

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

А.Я. Недосека (заст. гол. ред.),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, С.А. Недосека,

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар)

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
м. Київ

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,
Варшава, Польща

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія

М.Л. Казакевич

Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського
НАН України, м. Київ

О.М. Карпаш

Івано-Франківський нац. техн. університет нафти і газу

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

В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН
України, м. Львів

А.Г. Протасов, С.К. Фомічов

НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з
технічної фізики, Ясси, Румунія

В.О. Стороженко

Харківський національний університет радіоелектроніки

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка
НАН України, м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і
природокористування України, 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) 200-82-77

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
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2021

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія: 960 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 960 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

Інтерв'ю з генеральним директором
Асоціації «ОКО» Т.М. Луценко 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

**КУЦ Ю.В., УЧАНІН В.М., ЛИСЕНКО Ю.Ю.,
ЛЕВЧЕНКО О.Е.** Застосування перетворення Гільберта
для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового
контролю. Частина 1. Теоретичні аспекти використання
перетворення Гільберта у вихрострумовому контролі 7

**МІЛЕНІН О.С., ВЕЛИКОІВАНЕНКО О.А., РОЗИНКА Г.П.,
ПІВТОРАК Н.І.** Мультимасштабна методика чисельної
оцінки пошкодженості та технічного стану конструкцій з
волокнистих композиційних матеріалів 14

**BRAUNS M., LUCKING F., FISCHER B., THOMSON C.,
IVAKHENKO I.** Акустика з лазерним збуджуванням для
безконтактного контролю аерокосмічних композитів 19

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

**ЖУРАВЛІОВ С.В., ОБОДОВСЬКИЙ Б.М., ЯРЕМЕНКО М.А.,
НЕДОСЕКА А.Я., НЕДОСЕКА С.А., ОВСІЄНКО М.А.**
Впровадження технології АЕ моніторингу на ОПЗ 26

**КАРМАНОВ М.М., МИХАЙЛОВ С.Р., ПАСТОВЕН-
СЬКИЙ Р.О., ГЛУХІВСЬКИЙ В.Ю., БУЙНОВА Є.О.**
Рентгеноелектронний контроль якості зварювання поліети-
ленових труб 33

**БОНДАРЕНКО Ю.К., ПОТАП'ЄВСЬКИЙ А.Г., АРТЮХ К.О.,
ЛОГІНОВА Ю.В.** Управління якістю зварних конструкцій
на основі системи обстеження та технологічного регулю-
вання їх виробництва у відповідності до вимог стандарту
ДСТУ ISO 9001:2015 37

БОНДАРЕНКО Ю.К., КОВАЛЬЧУК О.В. Сучасні законо-
давчі та нормативні вимоги до зварювальної продукції 44

ІНФОРМАЦІЯ

II Науково-практична конференція «Неруйнівний
контроль та моніторинг технічного стану» 49

VII Міжнародна конференція HighMatTech-2021 54

3D-друк космічних ракет 55

Інноваційні пропозиції для НК 56

Дати, події, факти з історії технічного контролю 57

Видання журналу підтримують:

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

EDITORIAL BOARD

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

A.Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),

V.O. Troitskiy (Deputy Editor-in-Chief),

Ie.O. Davydov, S.A. Nedoseka,

Yu.M. Posypaiko,

I.Yu. Romanova (execut. secretary)

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

K. Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland

J. Grum

University of Ljubljana, Slovenia

M.L. Kazakevich

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry
of NAS of Ukraine, Kyiv

O.M. Karpash

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk, V.R. Skalskiy, V.M. Uchanin
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS
of Ukraine, Lviv

A.G. Protasov, S.K. Fomichov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute»

A. Savin

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

V.O. Storozhenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

V.O. Stryzhalo

G.S. Pisarenko Institute for Problems
of Strength of NAS of Ukraine, Kyiv

M.G. Chausov

National University of Life and Environmental Sciences
of Ukraine, Kyiv

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) 200-82-77

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 2021

Subscription index 74475.

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

\$72, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$60, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

The editorial board is not responsible
for the content of the promotional material.

CONTENT

Interview with T.M. Lutsenko, General Director
of Association «OKO» 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

**KUTS Yu.V., UCHANIN V.M., LYSENKO Yu.Yu.,
LEVCHENKO O.E.** Application of Hilbert transform for
analysis of signals of automated eddy current inspection.
Part 1. Theoretical aspects of Hilbert transformation
application at eddy current inspection..... 7

**MILENIN O.S., VELIKOIVANENKO O.A., ROSYNKA G.P.,
PIVTORAK N.I.** Multiscale procedure of numerical
assessment of damage rate and technical state of structures
from fibrous materials 14

**BRAUNS M., LUCKING F., FISCHER B., THOMSON C.,
IVAKHENKO I.** Laser-Excited Acoustics for Contact-Free
Inspection of Aerospace Composites..... 19

INDUSTRIAL

**ZHURAVLYOV S.V., OBODOVSKIY B.M., YAREMENKO M.A.,
NEDOSEKA A. Ya., S.A. NEDOSEKA, OVSIENKO M.A.**
Introduction of the technology of AE monitoring at OPP 26

**KARMANOV M.M., MIKHAILOV S.R., PASTOVENKSYI R.O.,
GLUKHIVSKIY V.Yu., BUJNOVA E.O.** X-ray TV inspection of
the quality of welding polyethylene pipes..... 33

**BONDARENKO Yu.K., POTAPYEVSKIY A.G.,
ARTYUKH K.O., LOGINOVA Yu.V.** Quality control of
welded structures based on a system of inspection and
technological regulation of their fabrication, in keeping with
the requirements to DSTU ISO 9001:2015 37

BONDARENKO Yu.K., KOVALCHUK O.V. Modern legal and
normative requirements to welded products 44

INFORMATION

II Scientific and practical conference «Non-Destructive
Testing And Monitoring Of Technical Condition» 49

VII International conference HighMatTech-2021 54

3D Printing of Space Rockets 55

Innovative offers for NDT 56

Dates, events, facts in the history of technical testing 57

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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



АСОЦІАЦІЯ «ОКО» – ЛІДЕР ВІТЧИЗНЯНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

Інтерв'ю з генеральним директором
Асоціації «ОКО» Т.М. Луценко



В 2021 р. на II конференції «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану» в Одесі Тетяна Михайлівна Луценко в своєму виступі зазначила, що підприємства Асоціації «ОКО» поставили продукцію власного виробництва в 69 країн світу.

Цей факт зацікавив багатьох фахівців. Не залишився він по за увагою редакції журналу, яка запропонувала Тетяні Михайлівні відповісти на ряд запитань про роботу колективів Асоціації «ОКО», розкрити особливості роботи «на експорт», підказати українським виробникам шляхи нарощування виробництва та виходу на міжнародні ринки.

Асоціація «ОКО» – відома та авторитетна компанія серед українських і світових споживачів обладнання неруйнівного контролю. Як з'явилась ідея створення Асоціації?

В далекому 1993 р. з'явилась думка про створення Асоціації «ОКО», метою якої була популяризація неруйнівного контролю в Україні та країнах СНГ. Її діяльність почалась з випуску журналу «Неразрушающий контроль», а згодом вона стала організатором проведення міжнародних виставок та конференцій. Та тільки в 2000-ні роки Асоціація «ОКО» юридично об'єднала три

київські компанії Ультракон-Сервіс, Промприлад та УкрНДІНК.

Ви пам'ятаєте перший випуск журналу з неруйнівного контролю? Як вплинув журнал на розуміння важливості неруйнівного контролю?

Звісно, ми пам'ятаємо перший випуск. Журнал видавався з 1999 р. у вигляді інформаційно-рекламного бюлетеню та мав назву «Неразрушающий контроль». В ньому були надруковані наші перші проекти та статті про розробки твердомірів і товщиномірів. Журнал розповсюджувався безкоштовно. Ми отримували питання та відгуки за нашими розробками та таким чином мали великий зворотній зв'язок зі своєю аудиторією.

Спеціалісти з неруйнівного контролю отримували з журналу, який видавався 4 рази на рік, актуальну інформацію про нові вітчизняні прилади для НК.

Коли проводились перші виставки та якими вони були?

У квітучому травні 1992 р. започаткували проведення традиційних виставок з НК. Перші виставки проводились в Київському політехнічному інституті, далі в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка, а потім довгий час традиційно в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона. З часом конференції та виставки почали проводити у виставковому центрі Асоціації «ОКО».



Перший випуск журналу «Неразрушающий контроль»



Конференція «НК-2018» в залі Асоціації «ОКО»



Луценко Т.М. та Луценко Г.Г.



Перший вітчизняний ультразвуковий дефектоскоп УД2-70

Розкажіть, будь ласка, про підприємства, які входять до складу Асоціації «ОКО».

НВФ «Ультракон-Сервіс» є першою компанією в Україні, яка започаткувала розробку та виробництво обладнання НК. Підприємство ви-

бляє портативні прилади та автоматизовані системи НК, такі, як:

- ультразвукові дефектоскопи УДЗ-71 і УД4-76;
 - товщиноміри ТУЗ-1, ТУЗ-2, ТУЗ-5, УТГ-8;
 - твердоміри TDM-1 і TDM-2;
 - установки автоматизованого контролю УМПК-39, УМПК-Ось-38, УМПК-2, САУЗК Уніскан-Луч ОСЬ-4;
 - рейкові візки УДС2-77, УДС2-73, ЕТС-77;
- та інші розробки, деякі з яких не мають аналогів у світі.

Добре розуміючи, що обладнання є лише інструментом в руках людини, керівництво компанії доклало значних зусиль для того, щоби використання цього інструменту стало максимально ефективним. Будь-яка помилка в такій відповідальній справі може призвести до трагедії. Тому, розуміючи всю міру відповідальності як за результати використання свого власного обладнання, так і за проведення неруйнівного контролю в цілому, ще в період свого становлення підприємство прийняло рішення про створення власного Учебного центру з підготовки спеціалістів з НК. Згідно з ліцензією Міністерства освіти і науки України з 2001 р. на базі НВФ «Ультракон-Сервіс» функціонує Учебний центр, який навчає спеціалістів НК за наступними методами НК:

- ультразвуковий;
- вихрострумовий;
- акустико-емісійний;
- магнітопорошковий;
- візуальний.

НВФ «Промприлад» є виробником ультразвукових і вихрострумових дефектоскопів, як ручних, так і механізованих. Це, наприклад:

- вихрострумові дефектоскопи ВДЗ-71 НК-ІVУ, ВД-131 НД, ВД-132-К-ШУ-ОКО-01 і ВД 3-81, Eddycon C, Eddycon CL;
- ультразвукові дефектоскопи SONOCON B, SONOCON BL.

При НВФ «Промприлад» була створена база з ремонту та сервісному обслуговуванню засобів



Лабораторні випробування іммерсійним способом



Конструкторський відділ за роботою над новим проектом НК, виготовлених підприємствами Асоціації «ОКО».

ПрАТ «УкрНДІНК» (Український науково-дослідний інститут неруйнівного контролю) займається розробкою технологій за засобів неруйнівного контролю, з їх інтеграцією в технологічні процеси виробництва. Інститут було створено в 2004 р. За цей час він перетворився в центр наукових досліджень, об'єднання колективу вчених і спеціалістів, який працює над розробкою та вдосконаленням методів і технологій засобів НК. Ме-



Система автоматизованого швидкісного контролю рейок OKOSCAN 73 HS



Установка автоматизованого контролю авіаційних коліс SmartScan



Лас-Вегас, США, участь в національній конференції і виставці НК ханізовані та автоматизовані системи, які розробляє УкрНДІНК, застосовуються в різних галузях (машинобудування, авіація, трубна та нафтогазова промисловості, енергетика, металургія) та дозволяють контролювати залізничні рейки, колісні пари, вісі, авіаційні колеса, труби, зварні шви тощо. Контроль проводиться як при виготовленні, так і в процесі експлуатації. Наприклад:

- високошвидкісна система контролю рейок OKOSCAN HS 73;
- установка контролю авіаційних колес Smartscan FA;
- комплекс дефектоскопічний акустико-емісійний ГАЛС-1;
- система вібродіагностики Ревізор-КП.

Також на базі ПрАТ «УкрНДІНК» діє «Орган із сертифікації персоналу в сфері неруйнівного контролю технічних об'єктів», акредитований Національним агентством з акредитації України. Орган забезпечує сертифікацію фахівців I, II та III рівнів у відповідності до стандартів ISO/IES 17024:2012, ISO 9712:2012, EN 4179:2009. Сьогодні цей сертифікат є дійсним в 40 країнах світу.



Сінгапур, участь в Азіатсько-Тихоокеанській виставці

Коли Ви зрозуміли, що Асоціація «ОКО» буде перспективною?

Плани з розвитку діяльності були великі, але ми не думали, що вони настільки здійсняться. На той момент НВФ «Ультракон-Сервіс» вже була флагманом НК в Україні, НВФ «Промприлад» під керівництвом Г.Г. Луценка зайняла міцну позицію у виробництві, ПрАТ «УкрНДІНК» успішно просувалось в розробках засобів НК. Настав час, коли їм стало складно займатися менеджментом і маркетингом, в тому числі і на міжнародному рівні. Ці функції взяла на себе Асоціація «ОКО», що позитивно вплинуло на вирішення великої кількості нагальних завдань.

Чим Ваша компанія відрізняється від інших компаній-виробників приладів НК в Україні? Якими є відмінні риси та переваги Вашої компанії?

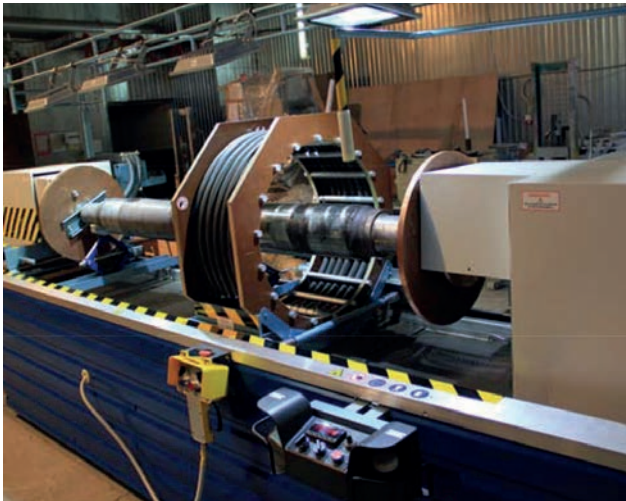
Наша компанія проектує та виробляє ручні, механізовані та автоматизовані засоби з основних методів НК з урахуванням особливостей та специфіки їх застосування, сертифікує та атестує спеціалістів, бере участь у всіх всесвітніх, європейських і регіональних конференціях та виставках, в тому числі Всесвітнього (ICNDT) та Європейського Товариств неруйнівного контролю (EFNDT), Американського Товариства неруйнівного контролю (ASNT), Азіатсько-Тихоокеанського Товариства (APCNDT) та інших. Наша стратегія спрямована на подальший розвиток і рішення проблем неруйнівного контролю. Саме тому нашим гаслом став вираз: «Технологія НК під ключ».

Скільки країн вже стали замовниками Вашого обладнання?

На момент нашого інтерв'ю Асоціація «ОКО» є торговою маркою, прилади та системи якої відомі в 69 країнах світу, таких, як Сінгапур, США, Великобританія, Німеччина, Південна Корея, Японія, Китай, Італія, Туреччина, країни СНГ, Балтії та інші.



Вересень 2021 р., Одеса, конференція з НК



Установка мокрого магнітопорошкового контролю залізничних осей УМПК-Ось-38

Яке обладнання частіше за все цікавить споживачів з далекого зарубіжжя? Як Ви справляєтесь з конкуренцією на ринку дефектоскопічного обладнання?

Закордонний споживач «розпечений» різноманіттям приладів і систем НК в усіх галузях. Тому на сьогоднішній день потрібні нові підходи та рішення, які реалізовано в сучасних розробках приладів НК. Важливу роль грає, звісно, співвідношення ціна-якість. У більшості випадків споживачів цікавлять засоби контролю, що застосовуються в авіаційній галузі, на залізничному транспорті та ін. Іншими словами, на ринку багато продукції брендових виробників. Останні 10 років ми працюємо над підвищенням рівня технічних розробок та якістю приладів.

Яка стратегія розвитку компаній Асоціації «ОКО»?

На сьогоднішній день нашим досягненням є 56 пристроїв неруйнівного контролю – від портативних дефектоскопів і товщиномірів до автоматизованих систем контролю. Розроблено та впроваджено у виробництво коло 4000 різних типів перетворювачів, більшість з них – вузькоспеціалізовані рішення. Нажаль, ми спостерігаємо значний спад промислового виробництва в Україні



Установка автоматизованого ультразвукового і вихрострумового контролю прокатних валків РНК В-35 (L)

та, відповідно, необхідності застосування засобів НК. Ми сподіваємось на підйом, розвиток наших промислових підприємств і галузей, які ми зможемо забезпечити нашими приладами. Враховуючи потенціал наших вчених, інженерів, технічних спеціалістів, ми маємо великі сподівання на те, що наша країна буде розвиватись як індустріальна. А ми, в свою чергу, будемо і далі забезпечувати нашого вітчизняного виробника якісною продукцією в тісному контакті з ними.

У Вас дуже велика кількість розробок і продукції. Як Вам вдалось за ці роки зробити стільки пристроїв та реалізувати їх на виробництві?

Це все завдяки нашому колективу, дякуючи професіоналізму та згуртованості розробників, технологів, конструкторів, програмістів, менеджерів і робітників виробництва та допоміжних відділів. На сьогоднішній день фірма налічує 130 співробітників.

Редакція журналу дякує Т.М. Луценку за цікаве та змістовне інтерв'ю, яке безумовно буде корисним для спеціалістів з НК та для всіх читачів нашого журналу.

Розмову провели

Олександр Зельніченко та Юрій Посипайко



Колектив Асоціації «ОКО»

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛЬБЕРТА ДЛЯ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумівому контролі

Ю.В. Куц¹, В.М. Учанін², Ю.Ю. Лисенко¹, О.Е. Левченко¹

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: y.kuts@ukr.net

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

E-mail: vuchanin@gmail.com

Розглянуто методологію опрацювання сигналів вихрострумівому контролю, яка ґрунтується на використанні дискретного перетворення Гільберта та отриманих моделей формування сигналів, розкрито перспективи використання цього перетворення для контролю у статичному та сканувальному режимах. Показано можливість використання дискретного перетворення Гільберта для визначення дискретних амплітудних і фазових характеристик сигналу вихрострумівому перетворювача з метою пошуку нових детермінованих та статистичних характеристик та ознак, що корелюють з різними характеристиками та параметрами об'єкта контролю. Бібліогр. 25, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: вихрострумівий неруйнівний контроль, вихрострумівий перетворювач, дискретне перетворення Гільберта, дискретна фазова характеристика сигналу

Вихрострумівий контроль (ВСК) має певні переваги порівняно з іншими методами неруйнівного контролю (НК) через високу інформативність, яка пов'язана з чутливістю до низки параметрів об'єкта контролю (ОК), можливість його реалізації за відсутності безпосереднього контакту вихрострумівому перетворювача (ВСП) з поверхнею ОК, високу продуктивність НК та можливість повної або часткової автоматизації операцій контролю [1, 2]. Ефективність ВСК значною мірою залежить від методів опрацювання сигналів ВСП, математичного та алгоритмічно-програмного забезпечення процесу виділення корисної інформації про досліджувані параметри ОК. В перших приладах ВСК для реалізації різних методів виділення корисної інформації – амплітудного, фазового та методу проєкцій – використовувались відповідно амплітудні, фазові та синхронні детектори. До їх складу входять нелінійні елементи та інерційні ланцюги (зокрема, фільтри низької частоти) з частото-залежними елементами, наявність яких призводить до додаткових нелінійних спотворень. Тому перші засоби ВСК були орієнтовані на роботу на одній або декількох фіксованих робочих частотах в статичному (квазістатичному) [3, 4] або модуляційному [4, 5] режимах. Пізніше операції детектування виконувались за допомогою алгоритмів цифрової обробки сигналів, виді-

лення їх квадратурних компонент та розроблення методів інтерпретації годографів сигналів ВСП у комплексній площині [2–4]. З часом було запропоновано низку нових для ВСК методів обробки сигналів ВСП, серед яких успішно розвиваються, зокрема, методи що ґрунтуються на використанні нейромережових технологій [6–8], вейвлет-перетворень [9–10], принципів томографії для тривимірної реконструкції дефектів [11] тощо. Набувають розвитку також методи обробки сигналів ВСП, які збуджуються імпульсним сигналом [12–14]. До кола перспективних методів обробки сигналів ВСП відносяться методи, в основу яких покладено дискретне перетворення Гільберта (ДПГ), які вже використовуються у НК та вимірювальній техніці [15–20]. Проте у ВСК цей метод ще не набув широкого застосування і відповідні методологічні підходи ще не розроблено.

Метою статті є аналіз особливостей обробки сигналів в автоматизованих засобах ВСК на основі аналізу їх фазових і амплітудних характеристик, отриманих за допомогою ДПГ. Розглянуто два варіанти отримання інформації про ОК. Перший можна назвати статичним (або точковим), коли ВСП встановлюють у визначених процедурою контролю точках на поверхні ОК для вимірювання його параметрів. Такий контроль проводять, наприклад, вихрострумівими вимірювачами

Куц Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>, Учанін В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>

Лисенко Ю.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-9110-6684>, Левченко О.Е. – <https://orcid.org/0000-0002-3914-1818>

© Ю.В. Куц, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Е. Левченко, 2021

електропровідності [21] або вихрострумовими товщиномірами [22]. Інший варіант використовують переважно для вихрострумової дефектоскопії, де контроль реалізують механічним скануванням поверхні ОК [23]. За такого контролю характерною є модуляція сигналу ВСП на робочій частоті під час пересування ВСП через зону дефекту з наступною демодуляцією для виділення складових сигналу, пов'язаних з дефектом. Очевидно, що за сканувального ВСК вихідний сигнал залежатиме від швидкості сканування поверхні ОК на відміну від статичного варіанту контролю.

1. Формування інформаційних сигналів ВСК. В основу обґрунтування методів та алгоритмів опрацювання інформаційних сигналів ВСК покладено загальні принципи формування сигналів в системі «ВСП–ОК» та їх моделі.

В процесі взаємодії ОК з електромагнітним полем відбувається перенесення інформації про властивості ОК та його матеріалу на параметри та характеристики сигналів ВСК, внаслідок чого вони (функціонально чи кореляційно) стають залежними від параметрів ОК. В цілому на параметри та характеристики сигналів ВСП чинять вплив різні фактори – тип ВСП, форма сигналу збудження, його частота, характеристики матеріалу ОК та його геометрична форма, проміжок (зазор) між ВСП і ОК, розміри і розташування дефектів в ОК, режим контролю тощо. Для спрощення аналізу процесу формування сигналів конкретизуємо певні складові системи. В цій роботі розглядатимемо інформаційні сигнали ВСП трансформаторного типу, який збуджується гармонічною напругою.

1.1. Модель формування сигналів ВСП у статичному режимі. Процес формування сигналу ВСП у статичному режимі проілюстровано схематично на рис. 1.

