим інститутом (API).

В Україні стандарти ASTM приймають тільки методом перекладу, у той час як стандарти ISO, IEC та EN можна приймати методом перекладу або методом підтвердження. Що стосується стандартів інших американських організацій, то оскільки наразі між НОС і ASME, ANSI та API ще не підписані Ліцензійні угоди на розповсюдження та прийняття нормативних документів, НОС не може приймати такі стандарти як національні.

У той же час членство в багатьох організаціях, зокрема таких як ASME та API, відкрито для підприємств та організацій, які працюють у відповідних сферах. У разі набуття членства підприємства зможуть приймати стандарти ASME та API як стандарти підприємства, установи чи організації та використовувати їх у своїй роботі.

Статтею 6 Закону України «Про стандартизацію» встановлено, що залежно від рівня суб'єкта стандартизації, що приймає нормативні документи, вони поділяються на:

- національні стандарти та кодекси усталеної практики, прийняті національним органом стандартизації;
- стандарти, кодекси усталеної практики та технічні умови, прийняті підприємствами, установами та організаціями, що здійснюють стандартизацію.

Відповідно до статті 16 Закону України «Про стандартизацію» підприємства, установи та організації мають право у відповідних сферах діяльності та з урахуванням своїх господарських і професійних потреб організувати та виконувати роботи із стандартизації, зокрема:

- розробляти, приймати, перевіряти, переглядати та скасовувати стандарти, кодекси усталеної практики, технічні умови і зміни до них, установлювати процедури їх розроблення, прийняття, перевірки, перегляду, скасування та застосування;

- застосовувати прийняті ними стандарти, кодекси усталеної практики та технічні умови;

- брати участь у роботі спеціалізованих міжнародних та регіональних організацій стандартизації відповідно до положень про такі організації.

Разом із тим, основним напрямом зовнішньоекономічної політики України є поступова та невідворотна інтеграція до Європейського Союзу. У лютому 2022 р. Україна подала заявку на членство у Європейському Союзі та у червні 2022 р. отримала статус держави-кандидата у члени ЄС. Такими подіями, як і законодавчими актами, прийнятими до цього, визначено євроінтеграційну державну політику України, що покладає на всі органи державної влади, органи місцевого самоврядування та державні установи, організації та підприємства обов'язок реалізовувати зазначену державну політику та максимально сприяти будь-яким діям, спрямованим на досягнення цих цілей.

Спільними зусиллями НОС та Департаменту технічного регулювання Мінекономіки у 2022 р. досягнуто домовленості з європейськими організаціями зі стандартизації щодо отримання Україною статусу афілійованого члена в CEN/CENELEC з перспективою набуття повноправного членства в цих організаціях. Як результат, з 1 січня 2023 р. Україна отримала статус афілійованого члена CEN/CENELEC.

Зважаючи на зазначене та отримання Україною статусу держави-кандидата у члени ЄС, пріоритетним напрямом української стандартизації є прийняття європейських та міжнародних нормативних документів як національних.

Разом із тим, враховуючи реалії сьогодення для української стандартизації, необхідно враховувати велику ймовірність реалізації в Україні спільних проєктів з американськими партнерами та прийняття й застосування американських стандартів в Україні. НОС опрацював ці питання з європейськими партнерами та відповідними фахівцями ISO.

За необхідності впровадження американських стандартів у широкому колі зацікавлених сторін, що підтверджено економічними обґрунтуваннями і положення яких не суперечать положенням чинних національних стандартів, прийнятих на основі європейських та міжнародних, НОС спільно з технічними комітетами опрацює це питання в установленому Законом порядку та забезпечить їх прийняття.

ПРО ВІДМІНУ ДЕЯКИХ СТАНДАРТІВ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

За ініціативи Технічного комітету стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» наказом №122 від 07.07.2022 р. Національного органу стандартизації в Україні з 1 січня 2023 р. було скасовано чинність ряду стандартів

з неруйнівного контролю, паралельно з якими в Україні вже діють або нові редакції цих стандартів, або нові гармонізовані з європейськими і міжнародними стандарти, що були прийняті на заміну. Нижче публікується список цих стандартів.