Вихідний сигнал містить чотири складових: напругу холостого ходу $u_0(t)$, внесену напругу $u_{\text{вн}}(t, P_{\text{ОК}})$, викликану наведеними в ОК вихровими струмами, складову напруги $u_d(t, p_d)$, викликану перерозподілом вихрових струмів в ОК внаслідок наявних дефектів, та шумову складову $n(t)$, що найчастіше обґрунтовується як реалізація гауссового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням і дисперсією σ^2 .

Напруга $u_{\text{вн}}(t, P_{\text{ОК}})$ формується верхньою гілкою моделі на рис. 1. Коефіцієнт передачі ПН1 ($k_1 < 1$) та фазовий зсув у $\Phi 1$ ($-\pi/2 < \varphi < \pi/2$) змінюються

під впливом множини параметрів системи ВСП–ОК (електропровідності та магнітної проникності матеріалу ОК, проміжку між ВСП і ОК, форми та геометричних розмірів ОК тощо), які відображені в моделі вектором $p_{\text{ОК}}$. Аналогічно цьому відбувається формування складової $u_d(t, p_d)$ у третій гілці моделі, що залежить від вектора p_d . Останній утворений множиною параметрів і характеристик дефекту, до числа яких входять розміри дефектної області ОК, її розташування (з виходом на поверхню чи у приповерхневому шарі), глибина тріщини, її орієнтація відносно ВСП тощо. Для елементів цієї гілки коефіцієнт передачі ПН2 $k_2 \ll k_1$, а фазовий зсув у $\Phi 2$ може змінюватись в інтервалі значень $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$.

Складову $u_0(t)$ залежить від ряду технологічних параметрів ВСП та його конструктивних особливостей і не залежить від характеристик і параметрів ОК. Ця складову не містить інформації про параметри і характеристики ОК, проте має найбільший рівень і найбільше маскує вплив вихрових струмів ОК на амплітуду і фазу вихідного сигналу. Зазначені вище три складові вихідного сигналу ВСП, у разі збудження ВСП гармонічним сигналом, в загальному виді представляються виразом

$$u(t, p_{\text{ОК}}, p_d) = u_0(t) + u_{\text{вн}}(t, p_{\text{ОК}}) + u_d(t, p_d) = U(p_{\text{ОК}}, p_d) \cos[2\pi ft - \varphi(p_{\text{ОК}}, p_d)]. \quad (1)$$

Механізм маскування інформаційних складових сигналу (1) пояснює наступний приклад. Розглянемо суму двох гармонічних функцій: $\sin(2\pi ft)$, що не містить корисної інформації, та $A_i \sin(2\pi ft + \varphi_i)$, $A_i \ll 1$, амплітуда і початкова фаза якої є носіями певної інформації. З курсу тригонометрії відомо, що

$$\sin(2\pi ft) + A_i \sin(2\pi ft + \varphi_i) = A \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (2)$$

$$\text{де } A = \sqrt{1 + A_i^2 + 2A_i \cos \varphi_i}, \quad \varphi = \arctg \frac{A_i \sin \varphi_i}{1 + A_i \cos \varphi_i} \quad (3)$$

Для отримання кількісних оцінок покладемо у (3) $\varphi_i = 0$, $A_i = 0,1$. Тоді, до прикладу, зменшення A_i у двічі приводить до зменшення A всього на ~4,5 %. Суттєво зменшується і діапазон зміни початкової фази: для значення $A_i = 0,1$ маємо

$$\varphi = \arctg \frac{0,1 \sin \varphi_i}{1 + 0,1 \cos \varphi_i} \ll \varphi_i, \quad (4)$$

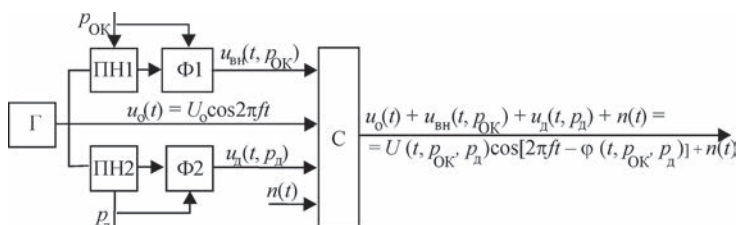


Рис. 1. Модель процесу формування сигналів ВСП у статичному режимі, де: Г – генератор напруги холостого ходу з робочою частотою f та амплітудою U_0 ; ПН – подільник напруги; Φ – фазообертач; С – суматор

Отже інтервалу значень $\varphi_i \in (0, 90^\circ)$ відповідає інтервал $\varphi \in (0, 5,71^\circ)$, тобто майже у 16 разів менший.

Для підвищення чутливості засобів ВСК до параметрів ОК вдаються до вилучення з розгляду неінформативних складових сигналу, що досягається різними шляхами. До прикладу у вихрострумівій дефектоскопії компенсація значної частини складових $u_0(t)$ та $u_{\text{вн}}(t, p_{\text{ок}})$ може відбуватись за рахунок диференціального включення вимірювальних навоїв ВСП; інший варіант зменшення впливу неінформативних компонент сигналу полягає у створенні компенсаційної напруги протифазної до цих складових, тобто $u_k(t) = u_0(t) + u_{\text{вн}}(t, p_{\text{ок}})$, що реалізується для фіксованих значень вектора $p_{\text{ок}}$. Для інших задач ВСК можливий випадок компенсації тільки напруги холостого ходу, тоді обирають $u_k(t) = -u_0(t)$.

1.2. Модель формування сигналів ВСП в режимі сканування. Процес формування сигналу ВСП у режимі сканування ОК проілюстровано схематично на рис. 2.

У цьому випадку швидкість взаємного руху ВСП і ОК $v \neq 0$, тому локалізовані у просторі варіації параметрів системи ВСП-ОК трансформуються у змінювані в часі амплітуду і початкову фазу сигналу. Вихідний сигнал ВСП (без прив'язки до координат контрольованої ділянки ОК) у загальному виді можна представити формулою

$$u(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}}) = u_0(t) + u_{\text{вн}}(t, p_{\text{ок}}) + u_{\text{д}}(t, p_{\text{д}}) = U(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}}) \cos[2\pi ft - \varphi(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})] \quad (5)$$

Оскільки у виразі (5) на відміну від (1) амплітуда і початкова фаза залежать від часу t , то їх необхідно розглядати не як параметри, а як амплітудо-часову і фазо-часову функції (характеристики). Отже сигнал (5) уявляє гармонічний сигнал-носії робочої частоти зі складною амплітудною і фазовою модуляціями. Це враховано введенням в модель на рис. 2 амплітудних (АМ) і фазових (ФМ) модуляторів.

Для обґрунтування способів опрацювання таких сигналів важливо оцінити верхню частоту f_m в спектрі $U(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})$ та $\varphi(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})$, яка в першу чергу залежить від швидкості сканування v . До прикладу, якщо $v = 4$ см/с, використовується ВСП диференціального типу з відстанню між осердями з вимірювальними навоєм $\Lambda = 4$ мм, то можна вважати, що у першому наближенні характеристики сигналу (5) від поверхневої тріщини з розкритвом $l \ll \Lambda$ змінюються з частотою $f_T = v/\Lambda = 10$ Гц. Отже ширина смуги частот, в яких зосереджено

спектри $U(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})$ та $\varphi(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})$, значно менша за робочу частоту f .

Сигнали ВСК виду (1) та (5) відносяться до класу вузькосмугових, аргументами яких є час, частота та фізико-механічні характеристики та параметри контрольованих матеріалів та об'єктів. Інформаційні сигнали зазвичай спостерігаються на фоні значного адитивного шуму різного походження, який суттєво обмежує чутливість і достовірність контролю. В моделях сигналів ВСК на рис. 1, 2 шумова складова врахована компонентою $n(t)$. Вплив шумової складової $n(t)$, за низького відношення сигнал/шум $c/\sigma = U(p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})/\sigma$, зменшується за рахунок включення в структуру засобів ВСК частотних фільтрів або за рахунок застосування спеціальних методів опрацювання сигналів, до прикладу синхронних детекторів.

2. Перспективи використання ДПГ для аналізу сигналів ВСК. Перетворення Гільберта знакозмінних числових функцій $u(x) \in L_2$ добре відоме в математиці як інтегральне перетворення з ядром $1/\pi x$ [20–23]. В якості аргументу x найчастіше виступає час t . Це перетворення дає змогу однозначно визначати характеристики таких функцій: амплітудну $A(t)$, фазову $\Phi(t)$ та частотну $F(t)$. Його дискретна реалізація у вигляді ДПГ є одним з ефективних методів цифрового опрацювання сигналів у часовій області. Цей метод широко використовується в різних технічних застосуваннях. Незважаючи на те, що проблематиці обробки сигналів ВСК в цілому було приділено значну увагу, питання використання ДПГ для ВСК ще не достатньо повно висвітлені. Розглянемо основні переваги використання алгоритмів обробки сигналів ВСК на основі ДПГ для ВСК. Це:

- висока інформативність через можливість аналізувати всю інформацію, пов'язану з інтегральним впливом параметрів ОК $p_{\text{ок}}$ та $p_{\text{д}}$ на характеристики сигнал ВСП на відміну від застосування перетворення Фур'є, коли цей вплив розподіляється між різними частотними компонентами спектру;

- можливість отримати дискретні амплітудну, фазову та частотну характеристики сигналів ВСК як часові функції, задані часовими рядами з кінцевою кількістю вибірок, що надає нові можливості для удосконалення методології обробки сигналів ВСК;

- можливість отримати вибірки характеристик сигналу ВСП значних обсягів, що створює передумови для більш коректного використання ста-

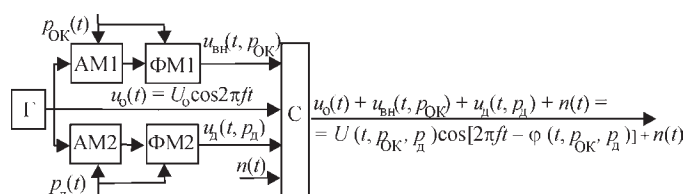


Рис. 2. Модель процесу формування сигналів ВСП в режимі сканування ОК, де: АМ1 і АМ2 – амплітудні модулятори реальної і уявної складових сигналу відповідно; ФМ1 і ФМ2 – фазові модулятори реальної і уявної складових сигналу відповідно

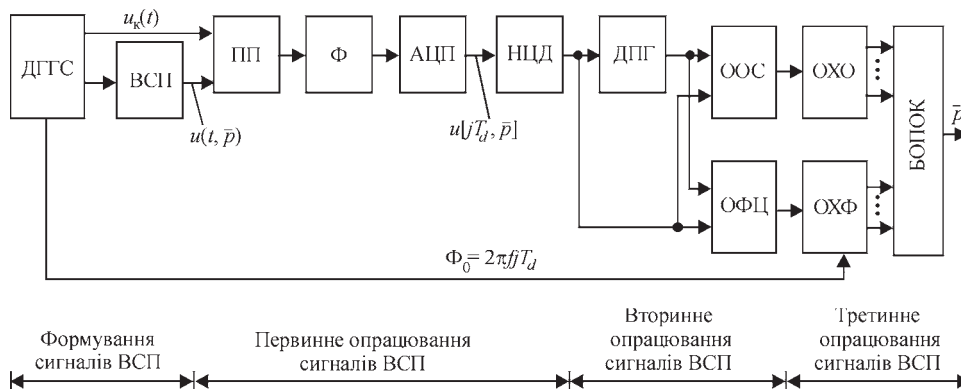


Рис. 3. Структурно-логічна схема формування та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ, де ДГГС – двофазний генератор гармонічних сигналів; ПП – підсумовуючий підсилювач; Ф – фільтр; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; НЦД – накопичувач цифрових даних; ДПГ – дискретний перетворювач Гільберта; ООС та ОФС – обчислювачі обвідної та фази сигналу відповідно; ОХО та ОХФ – обчислювачі характеристик обвідної та фази відповідно; БОПОК – блок оцінювання параметрів ОК

тистичних методів опрацювання амплітудної та фазової характеристик;

- можливість синхронно обчислювати амплітудну та фазову характеристики сигналу ВСП для спільного їх використання для виділення нових інформаційних ознак, що можуть бути ефективними для визначення параметрів та характеристик ОК в різних завданнях ВСК;

- можливість визначати зміни параметрів сигналів ВСП навіть на інтервалах часу, співмірних з періодом сигналу-носія;

- застосування математичного апарату ДПГ до результатів фізичних експериментів дає змогу врахувати той факт, що вихідні сигнали ВСП мають розмірність (найчастіше вольти). Їх можна представити добутком числової функції $u(t)$ на одиницю вимірювання $[U]$ відповідної фізичної величини U .

Оскільки ДПГ має властивість лінійності, а модуль комплексного коефіцієнта перетворювача Гільберта дорівнює одиниці, формування Гільберт-образу сигналів $\tilde{u}(t)$ $[U]$ відбувається без спотворення міри, за допомогою якої вимірюються значення $\tilde{u}(t)$ $[U]$. Нижче в таблиці наведено узагальнені відомості щодо вимірюваних характеристик сигналів, які отримують через ДПГ, їх розмірності та необхідності використання фізичних мір величин.

Отже у випадку застосування ДПГ до сигналів ВСП, які мають розмірність, можна констатувати наступне:

- формування Гільберт-образу сигналів та визначення їх амплітудної характеристики відбувається без спотворення міри, яка використовується для вимірювання сигналу ВСП;
- значення фазової характеристики в радіанах є величиною з розмірністю одиниця, яка визнача-

ється через відношення двох величин одного роду – $\tilde{u}(t)$ $[U]$ та $u(t)$ $[U]$ без будь-якого використання окремої міри фазового зсуву сигналів;

- оцінювання значень частотної характеристики з функції $\Phi(t)$ в Герцах вимагає використання додаткової міри часу.

- можливість мінімізації аналогової частини схеми опрацювання сигналів за рахунок розширення цифрової обробки, що збільшує гнучкість систем ВСК та можливість їх оновлення за рахунок вдосконалення програмного забезпечення.

3. Зміст та завдання формування та опрацювання сигналів ВСК за допомогою ДПГ. Узагальнена схема отримання та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ подана на рис. 3.

Формування сигналів ВСП виконується наступним чином. ДГГС формує синусоїдний сигнал живлення ВСП робочої частоти f . ВСП через електромагнітне поле взаємодіє з ОК і формує сигнал ВСП $u(t, \bar{p})$. Аргументами цього сигналу є не тільки час t , але й вектор $\bar{p} = \bar{p}_{\text{ок}} + \bar{p}_{\text{д}}$ параметрів ОК та його можливих дефектів. Це відображує той факт, що щільність вихрових струмів в ОК залежить від електрофізичних характеристик матеріалу ОК, параметрів дефектів, геометричних розмірів ОК тощо. Приклад сигналу ВСП диференціального типу, отриманий в системі ВСК під час сканування поверхні ОК з штучним дефектом у вигляді отвору діаметром 1 мм завглибшки 1,5 мм, наведено на рис. 4 [24].

Наведений на рис. 4 приклад є характерним для сканувальних систем ВСК. Аналіз сигналів такого типу за їх вибітками не завжди дає змогу отримати інформацію, необхідну для формування достовірних висновків щодо якості ОК. Більш конструктивним, на наш погляд, є підхід, що ґрунтується на аналізі характеристик таких сигналів – амплітудної, фазової та частотної. Ці характеристики можуть бути отримані на основі ДПГ. Розглянемо детальніше методологію такої обробки сигналів ВСП, яка виконується у три етапи (рис. 3). На першому етапі сигнал $u(t, \bar{p})$

Характеристики сигналів, які отримують через ДПГ

Функція	Розмірність	Наявність фізичної міри
$u(t)$ $[U]$, $\tilde{u}(t)$ $[U]$, $A(t)$ $[U]$	В чи А	міра величини U
$\Phi(t)$	радіан	-
$F(t)$	Гц	міра часу t

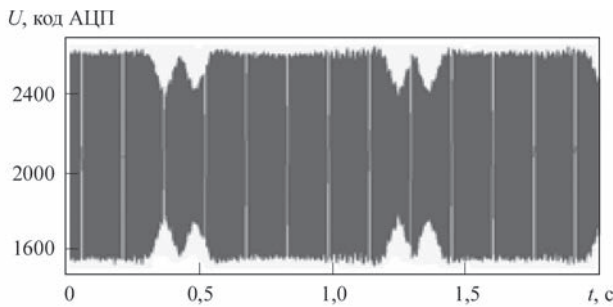


Рис. 4. Фрагмент сигналу ВСП, отриманий в системі ВСК

спочатку додається до сигналу компенсації $u_k(t)$ в підсумовуючому підсилювачі ПП. Сигнал $u_k(t)$ формується ДГГС, який забезпечує можливість регулювання його амплітуди і фази. Таке регулювання необхідне для компенсації неінформативної складової сигналу ВСП залежно від задачі і умов контролю. Фільтр Φ – це фільтр низьких частот, який використовується перед АЦП для обмеження частотної смуги пропускання сигналу у відповідності з теоремою відліків Найквіста-Шеннона. Його частота зрізу дорівнює половині частоти дискретизації АЦП, тобто $0,5F_d$.

Отримувану вибірку цифрового сигналу, що акумулюється у блоці НЦД, можна записати у вигляді:

$$u[j, \bar{p}] = U[j, \bar{p}] \cdot \cos(\Phi[j, \bar{p}]), \quad j = \overline{1, J}, \quad (6)$$

де J – обсяг вибірки; j – номер відліку у вибірці.

З виразу (6) видно, що характеристики ТО впливають на дискретні амплітудну $U[j, \bar{p}]$ та фазову $\Phi[j, \bar{p}]$ характеристики сигналу ВСП. Хоча взаємозв'язок характеристик ОК з характеристиками сигналу ВСП у явній формі в більшості випадків встановити неможливо, функції амплітуди та фази є носіями інформації про властивості ОК.

Вторинне опрацювання сигналів ВСП включає виконання дискретного перетворення Гільберта сигналів та обчислення їх обвідної та фази, що виконується відповідно блоками ДПГ, ООС та ОФС. ДПГ реалізує оператор $\mathbf{H}_d$ і забезпечує отримання Гільберт-образу вибірки $u[j, \bar{p}]$: $\tilde{u}[j] = \mathbf{H}_d(u[j])$, $j = \overline{1, J}$.

Значення дискретних амплітудної та фазової характеристики сигналу для всіх точок вибірки обчислюються в блоках ООС та ОФС за алгоритмами відповідно до [25]:

$$U[j, \bar{p}] = \sqrt{u^2[n] + \tilde{u}^2[j, \bar{p}]}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Phi[j, \bar{p}] = & \arctan \frac{\tilde{u}[j, \bar{p}]}{u[j, \bar{p}]} + \\ & + \frac{\pi}{2} \{ 2 - \text{sign} \tilde{u}[j, \bar{p}] (1 + \text{sign} u[j, \bar{p}]) \} + \\ & + L(\tilde{u}[j, \bar{p}], u[j, \bar{p}]), \end{aligned} \quad (8)$$

де L – оператор розгортання фазової характеристики сигналу за межі інтервалу $[0; 2\pi)$.

ДПГ дає можливість отримати вибірки амплітудної та фазової функцій з частотою $F_d \gg f$. Це, по-перше, дає змогу відслідкувати динаміку зміни характеристик сигналу ВСП навіть протягом його періоду, по-друге, застосувати відповідні детерміновані та статистичні методи опрацювання цих функцій.

Третинне опрацювання сигналів ВСП виконується блоками ОХО, ОХФ та БОПОК. Цей етап спрямований на отримання вторинних детермінованих і статистичних характеристик з послідовностей $U[j, \bar{p}]$ та $\Phi[j, \bar{p}]$. Це можуть бути функція амплітудної модуляції сигналу, її параметри, індекс модуляції, функція фазової модуляції, яка визначається як різниця фазових характеристик сигналу ВСП та сигналу збудження

$$\varphi[j, \bar{p}] = \Phi[j, \bar{p}] - 2\pi f T_d \quad (9)$$

та інші.

Основним завданням БОПОК є формування оцінки одного або декількох параметрів ОК залежно від потреб випробування. Тобто він має відокремити інформацію про певну досліджувану властивість ОК. Мова йде про операцію виділення із сигналу ВСП інформаційних ознак, яка в англійській літературі має назву «feature extraction». Вона полягає у виділенні з інформаційного сигналу тільки тих його характеристик, які стосуються досліджуваного параметра ОК з метою встановлення зв'язку (функціонального чи кореляційного) між ними. В цілому, визначення амплітудної і фазової функцій сигналу ВСП окремо одна від одної дає змогу збільшити кількість вхідних аргументів (інформаційних ознак) і забезпечує на цій основі більш широкі можливості для вдосконалення алгоритмів виявлення діагностичних ознак.

Фактично БОПОК має наближено розв'язати обернену задачу вимірювання. У загальному розумінні обернена задача – це тип задачі для визначення параметрів моделі чи об'єкта на основі отриманих на їх виходах даних чи сигналів. Схематично сутність оберненої задачі ВСК зображено на рис. 5.

В загальній постановці проблема розв'язання обернених задач не має рішення. Однак у деяких частинних випадках існує можливість стабілізації частини характеристик та параметрів ОК або обґрунтування оцінки тільки одного або двох його параметрів. У таких випадках можуть бути використані окремі методики розв'язання оберненої задачі вимірювання. Такі методики та алгоритми можуть бути отримані, наприклад, на основі виявлених функціональних чи кореляційних залежностей між характеристиками сигналу та характеристиками ОК, на основі нейромережевих технологій тощо.

Якщо первинна обробка сигналу ВСП виконується за допомогою аналогової технології, то вторинна обробка сигналів ВСП і третинна обробка даних реалізуються в дискретному варіанті. Це забезпечує суттєву гнучкість систем ВСК та можливість їх оновлення за рахунок вдосконалення

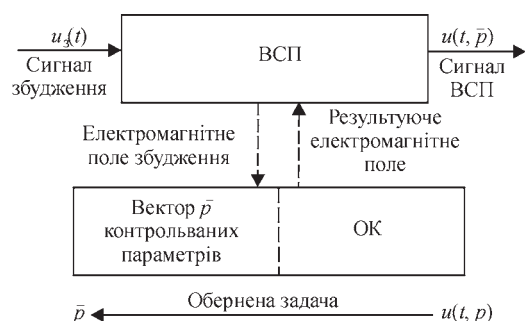


Рис. 5. Схематичне подання процесу розв'язання оберненої задачі ВСК

програмного забезпечення. Крім того, мінімізація обробки аналогового сигналу допомагає зменшити його нелінійні спотворення, що важливо для підвищення надійності та достовірності ВСК.

Висновки

1. Розроблена на основі ДПГ методологія опрацювання сигналів ВСК дає змогу отримувати дискретні амплітудні, фазові і частотні характеристики сигналів ВСК, які задані часовими рядами, і аналізувати локалізовані в часі модуляції характеристик сигналів ВСК (навіть в межах періоду сигналу-носія), які утворюються під час сканування ОК з неоднорідними структурою, фізико-механічними та геометричними характеристиками.

2. Розглянуто узагальнені моделі процесу формування сигналів ВСП в статичному режимі та режимі сканування ОК, який використовується в засобах автоматизованого ВСК.

3. Розглянуто структурно-логічну схему формування та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ, в якій виділено та уточнено зміст первинного, вторинного та третинного етапів опрацювання сигналів ВСК.