№	Стандарт, що скасовано	Стандарт на заміну
1	ДСТУ EN 462-3:2005 НК. Якість зображення радіографічних знімків. Частина 3. Класи якості зображення для чорних металів	ДСТУ EN ISO 19232-3:2015 НК. Якість зображення на рентгеновських знімках. Частина 3. Класи якості зображення
2	ДСТУ EN 571-1-2001 НК. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні вимоги	ДСТУ EN ISO 3452-1:2014 НК. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи
3	ДСТУ EN 583-4:2007 НК. Ультразвуковий контроль. Частина 4. Контролювання несущільностей, перпендикулярних до поверхні	ДСТУ EN ISO 16826:2015 НК. Ультразвуковий контроль. Виявлення несущільностей перпендикулярних до поверхні
4	ДСТУ ENV 583-6:2005 НК. Контроль ультразвуковий. Частина 6. Дифракційно-часовий метод для виявлення і визначення розмірів несущільностей	ДСТУ EN ISO 16828:2015 НК. Ультразвуковий контроль. Дифракційно-часовий метод для виявлення та визначення розмірів несущільностей
5	ДСТУ EN 1330-8:2016 НК. Термінологія. Частина 8. Терміни, які використовують у контролі герметичності	ДСТУ EN ISO 20484:2018 НК. Контроль герметичності. Словник термінів
6	ДСТУ EN 10246-1:2006 НК. Частина 1. Автоматизований електромагнітний контроль герметичності безшовних та зварних (крім зварених під флюсом) феромагнітних сталевих труб	ДСТУ EN ISO 10893-1:2015 НК сталевих труб. Частина 1. Автоматизований електромагнітний контроль сталевих безшовних і зварних труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для верифікації герметичності
7	ДСТУ EN 10246-3:2006 НК. Частина 3. Автоматизований вихрострумний контроль безшовних та зварних (крім зварених під флюсом) сталевих труб для виявлення дефектів	ДСТУ EN ISO 10893-2:2015 НК сталевих труб. Частина 2. Автоматизований вихрострумний контроль сталевих безшовних і зварних труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для виявлення дефектів
8	ДСТУ EN 10246-6:2006 НК. Частина 6. Автоматизований ультразвуковий контроль безшовних сталевих труб для виявлення поперечних дефектів	ДСТУ EN ISO 10893-10:2015 НК сталевих труб. Частина 10. Автоматизований ультразвуковий контроль по всій окружності безшовних і зварних сталевих труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів
9	ДСТУ EN 10246-7:2006 НК. Частина 7. Автоматизований ультразвуковий контроль безшовних та зварних (крім зварених під флюсом) феромагнітних сталевих труб для виявлення поздовжніх дефектів	ДСТУ EN ISO 10893-10:2015 НК сталевих труб. Частина 10. Автоматизований ультразвуковий контроль по всій окружності безшовних і зварних сталевих труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів
10	ДСТУ EN 10246-14:2006 НК. Частина 14. Автоматизований ультразвуковий контроль безшовних та зварних (крім зварених під флюсом) сталевих труб для виявлення місць розшарування	ДСТУ EN ISO 10893-8:2015 НК сталевих труб. Частина 8. Автоматизований ультразвуковий контроль сталевих безшовних і зварних труб для виявлення дефектів розшарування
11	ДСТУ ISO 10375:2015 Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик перетворювача й акустичного поля	скасовано без заміни
12	ДСТУ EN 12517-2002 НК зварних з'єднань. Контроль зварних з'єднань радіографічний. Приймальні критерії	ДСТУ EN ISO 10675-1:2017 НК зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 1. Сталь, нікель, титан та їх сплави
13	ДСТУ EN 12679:2016 НК. Визначення розміру промислових радіографічних джерел. Радіографічний метод	ДСТУ EN 12679:2019 НК. Визначення розміру промислових радіографічних джерел випромінювання. Радіографічний метод
14	ДСТУ ISO 12710:2017 Ультразвуковий контроль. Оцінка електронних характеристик ультразвукових дефектоскопів	скасовано без заміни
15	ДСТУ EN 13860-1:2007 НК. Вихрострумний контроль. Частина 1. Характеристики приладів і їх перевіряння	ДСТУ EN ISO 15548-1:2017 НК. Обладнання для вихрострумного контролю. Частина 1. Визначення характеристик і верифікація приладів
16	ДСТУ EN 13860-2:2008 НК. Контроль вихрострумний. Частина 2. Характеристики перетворювачів і їх перевіряння	ДСТУ EN ISO 15548-2:2017 НК. Обладнання для вихрострумного контролю. Частина 2. Визначення характеристик і верифікація перетворювачів
17	ДСТУ EN 16016-2:2015 НК. Радіаційні методи. Комп'ютерна томографія. Частина 2. Принципи, обладнання і зразки	ДСТУ EN ISO 15708-2:2019 НК. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 2. Принципи, обладнання та зразки
18	ДСТУ EN 16016-3:2015 НК. Радіаційні методи. Комп'ютерна томографія. Частина 3. Процес обробки й інтерпретація	ДСТУ EN ISO 15708-3:2019 НК. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 3. Порядок роботи та інтерпретація результатів

19	ДСТУ EN 16016-4:2015 НК. Радіаційні методи. Комп'ютерна томографія. Частина 4. Кваліфікація	ДСТУ EN ISO 15708-4:2019 НК. Радіаційні методи комп'ютерної томографії. Частина 4. Кваліфікація роботи системи
20	ДСТУ EN 16392-2:2015 НК. Характеристика і верифікація ультразвукового обладнання з фазованими антенними решітками. Частина 2. Перетворювачі	ДСТУ EN ISO 18563-2:2019 НК. Визначення характеристик і верифікація обладнання на ультразвукових фазованих решітках. Частина 2. Датчики

Інформацію для рубрики
«Новини стандартизації»
підготував Андрій ШЕКЕРО

СЕРТИФІКАЦІЯ ПЕРСОНАЛУ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ В УТ НКТД

У 2002 р. при Українському товаристві неруйнівного контролю та технічної діагностики було створено орган із сертифікації персоналу (ЦС при УТ НКТД), що здійснює сертифікацію спеціалістів, які працюють у галузі неруйнівного контролю на 1, 2 і 3 рівні кваліфікації у відповідності до вимог національного ДСТУ EN ISO 9712 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю», міжнародного ISO 9712 (європейського EN ISO 9712) «Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel», американського SNT-TC-1A «Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing» стандартів, а також НПАОП 0.00-1.63-13 «Правила сертифікації фахівців з неруйнівного контролю».

ЦС при УТ НКТД акредитовано Національним агентством з акредитації України (НААУ) як позавідомчий незалежний орган із сертифікації персоналу в галузі неруйнівного контролю на відповідність вимогам Міжнародного стандарту ISO/IEC 17024:2012 «Оцінка відповідності – Загальні вимоги до органів, що здійснюють сертифікацію персоналу». Схема і процедури сертифікації визначені у відповідності до вимог EN ISO 9712:2012 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю».

Відповідно до затвердженої НААУ сфери діяльності ЦС при УТ НКТД здійснює сертифікацію за такими методами:

- ультразвуковий (UT)
- радіографічний (RT)
- магнітний (MT)
- капілярний (PT)
- візуальний (VT)
- контроль герметичності (LT)
- вихрострумний (ET)
- акустико-емісійний (AT)
- інфрачервона термографія (TT)
- вібродіагностичний (VA)

у 12 виробничих секторах (в дужках наведено міжнародне позначення типу продукції):

Сектори за типом продукції:

1 — литво (c) – феритні та неферитні матеріали

2 — поковки (f) – феритні та неферитні матеріали

3 — зварні вироби (w) – всі типи зварних з'єднань, включаючи паяні, для феритних і неферитних матеріалів

4 — труби та трубопроводи, включаючи листовий прокат для виготовлення зварних труб (t) – безшовні, зварні, з феритних і неферитних матеріалів, включаючи листовий прокат для виготовлення зварних труб

5 — прокат (wp) – листовий, профільний

Промислові сектори:

6 — виробництво та оброблення металів (поєднання c, f, w, t та wp)

7 — контроль перед введенням та в процесі експлуатації, включаючи виробництво та оброблення металів (поєднання c, f, w, t та wp)

8 — залізничний транспорт та обладнання для нього (поєднання c, f, w, t та wp)

9 — авіакосмічна продукція (поєднання c, f, w, t та wp)