4. З'ясовано, що ДПГ для ВСК має певні переваги, які дають змогу:

4.1. отримувати більші обсяги інформації про ОК у цифровій формі і на цій основі розширювати науково-технічну базу проектування та розроблення нових інтелектуальних засобів ВСК з покращеними технічними характеристиками;

4.2. синхронно обчислювати амплітудну та фазову характеристики сигналу ВСП і на цій основі розширити можливості для пошуку нових ознак для контролю та оцінювання параметрів і характеристик ОК;

4.3. за рахунок властивості лінійності ДПГ виконувати перетворення сигналів ВСП без спотворення міри величин, в яких вимірюються ці сигнали;

4.4. мінімізувати аналогову частину опрацювання сигналів за рахунок розширення цифрової обробки, що забезпечує значну гнучкість систем ВСК та можливість їх поліпшення за рахунок модернізації програмного забезпечення.

Використання цих переваг ДПГ відкриває нові перспективи для удосконалення методології обробки сигналів ВСК.

Список літератури

- McMaster, R.C., McIntire, P. (1986) *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, Flux leakage and Microwave Nondestructive Testing)*. 2nd edn. USA: American Society for NDT.
- Учанін В.М. (2013) *Накладні вихрострумкові перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, СПОЛІОМ.
- Uchanin, V. (2020) Detection of the fatigue cracks initiated near the rivet holes by eddy current inspection techniques. *Transactions on Aerospace Research*, **1**(258), 47–58. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2020-0010>
- Hochschild, R. (1960) Modulation analysis – a new instrument technique in eddy current testing. *Nondestructive Testing*, **5**, 323–325.
- Aks'anova, S., Lyubchenko, A., Uchanin, V. et al. (2005) Detection of defects in the tubes of refrigerators of locomotive diesel engines by the eddy current method. *Materials Science*, **41**(5), 406–409. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-005-0178-7>
- Udpa, L. and Udpa, S.S. (1990) Eddy current defect characterization using neural networks. *Materials Evaluation*, **48**(4), 342–347. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(90\)90883-P](https://doi.org/10.1016/0308-9126(90)90883-P)
- Abdalla, A., Faraj, M., Samsuri, F. et al. (2019) Challenges in improving the performance of eddy current testing: Review. *Measurement and Control*, **52**(1-2), 46–64. DOI: <https://doi.org/10.1177/0020294018801382>
- Сременко В.С., Переїденко А.В. та Монченко О.В. (2012) Застосування нейромережевих технологій у системах неруйнівного контролю. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 35–41.
- Balakrishnan, S., Cacciola, M., Udpa, L. et al. (2012) Development of image fusion methodology using discrete wavelet transform for eddy current images. *NDT&E International*, **51**, 51–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.06.006>
- Grman, J., Ravas, R., Syrova, L. (2001) Application of wavelet transformation in eddy current testing. *Measurement Science Review*, **1**(1), 21–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMTC.2001.928846>
- Вертії О.О., Учанін В.М. (2021) Тривимірна візуалізація виявлених дефектів методами вихрострумкової обчислювальної томографії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 7–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.01>
- Tian, G.Y., Sophian, A. (2005) Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors. *NDT&E International*, **38**, 77–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.06.001>
- Kuts, Y., Lysenko, Y., Dugin, A. et al. (2016) Analysis of an eddy-current transducer with impulsive excitation in the nondestructive testing of cylindrical objects. *Materials Science*, **52**(3), 431–437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9975-4>
- Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Yu. et al. (2020) Advanced signal processing methods for inspection of aircraft structural materials. *Transactions on Aerospace Research*, **2**(259), 27–35. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2020-0008>
- Сусл.ов С.Ф., Сременко В.С., Протасов А.Г., Павленко Ж.О. (2016) Використання перетворення Гільберта для отримання додаткових інформативних ознак при імпульсному імпедансному контролі композиційних матеріалів. *Наукові Вісники НТУУ «КПІ»*, **1**, 117–123. DOI: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2016.1.59042>
- Eremenko, V., Suslov, E., Protasov, A., Lysenko, I. (2016) Using Hilbert transform for signal processing in mechanical impedance analysis. *19th World Conference on Non-Destructive Testing. Germany, 13–17 June*. Available at: <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=19783> (Accessed: 12 August 2021).
- Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Kurapov, P. (2021) Hilbert transform of a periodically non-stationary random signal: Low-frequency modulation. *Digital Signal Processing*, **116**(103113). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103113>
- Куп Ю.В., Щербак Л.М. (2004) Застосування перетворення Гільберта у фазометрії. *Технологические системы*, **2**, 50–55.
- Лайонс Р. (2006) *Цифровая обработка сигналов*. 2-е изд. Москва, Бином-Пресс.
- Куп Ю.В., Лысенко Ю.Ю. (2011) Применение преобразования Гильберта для анализа сигналов вихретоковой дефектоскопии. *Научные Известия на НТСМ*, **121**, 22–24.

21. Учанін В.М., Осташ О.П., Бичков С.А. та ін. (2021) Вихрострумний моніторинг деградації алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіаційної техніки. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.01>
22. Teterko, A., Uchanin, V., Gutnik, V. (2014) Improvement of the accuracy of eddy-current testing of the electric conductivity of materials and the thickness of dielectric coatings of the shells. *Materials Science*, **6**, 857–865. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9684-9>
23. Учанін В.М. (2018) Пропозиції щодо вдосконалення класифікації вихрострумних перетворювачів. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 68–74. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.02.10>
24. Долиненко В.В., Куц Ю.В., Шаповалов Є.В. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумного контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, **5-6**(764), 60–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
25. Куц Ю.В., Щербак Л.М. (2009) *Статистична фазометрія*. Тернопіль, Вид-во Терн. держ. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя.
11. Vertiy, O.O., Uchanin, V.N. (2021) Three-dimensional visualization of the detected defects by eddy current computing tomography. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **2**, 7–13 [in Ukrainian]. doi: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.01>
12. Tian, G.Y., Sophian, A. (2005) Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors. *NDT&E Int.*, **38**, 77–82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.06.001>
13. Kuts, Y., Lysenko, Y., Dugin, A. et al. (2016) Analysis of an eddy-current transducer with impulsive excitation in the non-destructive testing of cylindrical objects. *Mater. Sci.*, **52**(3), 431–437. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9975-4>
14. Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Yu., Protasov, A., Uchanin, V. (2020) Advanced signal processing methods for inspection of aircraft structural materials. *Transact. on Aerospace Research*, **2**(259), 27–35. doi: <https://doi.org/10.2478/tar-2020-0008>
15. Suslov, E.F., Eremenko, V.S., Protasov, A.G., Pavlenko, Zh.O. (2016) Application of Hilbert transform for obtaining additional informative characteristics at pulsed impedance control of composite materials. *Naukovi Visti NTUU KPI*, **1**, 117–123 [in Ukrainian]. doi: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2016.1.59042>
16. Eremenko, V., Suslov, E., Protasov, A., Lysenko, I. (2016) Using Hilbert transform for signal processing in mechanical impedance analysis. In: *Proc. of 19th World Conf. on Non-Destructive Testing* (Germany, 13–17 June). <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=19783>
17. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Kurapov, P. (2021) Hilbert transform of a periodically non-stationary random signal: Low-frequency modulation. *Digital Signal Processing*, **116**(103113). doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103113>
18. Kuts, Yu.V., Shcherbak, L.M. (2004) Application of Hilbert transform in phasometry. *Tekhnologicheskie Sistemy*, **2**, 50–55 [in Ukrainian].
19. Lyons, R. (2006) *Digital signal processing. 2nd Ed. Moscow, Binom-Press* [in Russian].
20. Kuts, Yu.V., Lysenko, Yu.Yu. (2011) Application of Hilbert transform for analysis of eddy current detection signals. *Nauchnye Izvestiya na NTSM*, **121**, 22–24 [in Russian].
21. Uchanin, V.M., Ostash, O.P., Bychkov, S.A. et al. (2021) Eddy current monitoring of aluminium alloy degradation during long-term operation of aircraft. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 3–10 [in Ukrainian]. doi: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.01>
22. Teterko, A., Uchanin, V. and Gutnik, V. Improvement of the accuracy of eddy-current testing of the electric conductivity of materials and the thickness of dielectric coatings of the shells. *Mater. Sci.*, **6**, 857–865. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9684-9>
23. Uchanin, V.M. (2018) Propositions on improvement of the classification of eddy current transducers. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 68–74 [in Ukrainian]. doi: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.02.10>
24. Dolinenko, V.V., Kuts, Yu.V., Shapovalov, E.V. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, **5-6**(764), 60–67. doi: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
25. Kuts, Yu.V., Shcherbak, L.M. (2009) *Statistical phasometry*. Ternopil. Vyd-vo DTU [in Ukrainian].

References

APPLICATION OF HILBERT TRANSFORM FOR ANALYSIS OF SIGNALS OF AUTOMATED EDDY CURRENT INSPECTION

Part 1. Theoretical aspects of Hilbert transformation application at eddy current inspection

Yu.V. Kuts¹, V.M. Uchanin², Yu.Yu. Lysenko¹, O.E. Levchenko¹

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, E-mail: y.kuts@ukr.net

²G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

A methodology of processing signals of eddy current inspection is considered, which is based on application of discrete Hilbert transform and obtained models of signal formation, prospects of application of this transformation in the static and scanning modes were opened. The possibility is shown of application of discrete Hilbert transform for determination of discrete amplitude and phase characteristics of the signal from eddy current transducer, in order to search for new deterministic and statistic characteristics, which correlate with different characteristics and parameters of the object of control. 25 Ref., 1 Tabl, 5 Fig.

Keywords: eddy current nondestructive testing, eddy current transducer, discrete Hilbert transform, discrete phase characteristic of the signal

Надійшла до редакції 13.08.2021

МУЛЬТИМАСШТАБНА МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОЇ ОЦІНКИ ПОШКОДЖЕНОСТІ ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ З ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

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

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

Розроблено мультимасштабну методику прогнозування напружено-деформованого, пошкодженого та граничного станів конструкцій з типових волокнистих композиційних матеріалів. В основу методології покладено комбінацію макромасштабних моделей описання стану структурно неоднорідних крихких матеріалів та мезомасштабні підходи континуального моделювання розвитку пошкодженості під дією зовнішнього навантаження. На прикладі великогабаритних циліндричних посудин тиску зі скло- та вуглеволоконних композитів досліджено особливості впливу зовнішнього навантаження на пошкодженість матеріалу та граничний стан конструкції. Бібліогр. 11, рис. 5.

Ключові слова: композиційні матеріали, пошкодженість, граничний стан, математичне моделювання, мультимасштабна методика

Використання композиційних матеріалів при виготовленні конструкцій для потреб аерокосмічної галузі, автомобілебудування, будівництва є ефективним шляхом отримання конструкційних елементів з унікальними комбінаціями експлуатаційних властивостей. Зокрема, поширення отримали волокнисті композити на основі скляних та вуглецевих волокон, які дозволяють досягти високої міцності тонкостінних конструкцій при їх відносно невеликій вазі [1–3]. Але просторова неоднорідність структури таких матеріалів зумовлює об'єктивні труднощі при проектуванні, експертизі технічного стану та аналізі працездатності реальних конструкційних елементів, зокрема, великогабаритних. Використання загальноприйнятих підходів, які полягають в оцінці ефективних властивостей матеріалу для подальшого розгляду його як однорідного, суттєво обмежує коло розв'язуваних практично значимих задач. Зокрема, відомо, що процес зародження та розвитку дефектності матеріалу є мікроскопічним за своїм масштабом, тому для коректної оцінки ступеня пошкодженості та врахування докритичної пошкодженості при оцінці граничного стану конструкції під дією проектного навантаження необхідно враховувати особливості структури матеріалу та його опірність певному механізму руйнування [4].

Можливості чисельного опису композиційних конструкцій в неоднорідній постановці обмежені ресурсомісткістю відповідних задач, тому розробка аналітичних підходів, що дозволяють, з одного боку, врахувати особливості мікроструктурного стану матеріалу при моделюванні, а з іншого – розглядати конкретні конструкційні елементи без суттєвого спрощення, є актуальною. Тут доцільно відокремити методи мультимасштабного

моделювання, що базуються на сучасних алгоритмах скінченно-елементного моделювання складних різномасштабних процесів [5, 6]. Метою цієї роботи є розробка методології та чисельних засобів мультимасштабного прогнозування напружено-деформованого, пошкодженого та граничного станів конструкцій з типових волокнистих композиційних матеріалів.

Основною ідеєю розробленої методології є послідовна скінченно-елементна реалізація простеження стану конструкції загалом в однорідному анізотропному наближенні (макромасштаб) та окремо кожної регулярної мезомасштабної області в неоднорідному наближенні (мезомасштаб). Це дозволяє уникнути надмірних вимог до ресурсів засобів обчислення шляхом збільшення швидкості окремого розрахунку. При цьому незалежність розрахунків станів окремих мезомасштабних областей надає широкі можливості до використання алгоритмів паралельного обчислення відповідних крайових задач з метою суттєвого зменшення часу проведення чисельних експериментів [7]. Зв'язок між рівнями реалізується шляхом передачі певного обсягу розрахункових даних, а саме деформованого стану та докритичного пошкодження (рис. 1).

Для комп'ютерної реалізації даного підходу використовувались методи скінченно-елементного моделювання на основі восьмивузлових елементів, а кожний скінченний елемент макрозадачі розглядався як регулярна мезообласть, в рамках якої ставилась відповідна мезозадача.

Так, макромасштабне наближення вимагає використання усереднених фізико-механічних властивостей матеріалу в залежності від складу двокомпонентного композиту (об'ємного вмісту

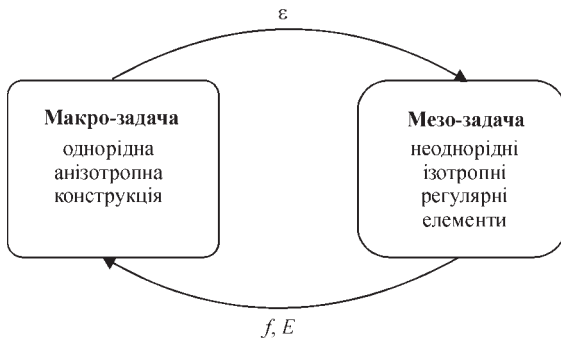


Рис. 1. Умовна схема постановки мультимасштабної задачі опису напружено-деформованого та пошкодженого стану конструкцій з композиційних матеріалів для розв'язання характерних задач експертизи технічного стану

матеріалу матриці V_m і волокнистого наповнювача V_f та властивостей його окремих складників. Тут найбільш поширеними є підходи, що базуються на правилі сумішей. Зокрема, для випадку в макромасштабі композиційний матеріал розглядається, як пружний ортотропний, а значення модуля Юнга вздовж і уперек волокон обчислюється згідно з правилом сумішей [8]:

$$\begin{cases} E_T = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}; \\ E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f), \end{cases} \quad (1)$$

де E_m , E_f – модуль Юнга матеріалу матриці та волокон відповідно; E_T , E_L – модуль Юнга умовно однорідного анізотропного композиту вздовж і уперек волокон відповідно.

Для визначення коефіцієнта Пуассона було використано залежність Уїтні та Райлі в наступному формулюванні [9]:

$$\begin{cases} \nu_{LT} = \frac{\nu_m - [2(\nu_m - \nu_f)(1 - \nu_m^2)E_f V_f]}{E_m (1 - V_f)(1 - \nu_f - 2\nu_f^2) + E_f [V_f (1 - \nu_m - 2\nu_m^2) + (1 + \nu_m)]}, \\ \nu_{TL} = \nu_m V_m + \nu_f V_f, \end{cases} \quad (2)$$

де ν_{LT} , ν_{TL} – коефіцієнт Пуассона для напрямків вздовж і уперек волокна відповідно; ν_m , ν_f – коефіцієнт Пуассона матеріалу матриці та волокон відповідно.

Граничний стан в конкретному скінченному елементі макрозадачі досягається при несприятливій комбінації повздовжніх (відносно напрямку волокон) σ_{xx} , поперечних σ_{yy} та дотичних напружень σ_{xy} , що математично визначається, зокрема, на основі формули Хофмана [10]:

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_1}\right)^2 - \frac{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}{X_1 X_2} + \left(\frac{\sigma_{yy}}{X_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S}\right)^2 > 1, \quad (3)$$

де X_1 , X_2 , S – константи матеріалу.

В разі, якщо вісі ортотропного композиту не співпадають з напрямком силового навантаження, константи в (3) можуть бути розраховані наступним чином:

$$X_1 = X_s \sin^2 \alpha + X_m \cos^2 \alpha;$$

$$X_2 = X_m \sin^2 \alpha + X_s \cos^2 \alpha, \quad (4)$$

де α – кут між вектором прикладення зусилля та напрямком розташування волокон, X_m , X_s – константи матеріалу, що характеризують граничний стан матеріалу при навантаженні впоперек та вздовж волокон відповідно.

Результатом скінченно-елементного розв'язання крайової задачі напружено-деформованого стану (НДС) конкретної конструкції з композиційного матеріалу певного класу є поле деформацій, яке використовується при аналізі мезостану кожного елемента в якості граничних умов. Шляхом розрахунку мезозадачі оцінюється докритична пошкодженість матеріалу, яка впливає на макроскопічний НДС, що формально враховується передачею величини об'ємної концентрації пошкодження в макрозадачу.

Відомо, що особливістю руйнування композиційних матеріалів є значна дисперсія граничного навантаження, яка зумовлена локальною неоднорідністю властивостей, природним відхиленням структури від ідеальної, набутою під час виготовлення пошкодженістю тощо. Тому для описання розвитку докритичного пошкодження в матриці композиту використовувався статистичний підхід, що базується на функції розподілу Вейбула:

$$df = \begin{cases} A f_0 \varepsilon_{\max}^{\eta-1} \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_0} \right)^\eta \right] d\varepsilon_{\max}, & \varepsilon_{\max} \geq 0; \\ 0, & \varepsilon_{\max} < 0, \end{cases} \quad (5)$$

де df – приріст об'ємної концентрації пошкодження матриці композиту; $\varepsilon_{\max}$ – максимальна локальна деформація; $A = \frac{\eta}{\varepsilon_0^\eta}$, η , ε_0 , f_0 – константи.

В разі, якщо для певного скінченного елемента об'ємна концентрація пошкодження f перевищує певне критичне значення f_{cr} , вважалося, що цей елемент втрачає свою несучу здатність.

Таким чином, з мезомасштабної задачі в макромасштабну передається значення сумарної пошкодженості F :

$$F = \frac{\sum f + n_{st}}{N}, \quad (6)$$

де n_{st} – сумарна кількість елементів, що втрачають несучу здатність; N – кількість елементів розбиття мезообласті; $\sum_N$ – оператор суми по всіх скінченних елементах розбиття мезообласті.

Це кількісне значення F використовується для коригування модулів Юнга в макрозадачі згідно з наступним співвідношенням:

$$E^f = \frac{E}{1 - F}. \quad (7)$$

Крім того, зародження та розвиток докритичного пошкодження зумовлює додаткову складову тензора деформацій, а саме:

$$\varepsilon^f = \Delta F / 3, \quad (8)$$

де ΔF – приріст F на кожному кроці механічного навантаження.

Тензори механічних напружень σ_{ij} і пружних деформацій ε_{ij} пов'язані між собою узагальненим законом Гука, тобто:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E_x} \sigma_{xx} - \frac{\nu_{xy}}{E_y} \sigma_{yy} + \frac{\Delta F}{3}; \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E_y} \sigma_{yy} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} \sigma_{xx} + \frac{\Delta F}{3}; \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} \sigma_{xy}. \end{aligned} \quad (9)$$

Запропонований алгоритм включає низку констант матеріалу, що мають бути визначеними на основі результатів відповідних лабораторних випробувань. Для цього в даній роботі було використано літературні дані експериментальних досліджень граничного навантаження скловолоконних та вуглеволоконних композитів ($V_m = V_f = 0,5$ для обох випадків, матриця – епоксидна смола) з різним напрямком розташування армуючих волокон. На основі обробки цих даних було отримано константи матеріалів, а саме:

– скловолоконний композит: $\eta = 3,2$; $\varepsilon_0 = 0,01$; $f_0 = 10^{-5}$; $X_m = 35$ МПа; $X_s = 350$ МПа; $S = 18$ МПа; $f_{cr} = 0,15$; $E_m = 2$ ГПа; $E_f = 70$ МПа;
– вуглеволоконний композит: $\eta = 4,6$; $\varepsilon_0 = 0,007$; $f_0 = 10^{-5}$; $X_m = 50,2$ МПа; $X_s = 1300$ МПа; $S = 20$ МПа; $f_{cr} = 0,20$; $E_m = 2$ МПа; $E_f = 280$ ГПа.

Розрахунок було проведено на базі скінченно-елементного розв'язання мультифізичної задачі відповідно до наведеної вище постановки, для макрозадачі було використано восьмивузлові еле-

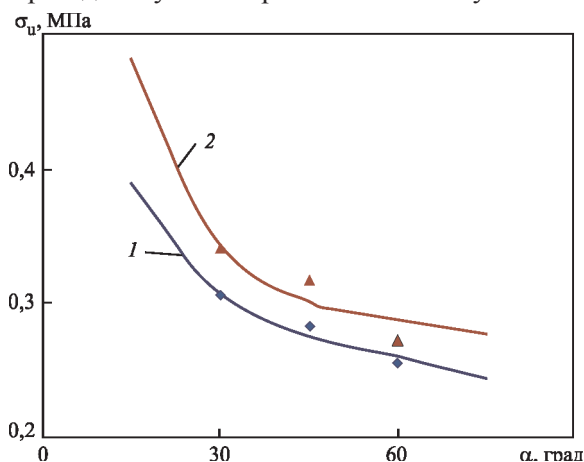


Рис. 2. Залежності напруження руйнування σ_u зразків з волоконного композиційного матеріалу від кута прикладання сили відносно напрямку волокон α у порівнянні з результатами лабораторних випробувань [11]

Примітка. Тут і на рис. 3-5: 1 – скловолоконний композит; 2 – вуглеволоконний композит

менти з лінійним розміром 0,5 мм, що достатньо деталізує просторово різномірний НДС матеріалу. Детально програмні алгоритми розв'язання наведено, зокрема, в [7].

На рис. 2 показано результати порівняння розрахункових значень граничного навантаження зразків з експериментальними [11]. З цих даних видно в цілому задовільну точність результатів прогнозування граничного стану вказаних матеріалів на основі запропонованої моделі.

Однією з переваг розробленого підходу є можливість чисельного простеження розвитку докритичного пошкодження окремих складників композита та врахування впливу характеру їх мезомасштабної взаємодії на граничний стан зразків чи великогабаритних конструкцій. Так, на рис. 3 показано кінетику накопичення докритичного пошкодження f композиційних зразків при навантаженні до граничного стану. Нелінійність розвитку об'ємної концентрації несущальності в перерізі як скло-, так і вуглеволоконного зразка викликана, з одного боку, поступовим послабленням матеріалу, з іншого, додатковим деформуванням матеріалу в результаті появи та зростання розподілених порожнин.