10 — продукція суднобудування (поєднання c, f, w, t та wp)

11 — обладнання для атомної енергетики (поєднання c, f, w, t та wp)

12 — бурове обладнання (поєднання c, f, w, t та wp)

У системі сертифікації персоналу УТ НКТД працюють учбові центри: УЦ «АЦНК при ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» (м. Київ), УЦНК Придніпровського АЦНК і ТД (м. Дніпро), УЦ АЦНК УкрГМК НВП «Дніпрочорметавтоматика» (м. Дніпро), УЦ ТОВ «Діамех-Україна» (м. Харків) та екзаменаційні центри: ЕЦ «АЦНК при ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», ЕЦ «Придніпровський АЦНК і ТД», ЕЦ АЦНК УкрГМК НВП «Дніпрочорметавтоматика», ЕЦ ТОВ «Діамех-Україна» (м. Харків).

Сертифікати, які видано Центром сертифікації при УТ НКТД, визнаються як в Україні, так і за її межами. За минулі роки у визначених ЦС при УТ НКТД учбових і екзаменаційних центрах отримали професійні знання і були атестовані багато спеціалістів з інших країн (на фото):



Польщі...



Словенії ...



Німеччини...



Грузії...



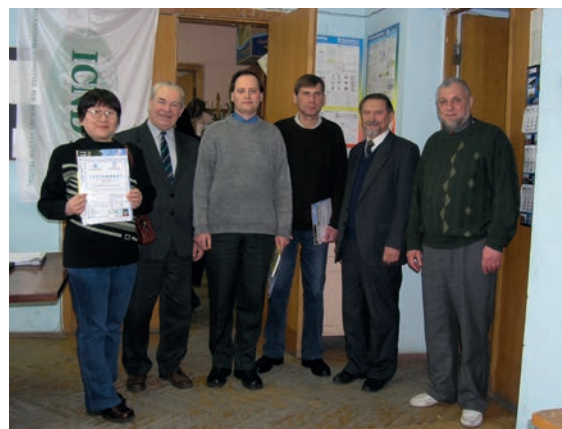
Іраку...



Молдови...



Таджикистану...



Казахстану...

а також Арменії, Узбекистану, Естонії, Литви, Латвії. Учбова база Центру сертифікації при УТ НКТД постійно розширюється і оновлюється. Удосконалюються програми навчання, методики викладання і проведення екзаменів, поповнюється парк учбових і екзаменаційних зразків, впроваджуються комп'ютерні технології.

Викладацький і методичний склад Центру сертифікації складається з висококваліфікованих спеціалістів 3-го рівня з провідних підприємств і організацій України, кандидатів технічних наук, які мають великий практичний досвід у галузі неруйнівного контролю.

Центр сертифікації при УТ НКТД
+38 (044) 205-22-15, +38 (044) 205-22-49
ndt@paton.kiev.ua, usndt@ukr.net

13-а ЄВРОПЕЙСЬКА КОНФЕРЕНЦІЯ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ – ECNDT 2023

3–7 липня 2023 р., Лісабон, Португалія

Європейська конференція з неруйнівного контролю (ECNDT) вважається головною міжнародною подією для EFNDT та її товариств-членів. Подія демонструє важливість цього сектору, представляючи момент, коли спільнота НК (академії, інспекційні компанії, акредитовані лабораторії, промисловість та постачальники обладнання) демонструє різноманітність своєї діяльності та компетентність для забезпечення безпеки. Це також можливість налагодити контакти та познайомитися з сучасним науково-дослідницьким процесом та обладнанням європейського та світового співтовариства НК.

Конференція ECNDT 2023 ретельно спланована, щоб охопити широкий спектр тем, з особливим акцентом на технічних і наукових аспектах. Програма містить найновіші досягнення в галузі досліджень і розробок, а також застосування неруйнівного контролю (NDT) у різних галузях промисловості.

Паралельно проходить виставка, яка тісно пов'язана з конференцією. Виставка демонструє обладнання та інструменти, які використовуються в промисловості, підкреслюючи зв'язок між дослідженнями та розробками та їх практичним застосуванням.