Важливим фактором при аналізі технічного стану композиційних конструкцій є оцінка впли-

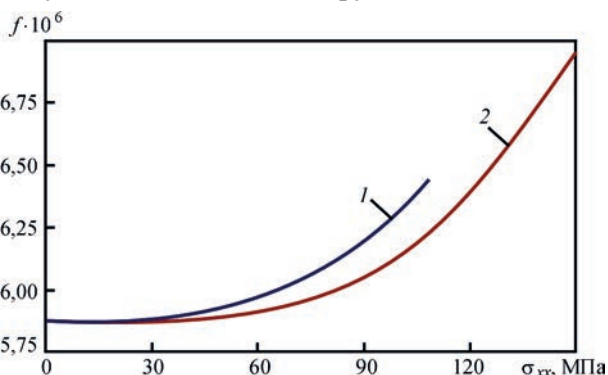


Рис. 3. Кінетика накопичення об'ємної концентрації f докритичного пошкодження композиційного зразка під дією розтягувального навантаження σ_{xx} до граничного стану

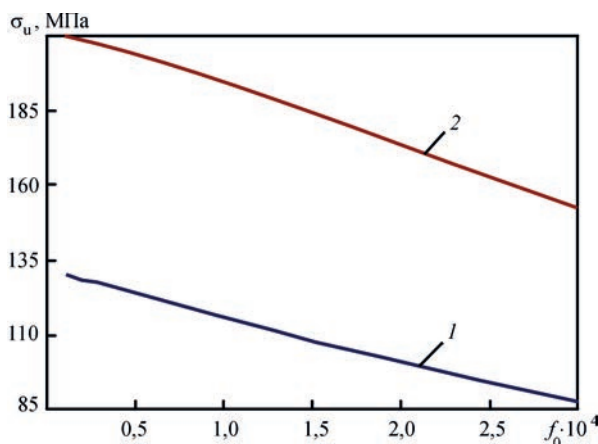


Рис. 4. Залежність граничної міцності σ_u волоконного композиційного зразка ($V_f = V_m = 0,5$, $\alpha = 45^\circ$) від початкової об'ємної концентрації докритичного пошкодження матеріалу f_0

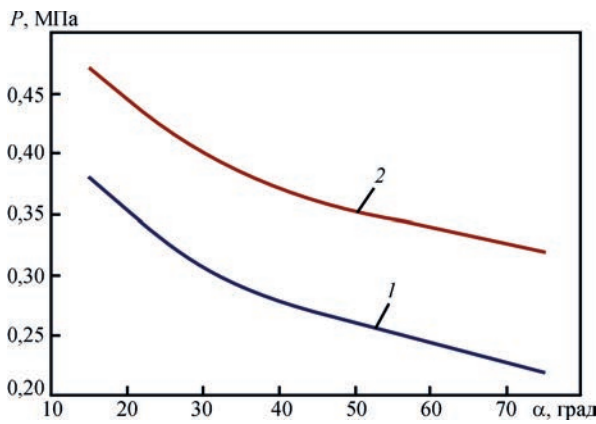


Рис. 5. Залежність граничного тиску P в циліндричній посудині (діаметр $D = 1200$ мм, товщина стінки $t = 3$ мм) з композиційного матеріалу від кута волокон α відносно вісі конструкції

ву набутої при виготовленні чи довготривалій експлуатації пошкодженості матеріалу. В рамках запропонованої методології початковий пошкоджений стан матеріалу характеризується константою f_0 з (5). На рис. 4 показано вплив конкретного значення f_0 на величину граничного навантаження зразка з композиційного матеріалу. Вона є квазілінійною, що обумовлено відносно невеликим впливом пошкодження на деформований стан на початку навантаження та пружного деформування, тому це компонент є адитивним.

Стосовно моделювання стану великогабаритних конструкцій, було розглянуто циліндричну посудину тиску діаметром $D = 1200$ мм, товщиною стінки $t = 3$ мм під дією внутрішнього тиску. Характерною особливістю при цьому є виражена двовісність напруженого стану конструкції в окружному та осьовому напрямках. Це не суттєво змінює якісний вигляд залежності граничного тиску в конструкції від кута розташування волокон відносно вісі посудини тиску (рис. 5) в порівнянні з результатами досліджень руйнування зразків при одновісному розтягненні (див. рис. 2), але змінює відповідні кількісні показники.

Висновки

1. Розроблено та програмно реалізовано методологію мультимасштабного прогнозування напружено-деформованого, пошкодженого та граничного станів конструкцій з типових волокнистих композиційних матеріалів. В основу запропонованого підходу покладено скінченно-елементну реалізацію простеження стану конструкції загалом в однорідному анізотропному наближенні (макромасштаб) та окремо кожної регулярної мезомасштабної області в неоднорідному наближенні (мезомасштаб). Порівняння результатів прогнозування граничного стану зразків зі скловолоконного та вуглеволоконного композитів із наявними літературними даними показало задовільну точність розробленого підходу.

2. Досліджено особливості докритичного руйнування волокнистого матеріалу при одновісному навантаженні стандартних зразків. Показано характерну нелінійність розвитку об'ємної концентрації несучильності в перерізі композиційного зразка, яка зумовлена поступовим послабленням та додатковим деформуванням матеріалу в результаті появи та зростання розподілених порожнин. Продemonстровано вплив початкового пошкодженого стану матеріалу на його несучу здатність як приклад застосування розробленого підходу для оцінки технічного стану конструкцій та компонентів з волоконних композитів.

3. На прикладі циліндричної посудини тиску показано особливості впливу двовісності напруженого стану на граничне навантаження конструкції, зокрема, при зміні орієнтації волокон відносно її вісі, в порівнянні з аналогічними залежностями, отриманими для стандартних випробувальних зразків.

Список літератури/References

1. Kiruthika, A.V. (2017) A review on physico-mechanical properties of bast fibre reinforced polymer composites. *Journal of Building Engineering*, **9**, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.12.003>
2. Yao, S.-S., Jin, F.-L., Rhee, K.Y. et al. (2018) Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, **142**, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.007>
3. Böer, P., Holliday, L., Kang, T.H.-K. (2013) Independent environmental effects on durability of fibre-reinforced polymer wraps in civil applications: A review. *Construction and Building Materials*, **48**, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.077>
4. Kortschot, M.T., Beaumont, P.W.R. (1990) Damage mechanics of composite materials: I – Measurements of damage and strength. *Composites Science and Technology*, **39**, 4, 289–301. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(90\)90077-I](https://doi.org/10.1016/0266-3538(90)90077-I)
5. Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. (2021) Скінченно-елементні методи оцінки технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів (Огляд). *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, **2**, 14–19. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.02>
6. Milenin, O.S., Velikoivanenko, O.A., Rozyuka, G.P., Pivtorak, N.I. (2021) Finite elements methods for assessment of the technical condition of large-sized structures from structurally heterogeneous materials (Review). *Tekhn. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **2**, 14–19 [in Russian] <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.02>
7. Bargmann, S., Klusemann, B., Markmann, J. et al. (2018) Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials: A review. *Progress in Materials Science*, **96**, 322–384. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.003>
8. Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Popov, A.V. et al. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, **55**, **1**, 117–127. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>
9. Abdel Ghafaar, M., Mazen, A.A. (2006) Application of the rule of mixtures and Halpin-Tsai equations to woven fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Engineering Sciences*, **34**, **1**, 227–236. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2006.110251>
10. Buragohain, M.K. (2017) *Micromechanics of a Lamina. Composite Structures. Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*. USA CRC Press.
11. Nyambeni, N., Mabuza, B.R. (2018) Considerations of Failure Analysis in a Multi-Layered Composite Structure

- under Thermomechanical Loading. *Proceedings*, **2**, 8, 447. <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05329>
11. Naresh, K., Shankar, K., Velmurugan, R. (2018) Reliability analysis of tensile strengths using Weibull distribution in

glass/epoxy and carbon/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, **133**, 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.002>

MULTISCALE PROCEDURE OF NUMERICAL ASSESSMENT OF DAMAGE RATE AND TECHNICAL STATE OF STRUCTURES FROM FIBROUS MATERIALS

O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko, G.P. Rozynka, N.I. Pivtorak

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

A multiscale procedure was developed for prediction of stress-strain, damaged and boundary states of structures from typical fibrous composite materials. The methodology is based on a combination of macroscale models for describing the state of structurally inhomogeneous brittle materials and mesoscale approaches of continuous modeling of damage development under the impact of external loading. The features of the impact of external loading on material damage level and boundary state of structures were studied in the case of large-sized cylindrical pressure vessels from glass and carbon fibre-reinforced composites. Ref. 11, Fig. 5.

Keywords: composite materials, damage rate, boundary state, mathematical modeling, multiscale procedure

Надійшла до редакції 13.09.2021

Данина пам'яті

4 жовтня 2021 р. у Києві на фасаді Головного корпусу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України встановлено оновлену меморіальну дошку видатному інженеру, вченому в галузі мостобудування та електрозварювання, академіку, віце-президенту Академії наук УРСР, заслуженому діячеві науки УРСР, педагогу, організатору науки та виробництва, громадському діячеві – Євгену Оskarовичу Патону.

Є.О. Патон був фундатором нового наукового напрямку – електрозварювання і ініціатором широкого впровадження його у зварювальне виробництво. За його ініціативи 1 січня 1934 р. засновано перший в світі спеціалізований науковий зварювальний центр – Інститут електрозварювання, директором якого він був до кінця життя – 12 серпня 1953 р.

Ідею Є.О. Патона щодо «зустрічі електрозварювання з мостобудуванням», вдало відобразив автор меморіальної дошки – відомий скульптор С.С. Беляєв, який багато років співпрацює з Інститутом електрозварювання. На меморіальній дошці погляд видатного мостобудівника, всесвітньо відомого вченого в галузі електрозварювання, академіка Є.О. Патона спрямований на своє унікальне творіння – перший в Європі суцільнозварний міст через Дніпро. Обличчя Євгена Оskarовича передає його внутрішню сутність – мудрість, цілеспрямованість та оптимістичний погляд у майбутнє.

Діяльність Євгена Оskarовича Патона – вченого і талановитого інженера, організатора науки і виробництва, назавжди залишиться в історії світової науки і техніки.

Редакція журналу



LASER-EXCITED ACOUSTICS FOR CONTACT-FREE INSPECTION OF AEROSPACE COMPOSITES АКУСТИКА З ЛАЗЕРНИМ ЗБУДЖУВАННЯМ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЮ АЕРОКОСМІЧНИХ КОМПОЗИТИВ

by Matthias Brauns, Fabian Lücking, Balthasar Fischer, Clint Thomson, and Igor Ivakhnenko

Ultrasonic testing (UT) is widely used for the nondestructive testing (NDT) of composite materials in the aerospace industry. Liquid-coupled piezoelectric ultrasonic transducers are the most common technology used in this field; however, liquid coupling agents are not always practical, economical, or compatible with materials that cannot get wet. Alternative couplant-free technologies such as air-coupled ultrasound or laser ultrasound (LUS) are available, but either lack the required sensitivity and resolution, or are very costly, large, and sensitive to surface condition and properties. In this paper, we introduce a new couplant-free approach using laser excitation and a commercially available optical microphone. This technique is termed laser-excited acoustics (LEA) NDT, which combines the advantages of a contact-free ultrasound technology with the potential for improved sensitivity and resolution required for NDT in industrial environments. We will demonstrate the capabilities of LEA on aerospace composite parts made of carbon and glass fiber-reinforced polymer (CFRP/GFRP) under realistic conditions.

Ультразвуковий контроль (UT) широко використовується для неруйнівного контролю (NDT) композитних матеріалів в аерокосмічній промисловості. Пієзоелектричні ультразвукові перетворювачі з рідинним зв'язком є найбільш розповсюдженою технологією, що використовується в цій області. Проте рідкі зв'язуючі не завжди практичні, економічні або сумісні з матеріалами, яким не можна намокати. Доступні альтернативні технології без зв'язуючої речовини, такі, як ультразвуковий контроль з повітряним зв'язком або лазерний ультразвук (LUS), але вони або не мають необхідну чутливість і роздільну здатність, або є дуже дорогими, завеликими та чутливими до стану та властивостей поверхні. В цій статті ми надаємо новий підхід без зв'язуючої речовини з використанням лазерного збуджування та оптичного мікрофона, що є у продажу. Цей метод називають неруйнівним контролем з використанням акустики з лазерним збуджуванням (LEA), який поєднує в собі переваги безконтактної ультразвукової технології з можливістю підвищення чутливості та роздільної здатності, що необхідні для неруйнівного контролю в промислових умовах. Ми продемонстрували можливості LEA на аерокосмічних композитних деталях з вуглецевого та армованого скловолокном полімеру (CFRP/GFRP) в реальних умовах.

Before we discuss the working principle of LEA, we will briefly review the basis of conventional ultrasonic NDT. In general, a pulser or emitter generates an ultrasound wave that travels through the sample and interacts with the features and interfaces of the material. After passing through the material, a receiver detects the transmitted or reflected ultrasound waves. The differences in the various techniques lie in how the ultrasound is generated and detected and in the arrangement of the sender and receiver.

Ultrasonic Testing with Piezoelectric Transducers.

In conventional liquid-coupled ultrasound, piezoelectric transducers are widely used as emitters and receivers with a liquid coupling agent, such as water, between the transducer and the sample as shown in Figure 1b. The liquid facilitates the transfer of the ultrasonic wave energy. In cases where liquid cannot be used, the alternative has traditionally been air-coupled ultrasound. However, due to the large acoustic impedance mismatch between solids and air, even a small air gap between the transducers and sample strongly attenuates the transferred wave at each solid-to-air interface, and only a very weak signal arrives at the receiver, as shown in Figure 1a. This significantly limits the sensitivity of air-coupled ultrasound (Gaal et al. 2019). In some cases, the del-

eterious effects of poor impedance matching with air-coupled ultrasound can be lessened by resonant transducer designs, but these transducers are often very narrowband. In addition to impedance mismatch issues, the use of air-coupled ultrasound transducers for single-sided pulse-echo measurements is severely limited due to poor temporal performance and resonant ringing. This creates a front-wall “blind zone” where discontinuities close to the surface cannot be detected. Therefore, liquid-coupled ultrasound is preferred in the vast majority of industrial applications, even though this can introduce additional costs to automated scanning systems in the form of water squirters and immersion baths, and can present additional challenges regarding the testing of materials that are sensitive to liquids such as water (Vanderheiden et al. 2018). In order to achieve the same sensitivity with a contact-free ultrasonic NDT technology, it is crucial to reduce the number of solid-air interfaces for the ultrasound wave between the emitter, sample, and receiver.

In practical applications, measurement sensitivity for both liquid-coupled and air-coupled ultrasound is not the only performance-limiting factor. For automated robotic scanning systems, data quality also strongly depends on robustness against mis-

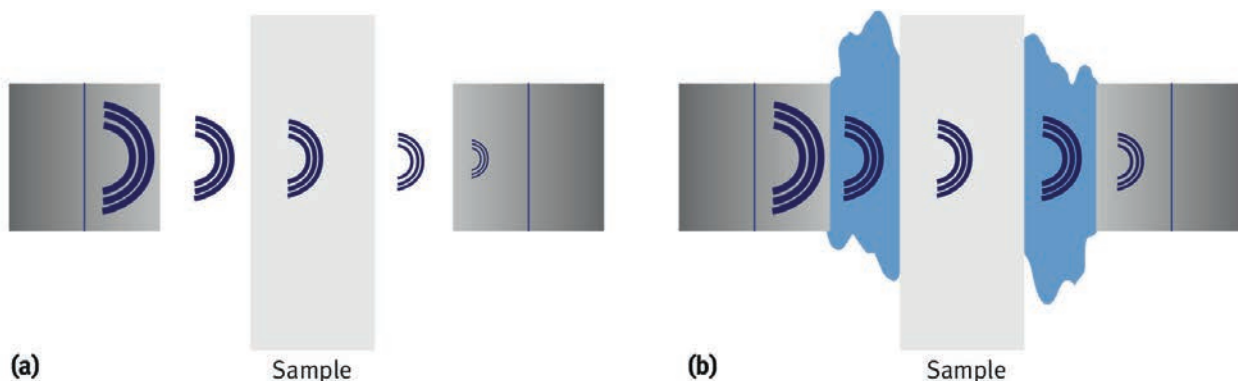


Figure 1. Schematic depiction of the attenuation of the ultrasound wave on its way from the emitter to the receiver: (a) air-coupled UT; (b) liquid-coupled UT.

Рис 1. Схематичне зображення загасання ультразвукової хвилі на шляху від випромінювача до приймача: (а) УЗК (UT) з повітряним зв'язком; (б) УЗК (UT) з рідинним зв'язком

alignments (angle and standoff) between sensor and sample. Both air- and liquid-coupled ultrasound are sensitive to angular misalignment with respect to the surface, leading to signal degradation even for misalignments of only a few degrees. While this is less relevant for simple flat sample geometries, sensitivity to misalignment becomes increasingly relevant for the ever-growing share of composite parts possessing large complex geometries of varying thickness that exhibit part-to-part variations. Here, significant costs can accrue in the form of precision robotics and tooling as well as sophisticated laser surface mapping and motion-control software.

Laser Ultrasound as a Contact-Free Alternative Some problems associated with air-coupled ultrasound, such as impedance mismatch and temporal ringing, can be solved by LUS (Scrubby and Drain 1990). Here, the ultrasound is both excited and detected by a laser. The excitation laser emits a short laser pulse onto the surface of the sample, where it is absorbed. The material locally heats up and expands on a timescale far below that of the thermal conductivity rate, which sends a broadband ultrasonic wave through the material. The ultrasound is generated directly inside the sample near the surface, which eliminates two of the four solid-air interfaces that would otherwise attenuate the signal. The laser-generated ultrasound waveform is very different from those emitted by piezoelectric transducers: since the laser pulse is very short (on the order of 10 ns), the excited ultrasound consists of a single, impulse-like peak. Historically, commercially available LUS systems have used powerful and expensive carbon dioxide lasers with complex laser-beam optical delivery systems to the scanning head. This makes them very difficult and costly to integrate into robotic scanning systems because optical fiber coupling is not possible at the operating wavelength of around 10 μm (Cuevas Aguado et al. 2015). More recently, experimental work has shown that laser excitation is also possible with solid-state fiber-coupled lasers at visible and near-infra-

red operating wavelengths (532 to 1064 nm), which allow for much smaller probe heads (Vandenrijt et al. 2018).

In traditional LUS, a second laser beam is directed at the sample surface for ultrasound detection. Part of the laser light is reflected back from the surface into the detector head, where the signal (the surface vibration of the sample due to the ultrasound wave) is measured by means of interferometry. This often re-

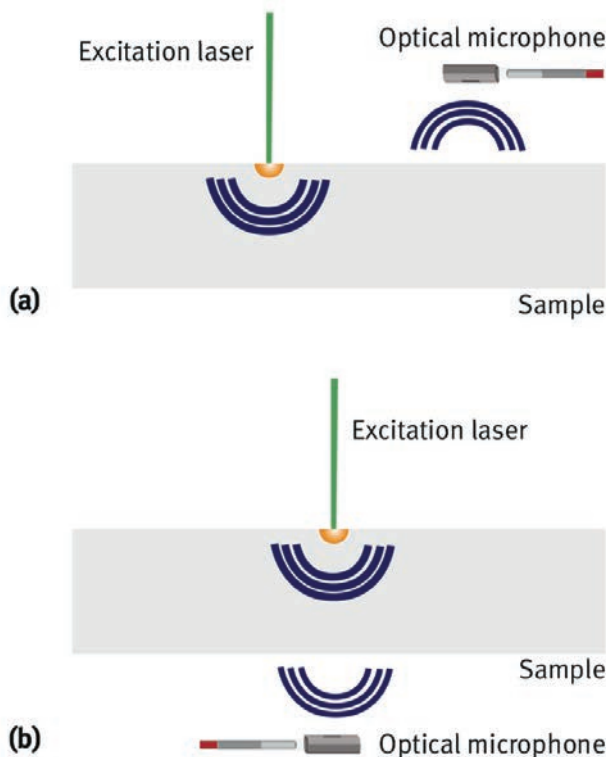


Figure 2. Laser-excited acoustics (LEA) setup with excitation laser and optical microphone: (a) on the same side of the sample (single-sided pitch-catch); (b) on opposite sides of the sample (through-transmission).

Рис. 2. Акустична установка з лазерним збуджуванням (LEA) зі збуджуючим лазером і оптичним мікрофоном: (а) на одній і тій же стороні зразка (одностороннє випромінювання-приймання); (б) на протилежних сторонах зразка (наскрізне пропущання)

quires complex optics as well as high-intensity laser light illuminating the surface to achieve an acceptable signal-to-noise ratio (SNR). Measuring the ultrasound directly on the sample surface enables a very large bandwidth up to 100 MHz. However, LUS can be sensitive to surface materials and condition (such as coatings, roughness, and reflectivity) and sometimes to standoff distance. Together with the high costs, these features have prevented the wider use of LUS in industry as a contact-free alternative to traditional ultrasonics over the past 40 years.

In summary, air-coupled ultrasound is limited in sensitivity and frequency bandwidth, and exhibits a blind zone for single-sided pulse-echo measurements. Liquid-coupled ultrasound needs an immersion fluid, which can add cost, and is not compatible with all materials. Finally, conventional LUS is a contact-free alternative with large bandwidth and high sensitivity, but presents high costs, is sensitive to surface conditions, and requires complex optics, making it impractical for most industrial applications.

Laser-Excited Acoustics: The Best of Both Worlds.

Here, we introduce our novel LEA technology approach, which solves many of the issues associated with the conventional techniques discussed in the previous section. In LEA, the setup is as follows: an excitation laser serves as the pulser and generates the ultrasound signal, while an optical microphone acts as the receiver (Fischer 2016; Fischer et al. 2019). LEA can operate in both standard arrangements for ultrasonic NDT: through-transmission testing with excitation laser and optical microphone on opposite sides of the sample and single-sided testing, where both sender and receiver are on the same side of the sample in a pitch-catch configuration, as illustrated in Figures 2a and 2b.

In contrast to most commercial systems available for conventional LUS, in LEA the visible or near-infrared excitation laser is fiber coupled, which enables a very compact sensor-head design for both single-sided pitch-catch and through-transmission setups.

Upon laser excitation, the ultrasound wave travels through the material, where it scatters off of the structural features. The ultrasound then propagates from the sample into the air, where the optical microphone (Figure 3a) detects the signal.

The detection principle of the optical microphone, as shown in Figure 3b, is based on laser interferometry. Inside the sensor head, measuring only a few millimeters, there is a small air cavity formed by two semitransparent mirrors. From a glass fiber, a laser beam couples through one of the mirrors into the cavity, where it is reflected back and forth. The length of the cavity can host a multiple of the laser's wavelength, so that the laser light constructive-

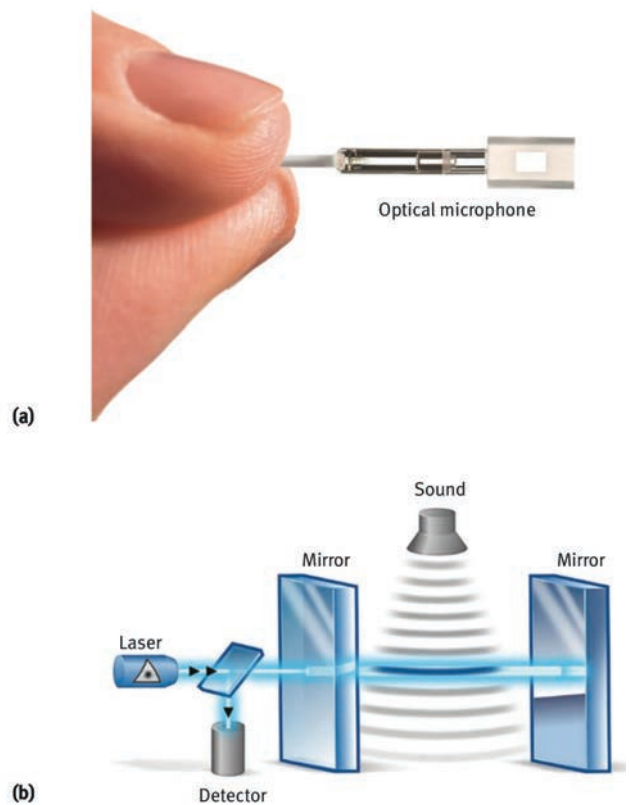


Figure 3. The optical microphone: (a) compact sensor head; (b) working principle.

Рис. 3. Оптичний мікрофон: (а) компактна сенсорна головка; (б) принцип роботи

ly interferes. The light partly couples back into the glass fiber, and a photodetector converts its brightness into a voltage signal that is easily measurable. Sound and ultrasound alter the refractive index of the air, which affects the laser's wavelength in the cavity. This in turn changes the amount of light coupling back into the fiber, so that the photodiode detects a change in brightness. The output voltage of the photodiode therefore linearly changes over a wide range of acoustic pressures and over a frequency range extending from 10 Hz all the way up to 2 MHz. Over this large bandwidth, the frequency response is flat due to the detection principle, which does not involve any mechanical movement. In many instances, this reduces the effective blind zone associated with piezoelectric transducers.

Within the sensor head, the ultrasound pressure is measured directly in the air using laser detection; the ultrasound does not need to couple into a solid like it does for a piezoelectric receiver. From the four solid-air interfaces shown for air-coupled ultrasound in Figure 1a, only one interface (from the sample to air) remains. This greatly enhances the SNR associated with the measurement setup. At the same time, the ultrasound detection process is not affected by the optical quality of the sample surface (such as roughness), which enables its application for a wide

range of materials and geometries where previously contact-free LUS techniques could not be employed. Furthermore, both the excitation laser and the optical microphone are still operational even with an off-normal misalignment of $\pm 5^\circ$. These features, combined with the compactness of the all-fiber-coupled probe head (measuring approximately $35 \times 17 \times 50 \text{ mm}^3$), make LEA a viable contact-free alternative for NDT of parts with complex geometries and composition.

LEA of Sandwich Structures: Experimental Setup.

To assess the capabilities of LEA, measurements were performed on two honeycomb-core sandwich

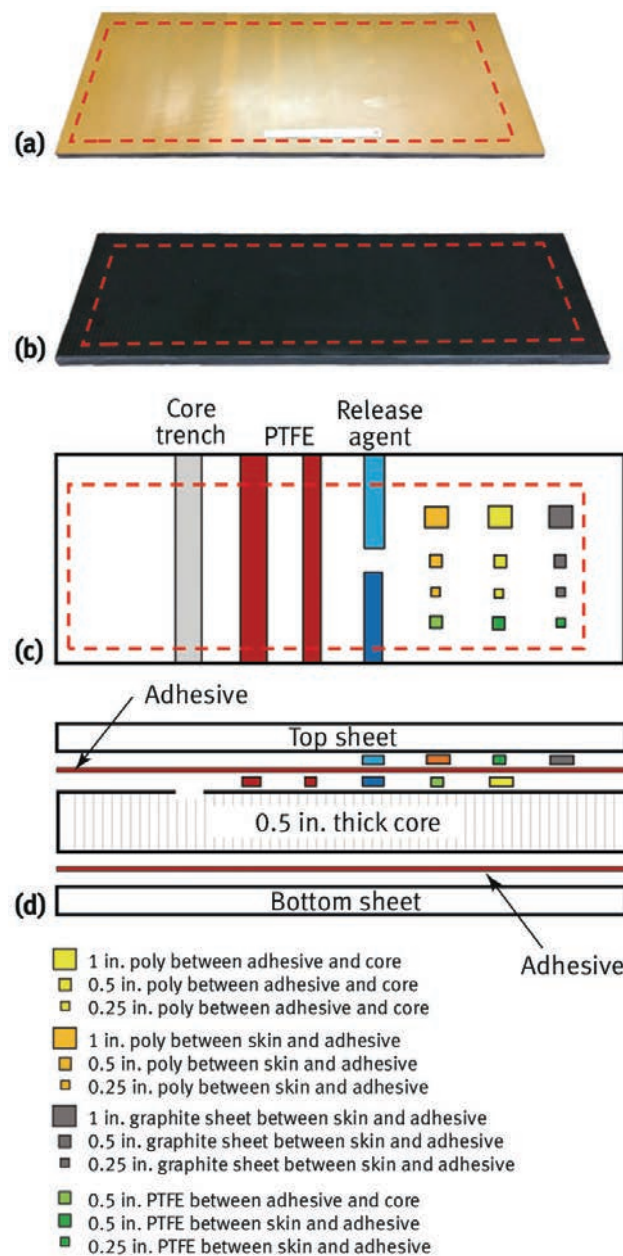


Figure 4. The experimental samples: (a) GFRP; (b) CFRP; (c) top-view map of reference defects; (d) side-view map of reference defects. The scanned area on each sample is marked by red dashed lines. Рис. 4. Експериментальні зразки: (а) склопластик; (б) вуглепластик; (с) мапа еталонних дефектів, вид зверху; (д) мапа еталонних дефектів, вид збоку. Відскановану область на кожному зразку позначено червоними пунктирними лініями

panels that are representative of structural materials widely used in aerospace applications. These panels consisted of a GFRP skinned panel and a CFRP skinned panel shown in Figures 4a and 4b. Both panels measured approximately 620 mm long $\times$ 230 mm wide $\times$ 13 mm thick and include various reference defects manufactured from polytetrafluoroethylene (PTFE) tape, graphite sheet, polyethylene backing material ("poly"), 1.3 mm deep core trenches, and release agent treated areas of various sizes (see the defect map in Figure 4c). While these reference defects were artificially placed in the sample structure, they realistically mimic various disbonds and foreign object debris that can occur at different stages of the composite production process. The standard NDT method used in industry for such parts is water-coupled through-transmission UT operating at a frequency of 0.5 to 1 MHz.

The experimental setup shown in Figure 5 was used to perform contact-free, through-transmission LEA ultrasound measurements on the samples. The excitation laser and the optical microphone were

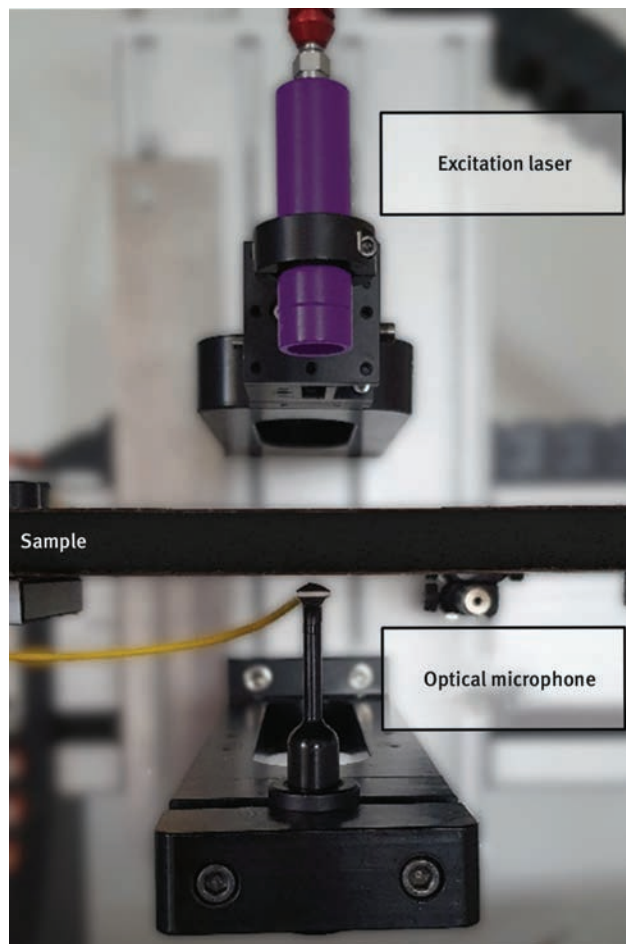


Figure 5. Measurement setup for the through-transmission measurements. The fiber-coupled excitation laser (purple) and the optical microphone were mounted on an X-Y scanning table. The sample stays in a fixed position between the laser and microphone. Рис. 5. Вимірювальна установка для вимірювань при наскрізному пропусканні. Лазер збуджування з волоконним зв'язком і оптичний мікрофон було встановлено на сканувальному столі по X-Y. Зразок залишається в фіксованому положенні між лазером і мікрофоном

mounted to the probe fixture of an automated X-Y scanning table. With the sample fixed in position, we scanned the probe head across the sample area indicated by the red dashed lines in Figure 4. We set the step size to 0.5 mm in both the X- and Y-direction, far below the size of any defined defect and smaller than the honeycomb pitch of 3 mm. This ensured the scan resolution was limited by the resolution of the LEA setup itself, not by the scanning step size.

However, the scan step size can be deliberately set to other values such as 1 mm or 2 mm. For the laser excitation, we used a fiber-coupled pulsed laser with a wavelength of 532 nm. Every laser pulse corresponded to one measurement point on the sample with no waveform signal averaging. Hence, the pulse repetition rate, together with the step size, defined the scan speed. Different fiber-coupled excitation laser configurations were tested, with pulse repetition rates between 20 and 10 000 Hz. Using a 10 kHz laser setup, robotic scanning speeds of 1 to 2 m/s are achievable, on par with state-of-the-art liquid-coupled ultrasound scanner setups, and faster by approximately a factor of 10 when compared to air-coupled ultrasound setups. Furthermore, the optical microphone was tested in an eight-channel array configuration with a 2 mm pitch. In the array setup, the excitation laser beam profile is shaped to a line profile using a cylindrical lens, so that one laser excitation shot delivers eight autonomous detector signals simultaneously (see Figure 6). This allows for an additional eight-fold increase in scan speed.

For the single-element receiver setup, the software controlling the scanner triggered the excitation laser pulse, and the ultrasound pressure amplitude was recorded using a sampling rate of 25 MHz. The resulting A-scan was saved for each measurement point. After the measurement, we determined the waveform peak maximum for each A-scan over a gated time window synchronized with the arrival of the initial signal. This maximum amplitude is plotted in the C-scans shown in Figures 7a and 7b, a 2D ultrasonic picture of the sample.

Results and Discussion

The C-scans of both samples reveal a number of different subsurface features not visible to the naked eye on the optically smooth sample. We observed well-defined areas of different sizes with a significantly attenuated signal amplitude, which we identified as the reference defects. While most defects were easily distinguishable, this was not true for the release agent and poly defects (blue, orange, and yellow in the Figure 4 defect map) in both samples. Interestingly, the only such defect visible at all was the smallest poly defect (marked by the white arrow in Figure 7a). The position of the invisible defects correlates with the large oval region of decreased signal amplitude extending over the right half of each sample, which is not referenced in the defect map. Here, the top sheets were unintentionally unbonded from

the honeycomb core, perhaps due to the accidental spread of the release agent. Since these large unbonded areas coincided with the defect position between



Figure 6. Eight-channel array detector head. If combined with an excitation laser with a line-shaped beam profile, it increases the scanning speed by a factor of 8.

Рис. 6. Восьмиканальна матрична детекторна головка. В поєднанні зі збуджувальним лазером з лінійним профілем променя, він збільшує швидкість сканування у 8 разів

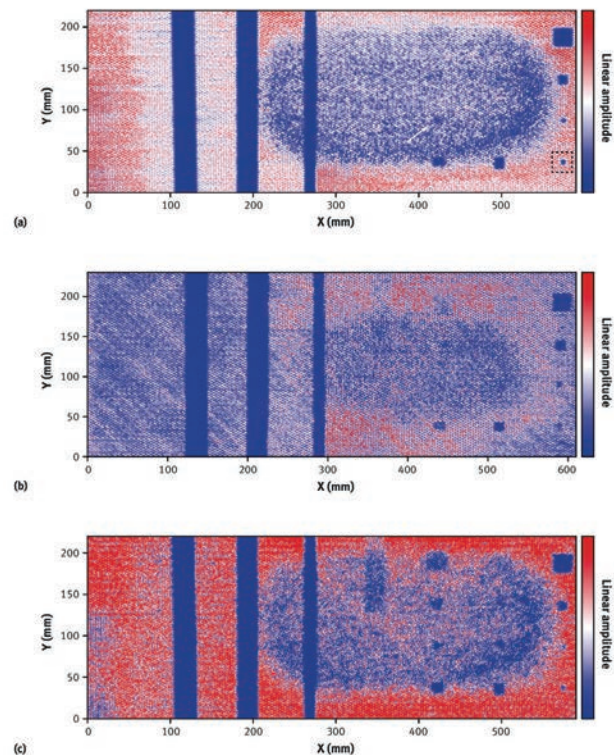


Figure 7. Ultrasonic C-scan images: (a) the GFRP sample shown in Figure 4a; (b) the CFRP sample shown in Figure 4b; (c) the same GFRP measurement data as in Figure 7a, but with a 1150 to 1200 kHz bandpass filter applied to each A-scan.

Рис. 7. Ультразвукові зображення від С-скану: (а) зразок склопластику, зображений на рис. 4а; (б) зразок вуглепластику, зображений на рис. 4б; (с) ті ж дані вимірювань в склопластику, що і на рис. 7а, але зі смуговим фільтром від 1150 до 1200 кГц, застосованим до кожного А-скану

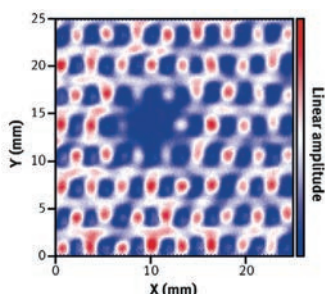


Figure 8. An enlargement of the area around the smallest reference defect shown in Figure 7a. The regular hexagonal pattern shows the internal honeycomb structure of the sample. The larger dark blue area is caused by the 6 mm inlay that was placed there as a reference defect.

Рис. 8. Збільшення області навколо найменшого еталонного дефекту, зображеного на рис. 7а. Правильний шестигрунтний візерунок вказує на внутрішню стільникову структуру зразка. Велика темна область з'явилась з-за 6-мм вкладишу, який помістили туди в якості еталонного дефекту

the top sheet and core, they masked the underlying defects in the C-scans.

For Figures 7a and 7b, a standard unfiltered data analysis was performed. However, since we have the whole frequency range from 50 kHz up to 2 MHz at our disposal, we can also analyze the data with more advanced frequency postprocessing methods, which are not possible with narrowband, air-coupled transducers. After applying a 1.15 to 1.20 MHz bandpass filter to every A-scan in Figure 7a for the GFRP panel, we again determined the peak amplitude at each position and plotted the results in the C-scan shown in Figure 7c. After applying the bandpass filter, we recognized the same reference defects that are visible in Figure 7a, but additionally, the release agent and poly defects, not apparent in Figure 7a, became visible as well. This demonstrates a strong advantage of the large bandwidth of LEA in comparison to piezoelectric-based ultrasound. Even though these defects are strongly obscured by another sample feature (the large disbond), the reference defects become visible by simple postprocessing of the existing data without the need for time-consuming and costly additional measurements at different transducer frequencies.

In order to demonstrate the measurement resolution of LEA, we zoomed in on one of the smallest defects present in the sample, a 0.25×0.25 in. (6.35×6.35 mm) PTFE insert between the GFRP top sheet and the adhesive film, as indicated by the dashed-line square in Figure 7a. Here, we performed a high-resolution scan with a step size of 0.2 mm, which is depicted in Figure 8. In addition to the clearly visible defect, we also observed the honeycomb structure as a very regular hexagonal pattern.

Again, we applied a bandpass filter to the data used in Figure 8 as shown in the C-scans in Figure 9. This allowed us to selectively investigate different aspects of the sample structure as well as different ultrasonic wave propagation modes through the sample structure.

Although ultrasonic modeling is required to fully explain the C-scan data shown in Figure 9, we spec-

ulate the following. For frequencies between 200 and 250 kHz, the transmitted signal was dominated by guided wave modes propagating through the honeycomb cell walls (Figure 9a). The signal amplitude and C-scan color scheme inverts for frequencies between 400 and 450 kHz, where the ultrasound passed almost exclusively through the air columns in the holes of the honeycomb structure (Figure 9b).

In Figure 9c, a bandpass filter between 750 and 800 kHz was applied. Here, both the honeycomb walls and the air columns exhibited high signal transmission, which leads to a more uniform C-scan with low contrast between the honeycomb wall and air columns. The only region with a significantly lower signal amplitude is the PTFE reference defect. This filtering scheme provides a clearer contrast between the defect and the rest of the honeycomb structure.

On the other hand, for the unfiltered data plotted in Figure 9d, there is less contrast between the defect and the cavities of the honeycomb structure; both exhibited the same dampened signal amplitude.

These examples demonstrate that the postprocessing of the LEA broadband data provides enhanced opportunities to selectively inspect the honeycomb walls, cell cavities, and any structural discontinuities. With conventional liquid-coupled or air-coupled ultrasound, this type of expanded analysis would not be possible without performing multiple measurements at different frequencies.

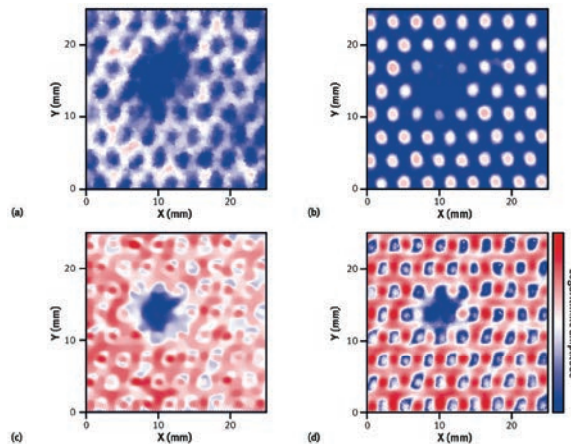


Figure 9. The measurement data from Figure 8 with a bandpass frequency filter applied with cutoff frequencies of: (a) 200 to 250 kHz, where the walls of the honeycomb core contribute the most to the signal; (b) 400 to 450 kHz, where the air columns in the honeycomb structure are revealed; (c) 750 to 800 kHz, where both features contribute to the signal, making the honeycomb structure less visible and highlighting the defect instead; and (d) the unfiltered data with the same logarithmic color scale used in Figures 9a through 9c. The signal amplitudes in each plot are normalized for clarity.

Рис. 9. Дані вимірювань з рис. 8 зі смуговим частотним фільтром, застосованим з частотами зрізу: (а) від 200 до 250 кГц, де стінки стільникового сердечника вносять найбільший вклад в сигнал; (б) від 400 до 450 кГц, де видно повітряні стовпи в стільниковій структурі; (с) від 750 до 800 кГц, де обидва елементи дають внесок в сигнал, роблячи стільникову структуру менш помітною і замість цього виділяючи дефект; (д) нефільтровані дані з тією ж самою логарифмічною шкалою, яка використовується на рис. 9а-с. Амплітуди сигналів на кожному графіку нормалізовано для наочності

Conclusion

In conclusion, LEA is a novel ultrasonic inspection technology that combines the advantages of standard liquid-coupled UT and contact-free inspection techniques. This is demonstrated by measurements of the CFRP and GFRP honeycomb sandwich panels used in our experiments, where high-resolution data were obtained using LEA as a fast, non-contact ultrasound scanning technique. These results show advantages in both resolution and sensitivity compared to state-of-the-art liquid-coupled and air-coupled ultrasound on structures such as honeycomb core sandwich materials (Thomson et al. 2015). Furthermore, the broadband ultrasound emission and detection achieved by the laser excitation and optical microphone setup allows for expanded frequency postprocessing, enabling the operator to inspect different aspects of the sample from a single measurement data set. This improves inspection reliability by increasing the likelihood for finding discontinuities that would otherwise be obscured using more narrowband piezoelectric-based ultrasonic technology. Apart from the technological advantage of an improved inspection, LEA also reduces overhead costs by rendering water management and disposal unnecessary.

The combination of these properties makes LEA a compact and affordable couplant-free alternative to traditional liquid-coupled and air-coupled ultrasound for NDT of a variety of aerospace composite materials.

AUTHORS

Matthias Brauns: XARION Laser Acoustics GmbH, Ghegastraße 3, 1030 Vienna, Austria; m.brauns@xarion.com

Fabian Lücking: XARION Laser Acoustics GmbH, Ghegastraße 3, 1030 Vienna, Austria

Balthasar Fischer: XARION Laser Acoustics GmbH, Ghegastraße 3, 1030 Vienna, Austria

Clint Thomson: Northrop Grumman Corp., Aeronautics Systems Sector, Aerospace Structures Business Unit, Inspection Development Group,

UT02-YC14, PO Box 160433, Clearfield, Utah, 84016-0433, USA

Igor Ivakhnenko: Northrop Grumman Corp., Aeronautics Systems Sector, Aerospace Structures Business Unit, Inspection Development Group, UT02-YC14, PO Box 160433, Clearfield, Utah, 84016-0433, USA

REFERENCES

1. Cuevas Aguado, E., C. Galleguillos, C. García Ramos, and F. Lasagni, 2015, "Laser Ultrasonics Inspections of Aeronautical Components Validated by Computed Tomography," *7th International Symposium on NDT in Aerospace*, 16–18 November, Bremen, Germany.
2. Fischer, B., 2016, "Optical Microphone Hears Ultrasound," *Nature Photonics*, Vol. 10, pp. 356–358, <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.95>.
3. Fischer, B., F. Sarasini, J. Tirillo, F. Touchard, L. Chocinski-Arnault, D. Mellier, N. Panzer, R. Sommerhuber, P. Russo, I. Papa, V. Lopresto, and R. Ecalt, 2019, "Impact Damage Assessment in Biocomposites by Micro-CT and Innovative Air-Coupled Detection of Laser-Generated Ultrasound," *Composite Structures*, Vol. 210, pp. 922–931, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.013>.
4. Gaal, M., D. Kotschate, and K. Bente, 2019, "Advances in Air-Coupled Ultrasonic Transducers for Non-Destructive Testing," *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Vol. 38, No. 1, <https://doi.org/10.1121/2.0001072>.
5. Scruby, C.B., and L.E. Drain, 1990, *Laser Ultrasonics Techniques and Applications*, CRC Press.
6. Thomson, C.D., I. Cox, M.T.A. Ghasr, K.P. Ying, and R. Zoughi, 2015, "Ultrasonic, Microwave, and Millimeter Wave Inspection Techniques for Adhesively Bonded Stacked Open Honeycomb Core Composites," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1650, <https://doi.org/10.1063/1.4914738>.
7. Vanderheiden, B., C. Thomson, I. Ivakhnenko, and C. Garner, 2018, "Transition to High Rate Aerospace NDI Processes," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1949, No. 1, <https://doi.org/10.1063/1.5031500>.
8. Vandenrijt, J.-F., F. Languy, C. Thizy, and M. Georges, 2018, "Laser Ultrasound Flexible System for Non-contact Inspection of Medium Size and Complex Shaped Composite Structures Made of Carbon Fiber Reinforced Polymer," *Proceedings of the 18th International Conference on Experimental Mechanics*, Vol. 2, No. 8, <https://doi.org/10.3390>

Permission to Reprint, 04.10.2021:

The American Society for Nondestructive Testing, Inc.