Програма конференції

Monday 03/07	Tuesday 04/07	Wednesday 05/07	Thursday 06/07	Friday 07/07
<p>Opening Ceremony (09:00-12:30)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Additive Manufacturing Composites NDE & NDT of Civil NDT 4.0 Numerical Simulation Ultrasound 	<ul style="list-style-type: none"> Guided Waves Monitoring NDT 4.0 Oil & Gas RESEARCH DAY 	<ul style="list-style-type: none"> Art Energy Guided Waves Materials Characterization NDT 4.0 New & Disruptive Methods Robotics Ultrasound Ph. Arrays 	<ul style="list-style-type: none"> EFNDT/ICNDT Certification WK (ISO 9712) Materials Characterization NDT Reliability and Statistic Ultrasound Ph. Arrays
Lunch				
<ul style="list-style-type: none"> Additive Manufacturing Composites NDE & NDT of Civil Surface Methods Ultrasound 	<ul style="list-style-type: none"> Composites Guided Waves Microwave NDE & NDT of Civil NDT 4.0 Numerical Simulation Transportation Ultrasound 	<ul style="list-style-type: none"> Energy Guided Waves Monitoring NDT 4.0 Oil & Gas RESEARCH DAY 	<ul style="list-style-type: none"> Materials Characterization New & Disruptive Methods Qualification & Certification Robotics Ultrasound Ph. Arrays 	
<p>Poster Evening & Welcome Reception</p>		<p>Gala Dinner</p>		<p>Closing Ceremony</p>

КАЛЕНДАР МІЖНАРОДНИХ КОНФЕРЕНЦІЙ З НК

3–7 липня 2023	Португалія Лісабон	13 th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2023)	Portugues Society of NDT FSEND-RECLARE http://www.ecndt2023.org/
14–17 серпня 2023	Швейцарія, Дюбендорф, Цюрих	17 th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (ISNDCM)	American Society for Nondestructive Testing http://asnt.eventsair.com/isndcm23/
24–26 серпня 2023	Індія, Пуна, Махараштра	International Conference and Exhibition on Nondestructive Evaluation (ICENDE-2023)	http://www.icende.in/

26–28 вересня 2023	США, Принстон, Нью-Джерсі	64 th Acoustic Emission Working Group Meeting (AEWG 2023)	Acoustic Emission Working Group (AEWG) http://aewg.org/
9–13 жовтня 2023	Велика Британія, Лондон	Image-Based Simulation for Industry (IBSim-4i 2023)	http://ibsim.co.uk/events/ibsim-4i/
23–26 жовтня 2023	США, Х'юстон, Техас	ASNT 2023: The Annual Conference	American Society for Nondestructive Testing http://asnt.org/MajorSiteSections/Events
23–26 жовтня 2023	Франція, Нант	Diagnobéton 2023	http://diagnobeton2023.sciencesconf.org/
28–30 листопада 2023	Італія, Брешія	ART23	AIPnD - Associazione Italiana Prove non Distruttive http://www.aipnd.it/art23
6–9 лютого 2024	Австрія, Вельс	13 th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2022	Research group Computed Tomography http://www.fh-ooe.at/ict2024/
23–26 квітня 2024	Німеччина, Штутгарт	36 th Control–Trade Fair for Quality Assurance	http://www.control-messe.de/
27–31 травня 2024	Південна Корея, Інчхон	20 th World Conference on Non-Destructive Testing (20 th WCNDT)	The Korean Society for Nondestructive Testing http://20thwcndt.com/
10–13 червня 2024	Німеччина, Потсдам	11 th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024)	German Society for Non-Destructive Testing (DGZfP) http://www.control-messe.de/
1–5 липня 2024	Хорватія, Загреб	QIRT 2024–17 th Quantitative InfraRed Thermography Conference QIRT	http://www.energetika-marketing.hr/qirt-2024/en/homepage/

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

ПРОВОДИТЬ

підготовку, атестацію та сертифікацію фахівців з різних методів неруйнівного контролю

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

Центр здійснює підготовку, атестацію та сертифікацію спеціалістів, що працюють в галузі неруйнівного контролю на 1-й, 2-й і 3-й 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.

Підготовка проводиться в 12 виробничих секторах за типом продукції (в дужках міжнародне позначення типу продукції): литво (c), поковки (f), зварні вироби (w), труби та трубопроводи, прокат (wp).

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.