CITATION

Materials Evaluation 79 (1): 28–37

<https://doi.org/10.32548/2021.me-04188>

©2021 American Society for Nondestructive Testing

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031

Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/trwj
Передплатний індекс 21791



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/tdnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АЕ МОНІТОРИНГУ НА ОПЗ

С.В. Журавльов¹, Б.М. Ободовський¹, М.А. Яременко², А.Я. Недосека², С.А. Недосека², М.А. Овсієнко²

¹АТ «Одеський припортовий завод». 65481, Одеська обл., м. Южне, вул. Заводська, 3. E-mail: office@opz.odessa.ua

²ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Наведено результати застосування методу АЕ на прикладі моніторингу та контролю сховищ аміаку в цеху перевантаження аміаку, окремих ліній та агрегатів у цеху виробництва аміаку, а також об'єктів станції розподілу повітря цеху водообробки. Показано, що результати АЕ моніторингу можуть бути використані при якісній оцінці стану теплоізоляційного покриття. Наведено схеми встановлення датчиків АЕ на об'єктах АЕ моніторингу та конфігурації локаційних антен. Вибірково наведено результати АЕ моніторингу об'єктів за поточний рік. Бібліогр. 8, табл. 6, рис. 11.

Ключові слова: акустична емісія, моніторинг, локаційні антени

АТ «Одеський припортовий завод» (ОПЗ) – державне підприємство хімічної галузі України – входить до переліку підприємств, що мають стратегічне значення для економіки та безпеки нашої країни. Основним призначенням підприємства є виробництво та перевантаження аміаку, карбаміду, двоокису вуглецю та рідкого кисню.

Продукція заводу має попит на внутрішньому ринку, але її основна частина експортується в більш ніж у 30 країн світу.

Важливим питанням є забезпечення ритмічної роботи підприємства, виконання в строки контрактів і договорів постачання продукції споживачу в умовах конкурентного ринку, забезпечення безпечної експлуатації високотехнологічного обладнання та оцінки стану матеріалу конструкцій із застосуванням сучасних систем моніторингу.

Системи інтегрального моніторингу технічного стану небезпечних виробничих об'єктів з застосуванням методу акустичної емісії (АЕ) активно використовуються для відслідковування структурної цілісності матеріалу різних технічних конструкцій та споруд у хімії, нафтопереробці, атомній та тепловій енергетиці, а також інших галузях народного господарства [1–3].

Мета їх застосування – забезпечення безпечної експлуатації обладнання, своєчасне реагування на зміни його поточного стану, своєчасні зупинки, оптимізація технічного обслуговування та ремонту обладнання за його фактичним станом.

Основне оперативне завдання АЕ моніторингу (постійного та/або періодичного) – виявлення зародження та розвитку на ранніх стадіях дефектів, що можуть привести металоконструкцію до руйнування або роботи в нештатному режимі.

Системи періодичного контролю та моніторингу, а також адаптовані під конкретні завдання методики та алгоритми автоматизованої якісної та кількісної оцінки та прийняття рішення щодо ста-

ну об'єктів контролю активно застосовуються в цехах виробництва аміаку та його перевантаження (зберігання) [4].

Застосування методу АЕ і його результати наведено на прикладі моніторингу та контролю сховищ аміаку ST-1...ST-4 у цеху перевантаження аміаку (ЦПА), окремих ліній та агрегатів у цеху виробництва аміаку (ЦВирА, відділення 1 і 2), а також об'єктів станції розділення повітря цеху водообробки (азотна колона, киснева колона, головний конденсатор).

Тривалий час проведення моніторингу сховищ рідкого аміаку, значна кількість накопиченої інформації дозволяють детально проаналізувати не тільки стан матеріалу сховища (сталі ASTM-A537.S1; A537.A), технологічні особливості його роботи, але й якісно порівняти, наприклад, стан теплоізоляційного покриття.

Після визначення кластерів АЕ сигналів, виконання додаткових термографічних досліджень і аналізу їх результатів встановлено відповідність координат кластерів АЕ і ділянок стінок сховищ з температурою, яка відрізняється від середніх значень, що взяті з усієї площі поверхні обичайки сховищ.

Наведемо кілька знімків результатів термографічного контролю для аміакосховища ST-4 (рис. 1–3) та їх стислий опис.

На рисунках чітко видно вертикальні сліди з більш низькою температурою від можливих патьоків. Такі ділянки є на різних рівнях і співпадають з місцями стиків листів ізоляції. Також видно переривчасті горизонтальні лінії зі зниженою температурою, що відповідають горизонтальним швам термоізоляції сховища. Ці дані співпадають з ділянками підвищеної АЕ активності.

Дані термографічних досліджень та результати АЕ моніторингу показують наявність проблем з температурним станом та ізоляцією корпусу аміакосховища ST-4. Аналогічні результати отримані

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

© С.В. Журавльов, Б.М. Ободовський, М.А. Яременко, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Овсієнко, 2021

і для аміакосховища ST-2. Дані надані фахівцями лабораторії неруйнівного контролю та технічної діагностики ОПЗ.

Таким чином, детально проаналізувавши та зіставивши результати АЕ моніторингу і теплоконтролю, можна говорити про те, що АЕ моніторинг може слугувати додатковим фактором при якісній оцінці стану теплоізоляційного покриття.

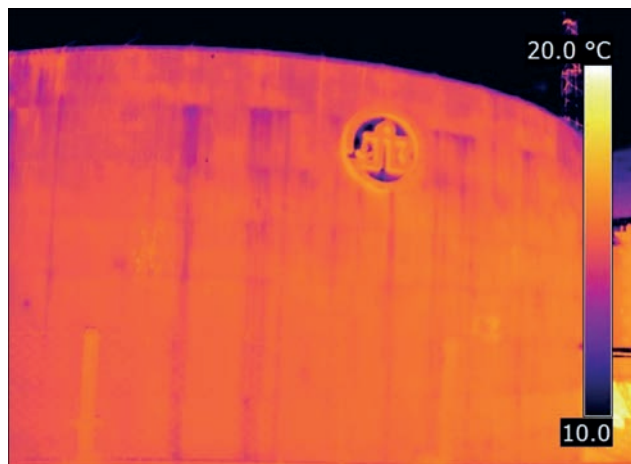


Рис. 1. Термографічний знімок (напрямок на центр сховища з боку вертикалей датчиків 1, 16)

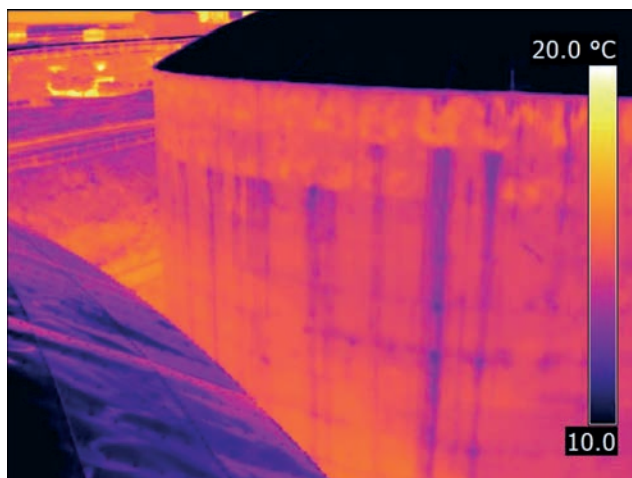


Рис. 2. Термографічний знімок (напрямок на центр сховища з боку вертикалі датчика 4)

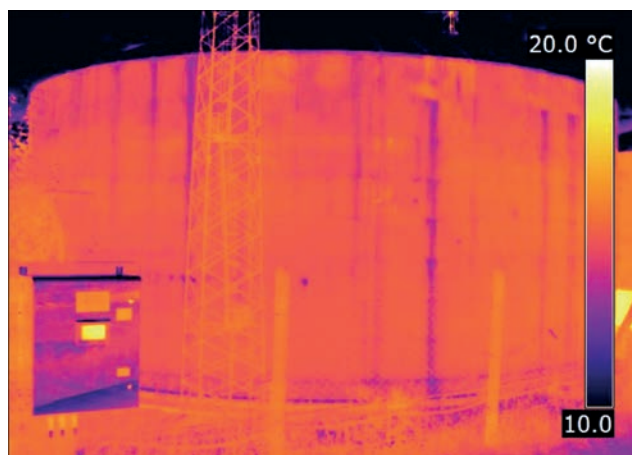


Рис. 3. Термографічний знімок (напрямок на центр сховища з боку вертикалі датчика 15)

Руйнування теплоізоляції може спричинити появу або сприяти прискоренню корозійних процесів на зовнішній поверхні резервуару (рис. 4), локальному зменшенню залишкової товщини стінки, збільшенню АЕ активності в матеріалі конструкції.

Відзначимо важливість збігання результатів термографічного та АЕ контролю, оскільки це є новим і достатньо цікавим науковим фактом. Це, зокрема, доводить, що довготривале використання методу АЕ у різних технологічних умовах дозволяє отримувати принципово нові наукові результати. З'являється можливість вдосконалення існуючих технологій АЕ контролю та прийняття рішення щодо стану об'єктів моніторингу [6].

Результати АЕ моніторингу враховуються при технічному діагностуванні сховищ і описувались раніше [5–7].

З 2008 р. системи АЕ моніторингу встановлені на посудинах і трубопроводах цеху виробництва аміаку (ЦВирА, відділення №№ 1, 2). Розглянемо результати роботи систем АЕ моніторингу у відділенні № 1 (системи ам11 і ам12).

Нижче наведені дані з найменуванням об'єктів моніторингу, їх стисла характеристика з зазначенням номерів датчиків АЕ, місць їх встановлення, відстані між ними. Показано зовнішній вигляд хвилеводу та установочної коробки з датчиком АЕ на об'єктах.

Загальна схема розміщення обладнання АЕ моніторингу ЦВирА та місця встановлення прийомних перетворювачів (датчиків) показана на рис. 5. Приклад більш детального окремого об'єкту показаний на рис. 6.

Системи АЕ моніторингу ам11 і ам12 контролюють наступні об'єкти ЦВирА (табл. 1).

Система ам11: колектор 107-D, реактор вторинного риформінгу 103-D, лінії PG-5-24", PG-7-24", PG-9-24", PG-10-24".

Система ам12: лінія PG от 104 DA-DB до 105 СА/СВ, ділянка трубопроводу – вихід з колони

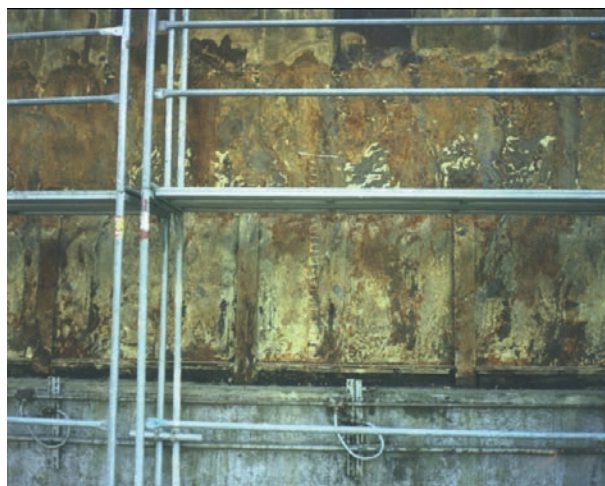


Рис. 4. Стан поверхні аміакосховища

Таблиця 1. Стисла характеристика деяких об’єктів моніторингу

Об’єкт	Робочий тиск, кгс/см ²	Робоча температура, °C	Матеріал
Реактор вторинного риформінгу 103-D	33	350	SA516 Gr
Лінії PG-7-24", PG-9-24", PG-10-24"	28,4...29,4	127...275	A106B, A358-304C
Лінія PG-5-24"	30,0	482	A-155 CM70
Лінія SG-70-16"	30,4	57...328	A106GrB
Ділянка трубопроводу пари високого тиску – лінія HS-3-20"	101	485	A335-P11

синтезу 105-D до 123-C (лінія SG-70-16"); ділянка трубопроводу пари високого тиску (лінія HS-3-20" від опори ОС-10 до опори ОС-16).

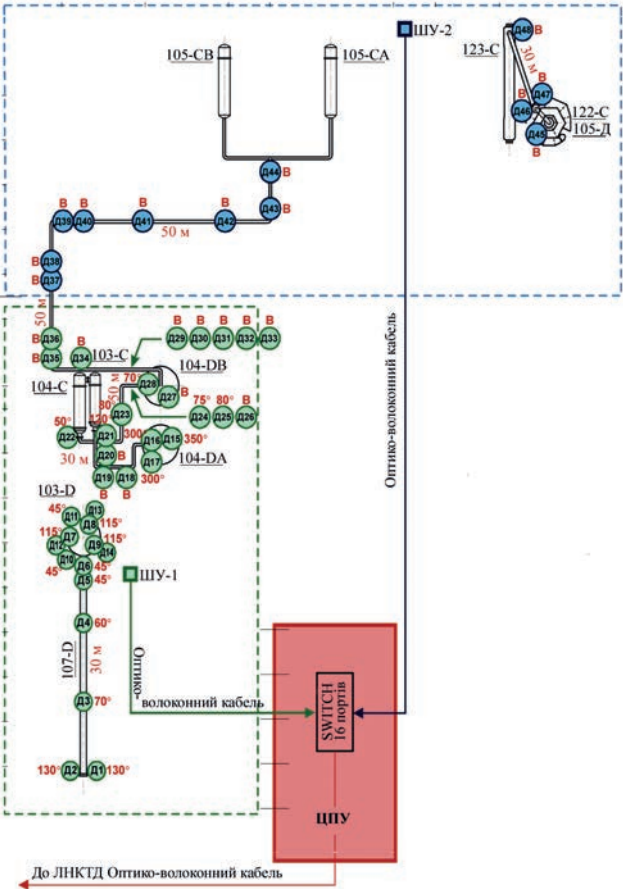


Рис. 5. Загальна схема розміщення датчиків АЕ на обладнанні ЦВирА (відділення № 1)

Вигляд робочих екранів систем АЕ моніторингу обладнання ЦВирА показано на рис. 7.

Для забезпечення роботи датчиків при температурах поверхонь більше 70 °C використовуються спеціальні хвилеводи (рис. 8). Їх геометричні розміри розраховуються для конкретних виробів і матеріалів з урахуванням температурного режиму роботи виробу, а також частотного діапазону, в якому можуть розповсюджуватися сигнали АЕ [7].

Завдання хвилеводів – забезпечити мінімальне загасання і спотворення форми сигналів, надійну та довготривалу роботу датчиків в необхідному діапазоні температур.

Значення температур поверхні виробів у місцях встановлення датчиків АЕ вибірково показані на рис. 9.

Таблиця 2. Система ам11

Номер антени	Тип антени	Кількість датчиків	Номер датчиків
1	Вільний-лінія	6	1, 2, 3, 4, 5, 6
2	Лінія	2	7, 12
3	Лінія	2	8, 13
4	Лінія	2	9, 14
5	Вільний-лінія	7	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21
6	Вільний-лінія	3	28, 29, 30
7	Вільний-лінія	7	22, 23, 31, 24, 25, 26, 27
8	Вільний-лінія	5	32, 33, 34, 35, 36
9	Вільний-лінія	2	10, 11
10	Вільний-лінія	12	37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48

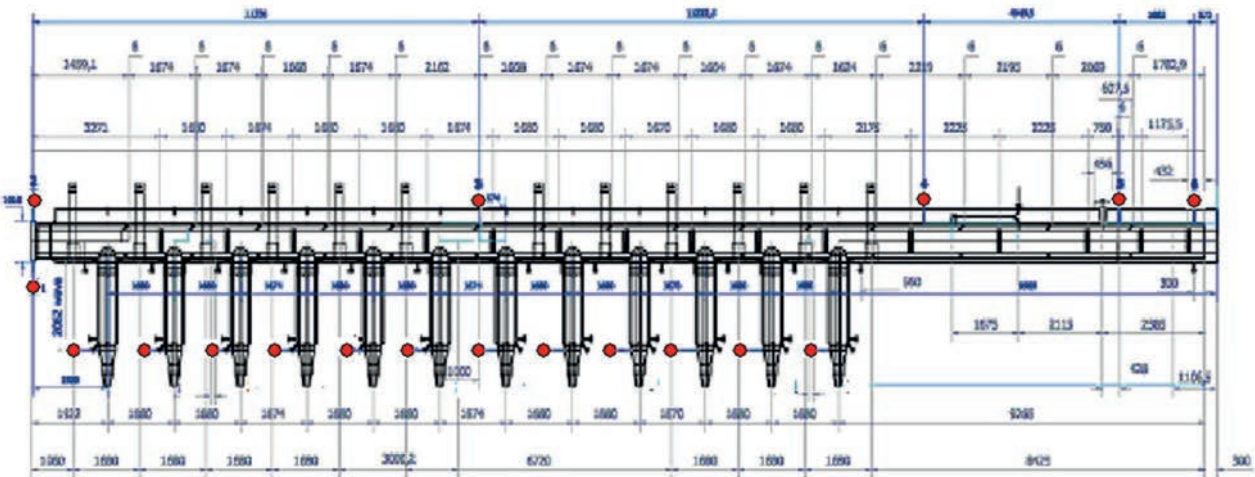


Рис. 6. Первинний риформінг (колектор 107-D та підйомні труби)



Рис. 8. Датчики АЕ, встановлені на об'єктах АЕ моніторингу ЦВирА

Наведемо деякі дані щодо локаційних антен систем безперервного АЕ моніторингу ЦВирА (табл. 2, 3).

Використовується логарифмічний режим підсилення та плаваючий тип порогу амплітудної дискримінації. Значення цих параметрів визначаються в процесі роботи в автоматичному режимі.

Результати АЕ моніторингу об'єктів ЦВирА (відділення 1) за поточний рік показали наявність місць підвищеної акустичної активності, для яких системи АЕ моніторингу видавали попередження про небезпеку (радіус кластера – 1,5 м). Отримані дані наведені нижче (табл. 4, 5).

Виявлені місця рекомендовані для проведення додаткового контролю під час виконання планових ремонтних робіт.

Таблиця 3. Система ам12

Номер антени	Тип антени	Кількість датчиків	Номери датчиків
1	Вільний-лінія	8	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
2	Лінія3	2	9, 10
3	Лінія3	2	11, 12
4	Вільний-лінія	4	13, 14, 15, 16

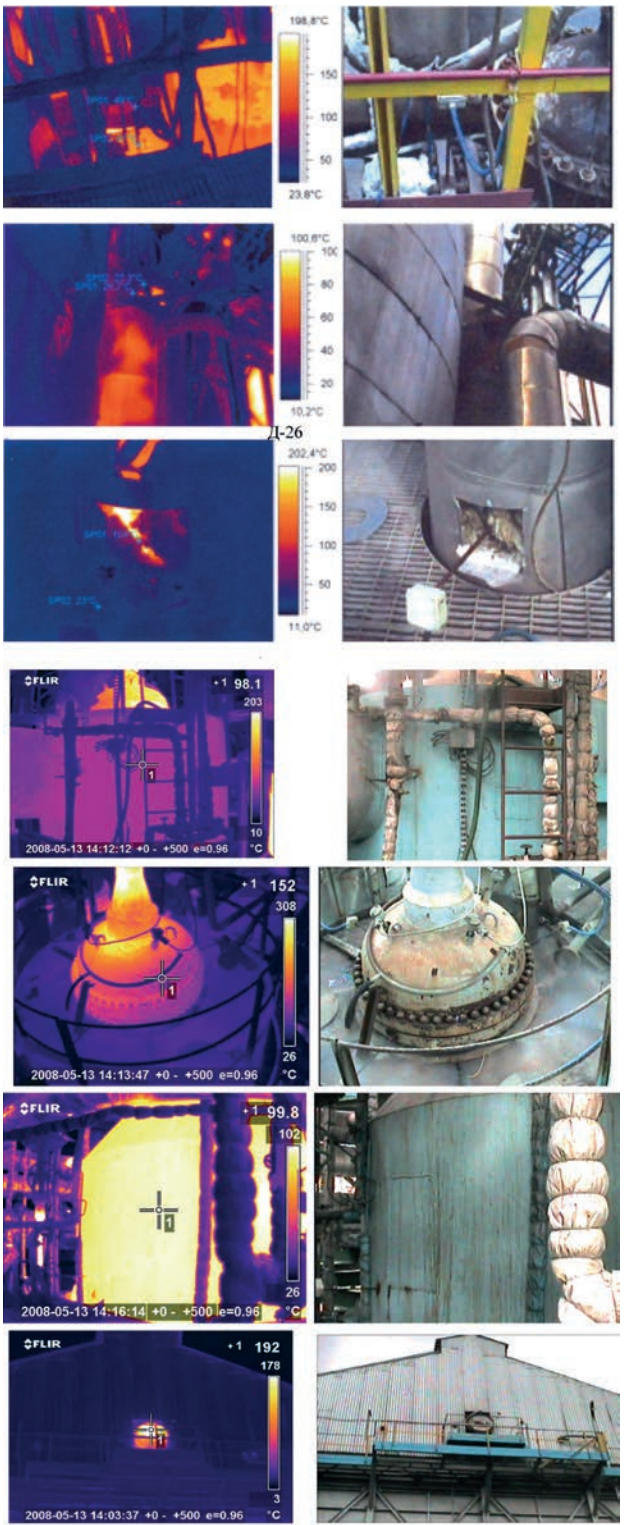


Рис. 9. Температура в місцях встановлення датчиків АЕ

Крім об'єктів, що контролюються системами безперервного АЕ моніторингу, значний інтерес для застосування АЕ контролю та моніторингу

Таблиця 4. Результати АЕ моніторингу. Система ам11

Номер антени	Місця, для яких система АЕ моніторингу видавала попередження про небезпеку	Сумарна кількість подій у кластері	Координати центрів кластерів, мм
1 (колектор 107-D)	1	13	529
	2	13	6214
	3	12	11885
	4	57	17936
	5	45	25602
	6	623	29217
2 (реактор 103-D)	ділянка від 8798 до 9916 мм		
5 (лінія PG-5-24")	1	17	2026
	2	56	23775
	3	8060	24885
6 (лінія PG-9-24")	1	42	3063
	2	20	6332
	3	11	7950
	4	30	10542
	5	43	12367
	6	42	3063
7 (вторинний риформінг, конверсія, метанування)	1	134	1834
	2	103	12239
	3	625	21583
	4	2789	37140
8 (вторинний риформінг, конверсія, метанування)	1	133	4161
	2	10	5742
	3	81	7723
	4	49	9800
	5	20	13036
	6	10	15161
	7	58	16590
	8	736	23710
10 (підйомні труби печі)	1	39	3327
	2	150	4172
	3	64	5350
	4	53	7002
	5	19	8148

Таблиця 5. Результати АЕ моніторингу. Система ам12

№ антени	Місця, для яких система АЕ моніторингу видавала попередження про небезпеку	Сумарна кількість подій у кластері	Координати центрів кластерів, мм
3 (вихід із колони синтезу)	1	11	11250
	2	7	22363
	3	10	31200

Таблиця 6. Характеристика об’єктів АЕ контролю

Найменування посудини, апарата	$P_{\text{розрах.}}$, кгс/см ²	$P_{\text{роб.}}$, кгс/см ²	$T_{\text{роб.}}$, °C	V , л	Матеріал	Рік вигот., установки
Киснева колона	10,2	1,7	-172	3200	ASTM D240 TP 304	1997 1999
Азотна колона	10,2	6,7	-172	10035	ASTM D240 TP 304	1997 1999
Головний конденсатор	10,2	3,8	-172	3996	ASTM D240 TP 304	1997 1999

являють собою об’єкти з обмеженим доступом до поверхні, коли датчики АЕ можливо встановлювати переважно на виходах трубопроводів [8]. Проведено АЕ контроль трьох таких посудин під тиском станції розподілу повітря цеху водообробки.

Технічні характеристики цих об’єктів АЕ контролю (рис. 10) наведені у табл. 6.

Після проведення тестових прозвучувань для проведення АЕ контролю встановлено 26 датчиків АЕ (рис. 11).

Датчики АЕ використовувались як у режимі зонної локації, так і з використанням циліндричної ан-



Рис. 10. Посудини тиску станції розподілу повітря



Рис. 11. Підготовка місць для встановлення датчиків АЕ (вибірково)

тени. При проведенні АЕ контролю зареєстровані сигнали АЕ по окремих каналах. Дана інформація буде збережена для порівняння при проведенні наступного АЕ контролю для аналізу можливого розвитку зон підвищеної АЕ активності.

Висновки

1. Метод АЕ забезпечує контроль важкодоступних місць, якісну та кількісну оцінку поточного стану матеріалу конструкцій, дозволяє заздалегідь передбачити ділянки потенційного розвитку руйнування та прогнозувати руйнівне навантаження у реальному часі під час разових випробувань та/або постійного моніторингу.

2. Постійний АЕ моніторинг дозволяє не лише оперативно отримувати інформацію щодо стану контрольованих об'єктів, але й опрацьовувати її, накопичувати відповідну статистику та на базі аналізу довгострокових даних встановлювати оптимальні режими їх подальшої безпечної експлуатації.

3. Скорочуються терміни з визначення ділянок додаткового, в разі необхідності, контролю, зменшується обсяг додаткових робіт з підготовки та проведення НК. Відповідальні особи можуть планувати заходи з забезпечення подальшої експлуатації об'єктів згідно технологічних умов їх експлуатації з урахуванням їх фактичного стану.

4. Постійне відслідковування та накопичення АЕ інформації з об'єктів моніторингу дозволить поступово перейти до зупинки та ремонтів обладнання за його фактичним станом, збільшивши, таким чином, інтервали між зупинками експлуатації обладнання, що у підсумку підвищить ефективність виробництва.

5. Проведення моніторингу дозволяє більш реально та обґрунтовано планувати подальші роботи під час планових та вимушених зупинок, оптимізувати роботу відповідних служб заводу та окремих лабораторій.

6. АЕ моніторинг обладнання цехів різного призначення заводу дає змогу отримувати оперативну інформацію про їх загальний стан та взаємопов'язану комплексну роботу підрозділів підприємства у цілому. Це, у свою чергу, може надати допомогу у стратегічному плануванні експлуатації обладнання заводу.

7. Довготривале застосування методу АЕ на АТ ОПЗ є джерелом отримання принципово нового, унікального наукового досвіду, аналіз якого дозволяє, у свою чергу, постійно вдосконалювати технологію моніторингу та оцінки стану матеріалу. Слід вважати доцільним подальший розвиток методу АЕ на заводі, у тому числі збільшення кількості об'єктів контролю, вдосконалення моніторингового обладнання, алгоритмів та методик контролю.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 3–18.
2. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А., Овсienko М.А. (2018) Применение технологии акустико-эмиссионного контроля при оценке состояния сосудов химического производства. *Там само*, **1**, 34–41.
3. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya., S.A. Nedoseka, A.Ya. (2018) On the application of AE technology in continuous monitoring of pipelines of power units operating at high temperatures. *International Journal of Condition Monitoring*, **Vol. 8**, 100–105.
4. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А., Овсienko М.А. (2020) Системы акустико-емісійного моніторингу при технічному діагностуванні промислових об'єктів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **3**, 37–42.

5. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А. и др. (2021). Интегрирование метода АЕ в технологию ремонта и продолжения ресурса металлоконструкций. *Там само*, **1**, 11–16.
6. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А., Овсienko М.А. (2020). *Адаптація систем АЕ моніторингу до вимог промисловості*. Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд. Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2016–2020 рр. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона.
7. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020). *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: монография. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
8. Недосека С.А., Яременко М.А., Овсienko М.А. та ін. (2020). Оцінка стану і прогнозування руйнівного навантаження при акустико-емісійних випробуваннях посудин під тиском з обмеженим доступом до контрольованої поверхні. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 8–16.

References

1. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Smart technologies for evaluation of structure state (AE technologies and new generation control equipment on its basis). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3–18 [in Russian].
2. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2018) Application of the technology of acoustic emission monitoring at evaluation of the condition of vessels in chemical production. *Ibid.*, **1**, 34–41 [in Ukrainian].
3. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2018) On the application of AE technology in continuous monitoring of pipelines of power units operating at high temperatures. *Int. J. of Condition Monitoring*, **Vol. 8**, 100–105.
4. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2020) Systems of acoustic emission monitoring at technical diagnostics of industrial facilities. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 37–42 [in Ukrainian].
5. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2021) Integration of AE method into the technology of repair and extension of life of metal structures. *Ibid.*, **1**, 11–16 [in Ukrainian].
6. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2020) *Adaptation of AE monitoring systems to industry requirements*. Reliability and service life of materials, structures, equipment and constructions: Transact. of papers based on 2016-2020 results. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
7. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*: Monography. Ed. by B.E. Paton. 5 Ed. Kiev, Indprom [in Russian].
8. Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. et al. (2020) Evaluation of the state and prediction of breaking load at acoustic-emission testing of pressure vessels with limited access to controlled surface. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 8–16 [in Ukrainian].

INTRODUCTION OF THE TECHNOLOGY OF AE MONITORING AT OPP

S.V. Zhuravlyov¹, B.M. Obodovskiy¹, M.A. Yaremenko², A.Ya. Nedoseka²,
S.A. Nedoseka², M.A. Ovsienko²

¹JSC «Odessa Port Plant». 3 Zavodskaya str., 65481, Yuzhne, Odessa reg., E-mail: office@opz.odessa.ua

²E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150 Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper gives the results of application of AE method in the case of monitoring and control of ammonia storage facilities in ammonia reloading shop, individual lines and apparatuses in ammonia production shop, and well as objects of air distribution station in water treatment shop. It is shown that the results of AE monitoring can be used at qualitative assessment of the state of thermal insulation coating. Schemes of AE transducer mounting on the object of AE monitoring and location array configurations are given. Selective results of AE monitoring of these facilities for the current year are given. 8 Ref., 8 Tabl., 15 Fig.

Keywords: acoustic emission, monitoring, location arrays

Надійшла до редакції 05.09.2021

РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ

М.М. Карманов, С.Р. Михайлов, Р.О. Пастовенський, В.Ю. Глухівський, Є.О. Буйнова

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

Розглянуто новий підхід до контролю зварних швів поліетиленових труб за допомогою рентгентелевізійного методу. Проведено дослідження щодо застосування рентгентелевізійного контролю для виявлення можливих дефектів у зварному шві, а також матеріалографічні дослідження зразків, що підтверджують результати, отримані за допомогою рентгентелевізійного контролю. Бібліогр. 9, рис. 6.

Ключові слова: рентгентелевізійний неруйнівний контроль, поліетиленові труби, цифрове рентгенівське зображення, рентгенівський сенсор

Поліетиленові трубопроводи все більш широко використовуються в системах газо- та водопостачання, опалення, каналізації, технологічних процесах промислових підприємств. За областю застосування пластмасові трубопроводи, як і трубопроводи з інших матеріалів, поділяються на використовувані для зовнішніх і внутрішніх мереж. У газопостачанні в цілях безпеки поліетиленові труби використовуються тільки в зовнішніх підземних газопроводах низького тиску.

Поліетиленові труби перевершують сталеві та чавунні за такими показниками якості, як надійність, довговічність, стійкість до зношування, хімічна стійкість, не піддаються корозії, в кілька разів легші за сталеві. Для таких трубопроводів зварювання встик простіше та швидше, не вимагає додаткових витратних матеріалів, вони легко утилізуються, на гладких внутрішніх стінках практично не утворюється відкладень. Такі труби значно дешевші аналогічних сталевих. Матеріал хімічно нейтральний, не впливає на смак транспортованих рідин, які вживаються в їжу [1].

Є й недоліки. Їх небагато, але вони істотні: поліетилен горить з виділенням шкідливих речовин;

слабка стійкість до ультрафіолету, яка викликає ламкість труб; жорсткі температурні обмеження.

Поліетиленові труби діаметром до 160 мм можуть з'єднуватися за допомогою спеціальних фітингів. Великі діаметри зварюються спеціальним апаратом. Найбільш поширені стикове зварювання, зварювання в розтруб та терморезисторне зварювання [2].

У технологіях зварювання пластмас і в створенні відповідного обладнання за останні роки досягнуто значних успіхів. Однак контроль якості зварних з'єднань виробів з пластмас все ще пов'язаний з певними труднощами, які залежать від способу і технології зварювання, виду зварної конструкції, від властивостей полімерного матеріалу та його побудови. Тому останнім часом все більше уваги приділяється підвищенню ефективності контролю якості зварних з'єднань полімерних матеріалів під впливом механічних навантажень, високих і низьких температур, поверхнево-активних речовин, світла і радіації [3].

Уявлення про стан справ в цій галузі дає відповідна нормативна документація. Перелік небезпечних дефектів в зварних з'єднаннях поліетиленових труб в РФ регламентується інструкцією



Рис. 1. Зразки поліетиленової труби (а), здуття труби після гідравлічних випробувань (б), пори в зварному шві (в)

© М.М. Карманов, С.Р. Михайлов, Р.О. Пастовенський, В.Ю. Глухівський, Є.О. Буйнова, 2021

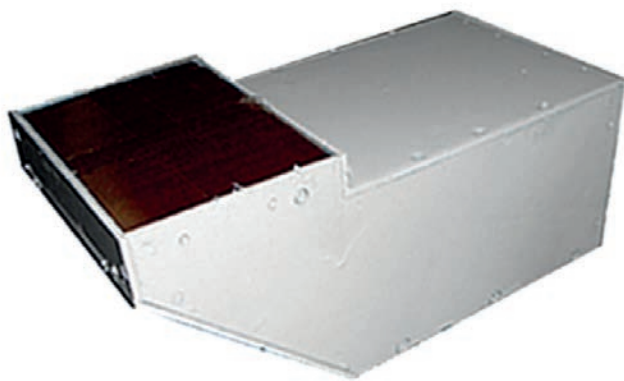


Рис. 2. Зовнішній вигляд установки РТВ-4



Рис. 3. Просвічування на рентген-апараті РАП 150/300

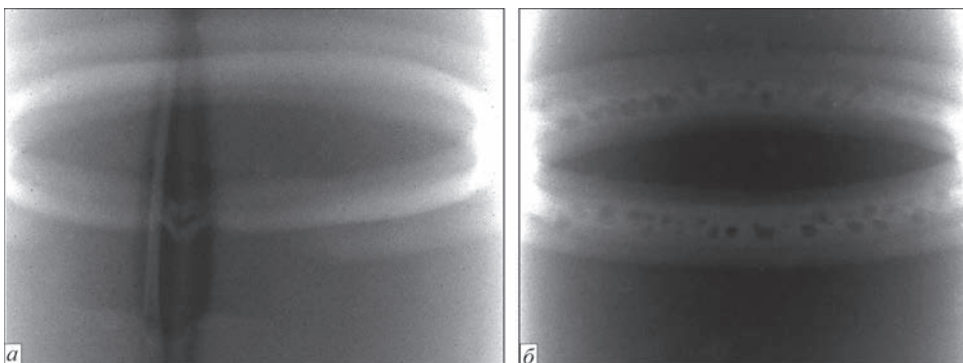


Рис. 4. Результати контролю зразків поліетиленової труби: а – виявлено здуття труби, б – пори по всьому кільцевому шву

[4]. Однак в серед неруйнівних методів контролю вказані тільки візуальний контроль і контроль герметичності, які не дозволяють виявити внутрішні дефекти зварного з'єднання. Ультразвуковий контроль передбачений тільки для газопроводів з поліетиленових труб [5].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України раніше були виконані дослідження методів термографічного контролю якості зварних з'єднань поліетиленових труб з поліетилену марки ПЕ 80 [6]. Проте в даній роботі представлені результати досліджень радіоскопічних методів контролю якості зварювання зразків поліетиленових труб довжиною 310 мм, діаметром 110×11 мм, зварений шов шириною 11 мм, висотою 3...3,5 мм (рис. 1).

Стикове зварювання виконане установкою Widos-Polypress 4600. Параметри зварювання встановлювали відповідно до чинної нормативно-технічної документації [7]. Температура нагрівального елемента 208...215 °С, час нагрівання торців труб 60 с, технологічна пауза перед стисненням 3...4 с. Тиск зварювання 0,2 МПа, час охолодження 10 хв.

На рис. 1 наведено зразки поліетиленової труби (а), здуття труби після гідравлічних випробувань (б), пори в звареному шві (в). Дефекти: пори діаметром 0,5...3 мм, глибиною 0,5...1,5 мм (вимірювались на шліфах зварного з'єднання).

На відміну від сталевих труб, рентгенівський контроль поліетиленових труб в даний час не регламентується нормативною документацією. Тут не передбачені еталони чутливості. Тому для визначення

чутливості контролю використовувався два окремих зразка поліетиленової труби з внутрішніми дефектами (пори) і аналогічний зразок зі шліфом. Це дозволяє зіставити реальні розміри виявлених дефектів з результатами рентгенівського контролю.

Радіоскопічні (рентгентелевізійні) дослідження зразків показали в них наявність пористості.

Для рентгенівського контролю якості зварних з'єднань поліетиленових труб використовувалась розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України портативна рентгентелевізійна установка для контролю зварних з'єднань РТВ-04 (рис. 2) з розміром робочого поля 110×80 мм, розміри рентгентелевізійної установки 225×125×110 мм [8].

Установка виконана за схемою «рентгенівський екран-оптика-ПЗС (КМОП)». В якості рентгенівського екрану в системі застосовується ефективний гадолінієвий екран $Gd_2O_2S: Tb$ з товщиною люмінофорного шару 200 мкм і роздільною здатністю 5,5 пар ліній на мм.



Рис. 5. Зовнішній вигляд твердотілого сенсора S10811-11

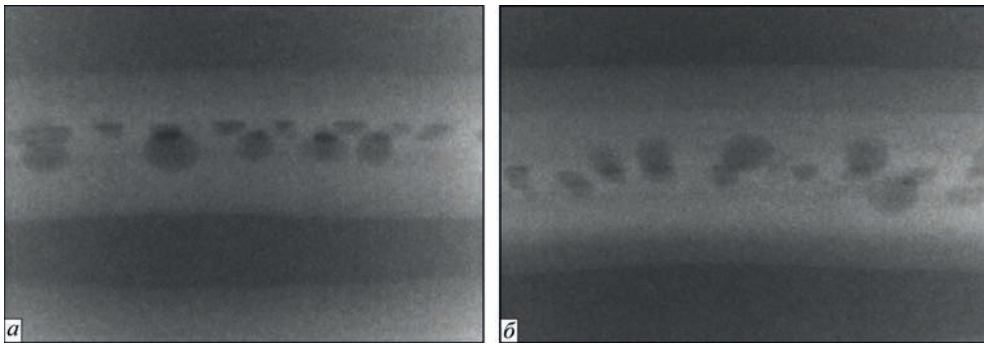


Рис. 6. Результати контролю: зразка поліетиленової труби на шліфі (а); на кільцевому шві (б)

В телевізійній камері установки застосований новий високочутливий 1/3-дюймовий CMOS-сенсор MT9M034 фірми «ON Semiconductor». Кількість ефективних пікселів за горизонталлю та вертикаллю 1392×1040. Установка підключається до ноутбуку за допомогою USB-кабелю, через який на неї подається електроживлення та здійснюється управління режимами її роботи за допомогою спеціального програмного забезпечення.

Просвічування виконувалось крізь дві стінки з отриманням подвійного зображення за схемою «еліпс» (рис. 3).

На рис. 4 наведено приклади цифрових рентгенівських зображень, отриманих під час контролю зазначених зразків поліетиленових труб рентгенівським апаратом РАП 150/300. Фокусна відстань становила 770 мм, а час експозиції – 10 с. Анодна напруга та анодний струм рентгенівської трубки становили відповідно 30 кВ та 10 мА. На рис. 4, б видно пори уздовж кільцевого зварного шва.

Для рентгенокопічного контролю зразків труб використовувався також високочутливий малоформатний рентгенівський сенсор S10811-11 (рис. 5) японської фірми «Hamamatsu Photonic»s [9]. Робоча область сенсора 34×24 мкм; роздільна здатність 1700×1200 пікселів (25 пар лін./мм); розміри сенсора 42,5×30×13 мм. Управління сенсором виконується комп'ютером з використанням модулю обробки сигналів С9266-04 крізь порт USB 2.0.

Застосування твердотільного детектора S10811-11 з високою роздільною здатністю дозволяє отримувати 10...20-ти кратне збільшення розмірів контрольованого фрагмента зображення на екрані ноутбука без втрати якості. На рис. 6 наведені цифрові зображення, отримані за допомогою сенсора S10811-11. Анодна напруга – 30 кВ, струм – 10 мА, фокусна відстань – 840 мм, час накопичення – 10 сек. Мінімальний розмір виявленого дефекту – 2 мм (2 % від подвійної товщини стінки труби). Реальний розмір дефекту вимірювався по шліфу.

Висновки

Застосування рентгенівських методів неруйнівного контролю при зварюванні полімерних труб можна використовувати для виявлення дефектів, викликаних відхиленнями в роботі обладнання або недотримання технології.

Розробка технології рентгенівського контролю для зварювання поліетиленових труб є перспективним напрямком, який допоможе підвищити якість зварювання та зменшити відсоток браку при зварюванні.

Список літератури

1. Полиэтиленовые трубы: маркировка, диаметры, характеристики, применение. <https://stroychik.ru/strojmaterialy-i-tehnologii/polietilenovye-truby>
2. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н. (1987) *Сварка пластмасс*. Москва, Машиностроение.
3. Каган Д.Ф. (1980) *Трубопроводы из пластмасс*. Москва, Химия.
4. ОСН АПК 2.10.06.001-04. *Инструкция по монтажу пластмассовых трубопроводов на объектах АПК России*.
5. СП 42-103-2003. *Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. Свод правил от 26 ноября 2003 г.*
6. Глуховский В.Ю., Костенко А.В. (2010) Применение тепловизионного контроля при сварке полиэтиленовых труб. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 54–57.
7. РСН 358-91 *Сварка полиэтиленовых труб при строительстве газопроводов*.
8. Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Бухенский В.Н., Пастовенский Р.О. (2019) Портативная рентгентелевизионная установка для контроля сварных соединений труб малого диаметра. *Збірка доповідей 9-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»*. Київ, УТ НКДТ, 197–198.
9. Троицкий В.А. (2017) Радиационный контроль на основе твердотельных детекторов. *Территория NDT*, **1**, 30–34.

References

1. Polyethylene pipes: marking, diameters, characteristics, application [in Russian]. <https://stroychik.ru/strojmaterialy-i-tehnologii/polietilenovye-truby>.
2. Zajtsev, K.I., Matsyuk, L.N. (1987) *Welding of plastics*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Kagan, D.F. (1980) *Plastic pipelines*. Moscow, Khimiya [in Russian].
4. OSN APK 2.10.06.001-04. *Instruction on mounting of plastic pipelines on facilities of Russian agroindustrial complex* [in Russian].
5. SP 42-103-2003: *Design and construction of gas pipelines of polyethylene pipes and reconstruction of worn gas pipelines. Set of rules of 26 November 2003* [in Russian].
6. Glukhovskiy, V.Yu., Kostenko A.V. (2010) Application of heat monitoring in welding polyethylene pipes. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 54–57 [in Russian].
7. RSN 358-91: *Welding of polyethylene pipes in construction of gas pipelines* [in Russian].
8. Troitskiy, V.A., Mikhailov, S.R., Bukhenskiy, V.N., Pastovenskiy, R.O. (2019) Portable X-ray TV unit for monitoring of welded joints of small diameter pipes. In: *Proc. of 9th National Sci.-Tekh. Conf. on Nondestructive Testing and Technical Diagnostics*. Kyiv, UK NKTD, 197–198 [in Russian].
9. Troitskiy, V.A. (2017) Radiation monitoring based on solid-state detectors. *Territoriya NDT*, **1**, 30–34 [in Russian].

X-RAY TV INSPECTION OF THE QUALITY OF WELDING POLYETHYLENE PIPES

M.M. Karmanov, S.R. Mikhailov, R.O. Pastovenksyi, V.Yu. Glukhivskiy, E.O. Bujnova

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150 Kyiv, Ukraine. E-mail: krm.paton@ukr.net

A new approach to monitoring polyethylene pipe welds using X-Ray TV inspection is considered. A study was performed as regards application of X-Ray TV inspection to detect possible defects in the weld, as well as metallographic investigations of the samples, which confirm the X-Ray TV inspection results. 9 Ref., 6 Fig.

Keywords: X-Ray TV nondestructive testing, polyethylene pipes, digital X-Ray image, X-Ray sensor

Надійшла до редакції 01.07.2021

ПЕРЕДПЛАТА 2022

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.	240	720	1440	2880
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	240	480	960
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	240	480	960
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	520	1560	3120	6240

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

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

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» 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 2022 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2020 рр.



Журнал «**Автоматичне зварювання**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень за напрямками: матеріалознавство та металургія зварювання, наплавлення та інших споріднених технологій; технології та матеріали для зварювання конструкційних матеріалів; виробництво зварних металоконструкцій для різних галузей промисловості; відновлювальний ремонт для подовження ресурсу зварних конструкцій і вузлів; проблеми міцності, конструювання та оптимізації зварних конструкцій; технології 3D друку, які базуються на зварювальних процесах; гібридні технології зварювання. В журналі публікується також інформація про нові зварювальні матеріали, джерела живлення та технології; звіти про виставки, конференції та семінари, анонси нових книг та винаходів, новини від відомих компаній та інше.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів. Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм. Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200x290 мм. Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200x290 мм. Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм. А5 – 185x130 мм. Розміри журналів після обрізу 200x290 мм. Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель СМΥК, роздільна здатність 300 dpi.

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

Ціна договірна. Передбачена система знижок. Вартість публікації статті на правах реклами становить половину вартості рекламної площі. Публікується тільки профільна реклама з тематики журналів. Відносно вартості, знижок та термінів публікації прохання звертатися у видавництво.

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
 03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
 Тел./факс: 38044 200-82-77
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>



Журнал «**Сучасна електрометалургія**» є міжнародним науково-теоретичним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень у сферах: металургія чорних і кольорових металів та сплавів; спеціальна електрометалургія (електрошлакова, електронно-променева, плазмова та вакуумно-дугова технології); нові матеріали; енерго- і ресурсозбереження; матеріалознавство, 3D технології у спеціальній електрометалургії. Публікується також допоміжна інформація з тематики журналу.



Журнал «**Технічна діагностика та неруйнівний контроль**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень з діагностики матеріалів і конструкцій та методи неруйнівного контролю для оцінки стану матеріалів і конструкцій; теорія, методи і засоби технічної діагностики. Розміщуються матеріали з моніторингу конструкцій та подовження ресурсу та працездатності засобами НК. Публікується супутня інформація з тематики журналу, а також інформація про події та новини в Українському товаристві НК та ТД.

АНАЛІЗ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ ОБСТЕЖЕННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЇХ ВИРОБНИЦТВА У ВІДПОВІДНОСТІ ДО ВИМОГ СТАНДАРТУ ДСТУ ISO 9001:2015

Ю.К. Бондаренко, А.Г. Потап'євський, К.О. Артюх, Ю.В. Логінова

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

Згідно зі стандартом ДСТУ ISO 9001:2015 організація повинна розробити, задокументувати, впровадити та підтримувати в робочому стані систему менеджменту якості, постійно поліпшувати її результативність відповідно до вимог даного стандарту. Бібліогр. 4, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: система менеджменту якості, система управління якістю, нормативні документи, зварна конструкція, неруйнівний контроль, технічна діагностика, зварювальне виробництво

Система менеджменту якості – це сукупність взаємозалежних і взаємодіючих елементів для розробки політики та цілей і досягнення цих цілей для керівництва керування організацією стосовно якості на підставі її документування [1, 2].

Для забезпечення ефективності впроваджувальних систем менеджменту якості необхідно розробити документи, що входять в обов'язковий склад документації системи менеджменту якості, визначені ДСТУ ISO 9001:2015:

- політика та цілі в області якості (пп. 4.2.1, 5.1, 5.3, 5.4.1);
- настанова щодо якості (п. 4.2.2);
- контроль документів (п. 4.2.3);
- контроль протоколів (п. 4.2.4);
- система внутрішніх аудитів (п. 8.2.2);
- керування невідповідною продукцією (п. 8.3);
- керування корегувальними діями (п. 8.5.2);
- керування попереджуючими діями (п. 8.5.3).

Документи (стандарти підприємства), що регламентують:

- процеси керування невідповідними ресурсами;
- процеси керування ризиками та відхиленнями.

Впровадження та сертифікація систем управління якістю відповідно до вимог національних або міжнародних стандартів у першу чергу дозволить підвищити конкурентоспроможність продукції вітчизняних виробників.

Типи даних, які підлягають аналізу та оцінці в рамках СМ (система менеджменту):

- відповідність продукції або послуги встановленим вимогам;
- задоволеність споживача;
- відповідність і результативність СМ;
- ступінь реалізації планів;
- показники результативності процесів;
- показники роботи зовнішніх постачальників;

– необхідність і можливість для поліпшення якості.

Підприємство, що виготовляє зварні конструкції, планує та впроваджує процеси моніторингу, вимірювання, аналізування, поліпшення, щоб:

- продемонструвати відповідність виготовлення продукції та надання науково-технічних послуг, що відповідає вимогам до неї;
- забезпечити відповідність системи управління якістю;
- постійно поліпшувати результативність системи.

Процеси моніторингу:

1. Перевірка виконання планів виготовлення продукції та технічних робіт за державними замовленнями (проводяться керівництвом).

2. Перевірка етапів виконання відділами технічних послуг за госпрозрахунковою тематикою. Аналіз керівництвом проводиться для значних, державних або інших замовлень. Етапи виконання інших технічних робіт аналізуються керівником відділу.

3. Перевірка етапів підготовки підприємства до проходження верифікацій, акредитацій.

4. Перевірка функціонування внутрішніх бізнес-процесів (внутрішній аудит).

5. Перевірка ринкової стабільності підприємства (клієнтська база, кількість та обсяг замовлень).

6. Вимірювання задоволеності замовника.

Відповідальність за забезпечення процесів моніторингу надання послуг покладено на керівництво (рис. 1).

Неруйнівний контроль і технічна діагностика (НК і ТД) та випробування в процесі надання послуги крім власне контролю передбачає перевірку параметрів, які можуть безпосередньо впливати на якість. Одним з превентивних заходів в цьому

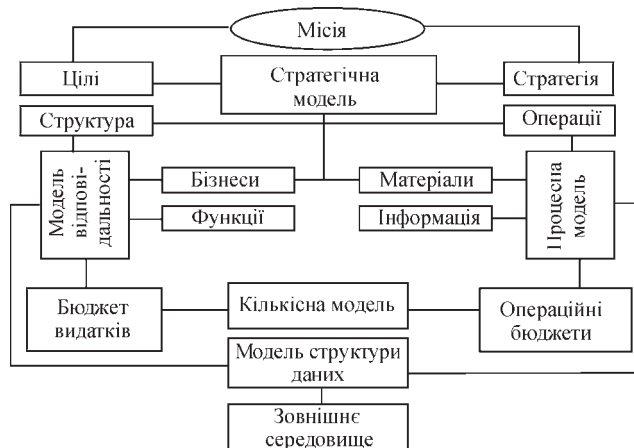


Рис. 1. Місія стратегічної моделі НК і ТД на підприємстві напрямку є внутрішня атестація персоналу НК і ТД перед його виконанням (рис. 2).

Безпосередньо забезпеченню якості послуги сприяє проведення контролю на визначених стадіях її виконання. Так звані точки контролю та порядок його проведення для кожної конкретної послуги визначаються внутрішніми документами та технічним завданням на виконання робіт.

Безпосередньо забезпеченню якості в процесі надання послуги сприяє проведення керівником робіт перевірки основних видів діяльності в рамках методики виконання (рис. 3).

Результати всіх випробувань та операцій контролю (акти, протоколи, записи в журналах тощо) оформлюються за встановленим порядком в інструкціях. Перші примірники актів та протоколів зберігаються у вповноваженого з якості, копії надаються керівникам зацікавлених підрозділів.

Результати вхідного контролю всієї закупленої продукції фіксуються в «Журналі обліку закупленої продукції та результатів її вхідного контролю».

Результати контролю послуги в процесі її виробництва фіксуються в «Журналі реєстрації контролю послуг в процесі їх надання» і засвідчуються особистим підписом заступника директора або керівником підрозділу.

Всі дані про контроль якості наданої послуги фіксуються в «Журналі ідентифікації (обліку) готової продукції».

Результати інспекційного контролю продукції відображаються в «Журналах реєстрації результатів контролю послуг».

Задоволеність споживача якістю продукції засвідчується його підписом в акті. Ступінь задоволеності споживача якістю наданої послуги визначається шляхом опитування та збирання відгуків.

Результати контролю продукції з боку замовника з залученням ним сторонніх фахівців, якщо



Рис. 2. Об'єкти сертифікації в зварюальному виробництві конструкцій [4]



Рис. 3. Схема організаційних та технічних складових системи управління якістю

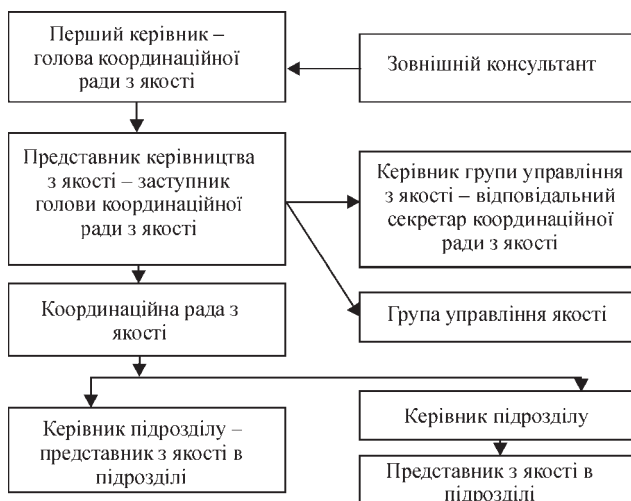


Рис. 4. Організаційна структура для розробки, впровадження і супроводження системи менеджменту якості [4]



Рис. 5. Напрямки оцінки персоналу підприємства

це передбачено договором, оформлюється визначеними замовником документами. Копії документів, які містять результати перевірки, надаються організації-замовнику.

Результати внутрішніх перевірок використовуються для проведення аналізу діяльності підприємства в сфері якості та визначення напрямків її покращення, удосконалення структури та методів управління, підвищення якості продукції, виявлення прихованих внутрішніх резервів (компетентність персоналу) (рис. 4).

На підставі результатів проведених перевірок керівник підрозділу, що піддавався перевірці, в п'ятиденний термін складає план коригувальних дій та подає його на розгляд уповноваженому з якості. Погоджений вповноваженим з якості план коригувальних дій затверджується директором. Контроль виконання запланованих коригувальних дій та попереджувальних заходів покладається на

керівника відповідного підрозділу або на заступника директора (рис. 5, 6).

Показники складності робіт (ПСУ):

$$S_k = \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i,$$

де S_k – показник складності конкретної роботи в балах; n – кількість показників складності; a_{ij} – j -й рівень i -го показника (в балах); x_i – часткова значимість i -го показника складності роботи (в частках одиниці). Сумарний показник складності робіт:

$$S_{\text{сум}} = \sum_{k=1}^m S_k$$

Плануючи систему управління підприємством та НК і ТД, підприємство повинно брати до відома чинники, згадані в п. 4.1 (робоче середовище), вимоги, згадані в п. 4.2 (зацікавлені сторони) та в п. 4.3 (сфера застосування системи управління, НК і ТД), а також визначати ризики і можливості, щодо яких мають вживати заходів для виробництва зварних конструкцій з легких сплавів з метою, щоб:

- гарантувати те, що система управління може досягати запланованих результатів;
- запобігти небажаним наслідкам або зменшити їх;
- здійснювати постійне поліпшення виробництва зварних конструкцій з легких сплавів.

Визначаючи ризики та можливості для системи управління, НК і ТД та її запланованих результатів, які потрібно обробляти, підприємство повинно взяти до відома [2, 3]:

- небезпеки (див. п. 6.1.2.1);
- ризики у сфері СУЯ, НК і ТД та інші ризики (див. п. 6.1.2.2);

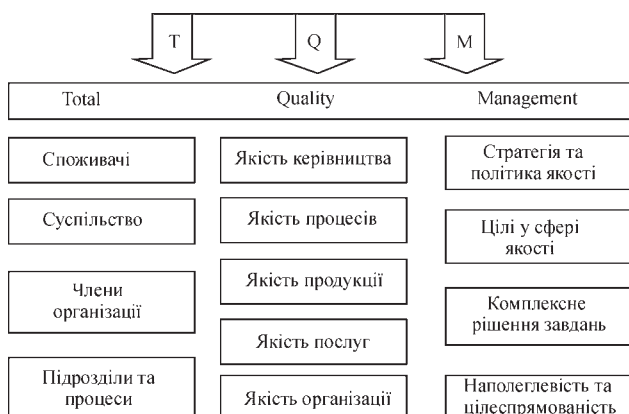


Рис. 6. Складові елементи концепції Total Quality Management (TQM). Загальне управління якістю [4]

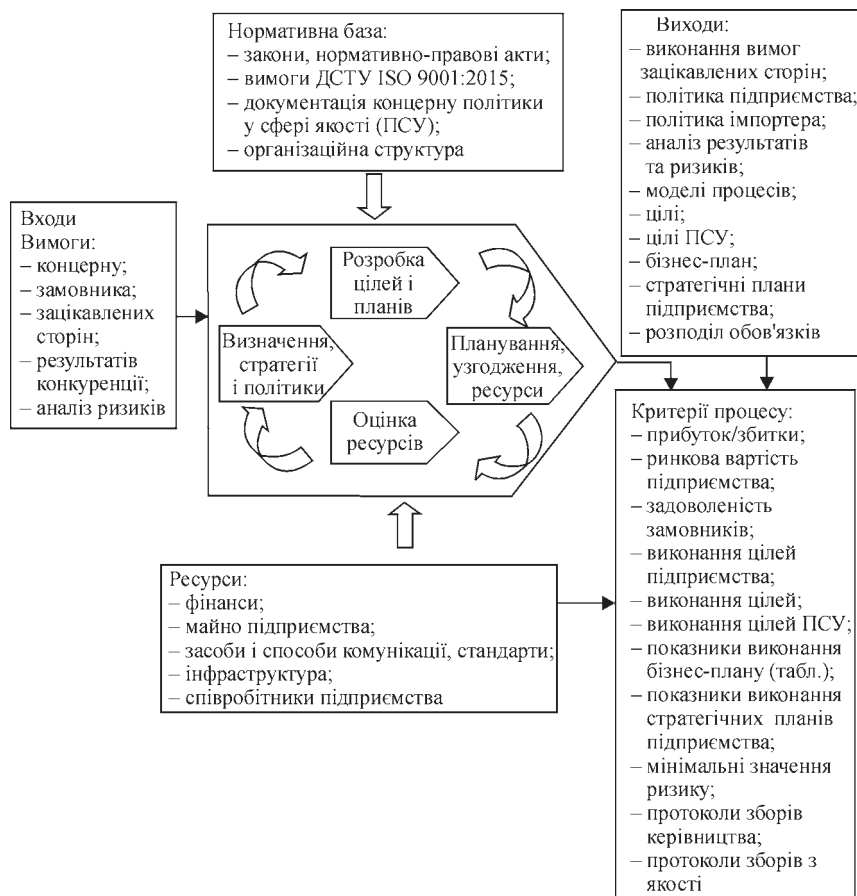


Рис. 7. Розробка процесної моделі управління підприємством для використання в системі управління якістю (СУЯ) відповідно до вимог ДСТУ ISO 9001:2015

– можливості у сфері СУЯ, НК і ТД та інші можливості (п. 6.1.2.3);

– законодавчі та інші вимоги НД для НК і ТД (див. п. 6.1.3).

Підприємство під час планування процесу(ів) повинно визначати та оцінювати ризики та можливості, значущі з погляду запланованих результатів системи управління та НК і ТД, пов'язані зі змінами на підприємстві, її процесів або системи управління, НК і ТД. У разі запланованих змін, довгострокових або короткострокових, цю оцінку потрібно проводити до здійснення змін (див. п. 8.1.3).

Підприємство повинно підтримувати та управляти документованою інформацією:

- про ризики та можливості НК і ТД;
- процес(и), потрібні для визначення та оброблення ризиків і можливостей (див. пп. 6.1.2-6.1.4), в обсязі, потрібному для здобуття впевненості, що вони здійснюються за планом.

Підприємство повинно розробляти, впроваджувати і підтримувати процес(и) НК і ТД для ідентифікації небезпек, які мають постійний та проактивний характер. Цей процес(и) має враховувати, але не обмежуватися тільки цим, таке:

1. як організована робота, соціальні чинники (зокрема, обсяг робіт, час роботи, репресії, пере-

слідування і знування), лідерство і корпоративна культура на підприємстві;

2. стандартні та нестандартні роботи і ситуації разом з ризиками, що пов'язані з НК і ТД:

2.1. з інфраструктурою, устаткуванням, матеріалами, речовинами та фізичними умовами на робочому місці;

2.2. з проектуванням конструкцій та послуги з НК і ТД, дослідженням, розробленням, тестуванням, виробництвом, складанням, будівництвом, наданням послуг, обслуговуванням та утилізацією;

2.3. людським чинником (персонал) (рис. 5);

2.4. тим, як виконується робота зі зварювання та контролю;

3. відповідні інциденти в минулому, як усередині, так і за межами підприємства, разом з аваріями та їх причинами;

4. можливі аварійні ситуації;

5. персонал, з огляду:

5.1. на тих, хто має доступ до робочого місця та виконуваних на ньому робіт, зокрема працівників, підрядників, відвідувачів та інших осіб;

5.2. тих, хто перебуває в безпосередній близькості від робочого місця та може зазнати ризиків від робіт, що проводить підприємство;

5.3. працівників на місцях, які не перебувають під безпосереднім контролем підприємства (рис. 7);

Бальні оцінки складності робіт

Показники складності	Мак кількість балів	Часткова значимість в загальній оцінці	Кількість ступенів	Бальна оцінка з урахуванням їх часткової значимості (a_{ij}, x_i)									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Характер роботи, які складають зміст праці	3,00	0,30	10	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
Різноманіття (комплексність) робіт	1,20	0,15	8	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20		
Самостійність виконання робіт	2,00	0,25	8	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00		
Масштаб і складність керівництва	1,05	0,15	7	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05			
Додаткова відповідальність	1,05	0,15	7	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05			
Всього	8,30	1,00	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

6. інші питання, у яких враховано:

6.1. організацію робочих місць, процесів, конструкцію установок, НК і ТД, машин/устаткування зі зварювання, робочі процедури та організацію робіт, зокрема їхню адаптацію до потреб і можливостей залученого персоналу;

6.2. ситуації в безпосередній близькості від робочого місця, що виникають унаслідок виконання робіт під контролем підприємства;

6.3. ситуації, які не контролює підприємство та які виникають у безпосередній близькості від робочого місця, що можуть призвести до виробничої травми або погіршення здоров'я людей на робочому місці;

7. фактичні або передбачувані зміни на підприємстві, в операціях, процесах, роботах і системі управління, НК і ТД (див. п. 8.1.3);

8. зміни у знаннях та інформації про небезпеки.

Підприємство повинно розробляти, впроваджувати і підтримувати процес(и) для:

– оцінки ризиків у сфері НК і ТД, пов'язаних з виявленими загрозами, зважаючи на результативність наявних засобів управління, НК і ТД;

– виявлення та оцінки ризиків, пов'язаних з розробкою, впровадженням, функціонуванням і підтримкою системи управління, НК і ТД.

Методологія(ії) та критерії, які застосовує підприємство для оцінки ризиків у сфері НК і ТД, мають бути визначені з урахуванням їхнього масштабу, характеру та часу для гарантування більшою мірою запобіжного, ніж просто як реагування, характеру та систематичного застосування. Ці методології та критерії повинні управлятися та зберігатися в формі документованої інформації (інструкції та протоколи випробувань).

Підприємство повинно розробляти, впроваджувати та підтримувати процес(и) для оцінки результатів НК і ТД:

1. можливостей у сфері НК і ТД для поліпшення показників СУЯ, НК і ТД, враховуючи заплановані зміни на підприємстві, її політиках, процесах або видах діяльності, а також:

1.1. можливості для адаптації роботи, організації праці та виробничого середовища до працівників;

1.2. можливості для запобігання небезпекам і зниження ризиків у сфері НК і ТД;

2. інші можливості для поліпшення системи управління, НК і ТД.

Ризики та можливості у сфері НК і ТД можуть призводити до інших ризиків і створювати інші можливості для підприємства.

Підприємство повинно розробляти, впроваджувати та підтримувати технологічний процес(и) для того, щоби:

– визначати та мати доступ до актуальних законодавчих та інших вимог НД, які поширюються на безпеки та ризики на підприємстві у сфері системи управління, НК і ТД;

– визначати, у який спосіб ці законодавчі та інші вимоги НД застосовуються на підприємстві та про що потрібно інформувати;

– враховувати ці законодавчі та інші вимоги під час розробки, впровадження, підтримки та постійного поліпшення системи управління та НК і ТД.

Підприємство повинно управляти та зберігати документовану інформацію щодо законодавчих та інших вимог НД, а також гарантувати її оновлення для відображення будь-яких змін.

Підприємство повинно планувати:

1. дії для:

1.1. зазначених ризиків і можливостей (див. пп. 1.2.2, 6.1.2.3);

1.2. обліку законодавчих та інших вимог НД (див. п. 6.1.3);

1.3. підготовки до аварійних ситуацій та реагування на них (див. п. 8.2);

2. у який спосіб:

2.1. інтегрувати та упроваджувати ці дії в процеси системи управління, НК і ТД або інші бізнес-процеси;

2.2. оцінювати результативність цих дій.

Підприємство під час планування передбачуваних дій повинно враховувати ієрархію засобів управління (див. п. 8.1.2) і результати функціонування системи управління, НК і ТД. Під час планування цих дій підприємство повинно враховувати найуспішніші практики, технологічні можливості, а також фінансові, експлуатаційні вимоги та вимоги бізнесу.

Підприємство повинно встановлювати цілі в сфері НК і ТД для відповідних функцій та рівнів, щоб підтримувати та постійно поліпшувати систему управління, НК і ТД і показники у сфері НК і ТД (див. п. 10.3).

Цілі у сфері НК і ТД повинні:

1. бути погоджені з політикою у сфері якості НК і ТД;
2. бути вимірними (якщо можна практично здійснити) або мати змогу для оцінки дієвості НК і ТД;
3. враховувати:
 - 3.1. вимоги НД, що застосовуються;
 - 3.2. результати оцінки ризиків і можливостей (див. пп. 6.1.2.2, 6.1.2.3);
 - 3.3. результати консультацій з персоналом (див. п. 5.4) і, якщо такі є, представниками персоналу;
4. бути об'єктом моніторингу;
5. доводитися до відома;
6. оновлюватися в разі потреби.

Плануючи досягнення цілей у сфері НК і ТД, підприємство повинно визначити:

- що потрібно зробити;
- які ресурси будуть потрібні;
- хто буде відповідальним;
- коли дії завершаться;
- у який спосіб оцінюватимуть результати, зокрема з показниками для моніторингу виробництва;
- у який спосіб дії щодо досягнення у сфері НК і ТД будуть інтегровані в бізнес-процеси підприємства.

Підприємство повинно управляти та зберігати документовану інформацію про цілі у сфері НК і ТД та плани щодо їхнього досягнення.

Планування – це не одинична подія, а постійний процес, коли потрібно заздалегідь оцінювати швидкоплинні обставини та постійно виявляти ризики та визначати можливості як щодо персоналу, так і щодо системи управління якістю, НК і ТД.

Небезпеки можуть призвести до виробничих травм і шкоди здоров'ю, невиконання законодавчих та інших вимог НД або шкоди для репутації. У процесі планування взаємозв'язки та відносини між видами діяльності та вимогами для системи управління розглядають як одне ціле.

Можливості у сфері НК і ТД передбачають виявлення небезпек, способи сповіщення про них, а також аналіз і зниження рівня відомих небезпек. Інші

можливості спрямовані на стратегію поліпшення системи.

Приклади можливостей для поліпшення показників у сфері НК і ТД:

- проведення інспекцій та аудиту;
- аналіз небезпек, пов'язаних з виробництвом, і оцінки, пов'язані з виробничими завданнями;
- поліпшення показників у сфері в НК і ТД за рахунок зменшення монотонності роботи або полегшення роботи із заздалегідь заданою на небезпечному рівні продуктивністю;
- видача дозволів на роботу та інші методи санкціонування та контролю;
- розслідування інцидентів, невідповідностей та коригувальні дії;
- оцінка ергономіки та інших чинників, що сприяють запобіганню травмам.

Приклади інших можливостей для поліпшення показників у сфері СУЯ, НК і ТД:

- зазначення вимог щодо охорони здоров'я та безпеки праці на ранній стадії життєвого циклу об'єктів, устаткування або процесів планування переміщення об'єктів, процесів перепроєктування або заміни устаткування;
- використання нових технологій для поліпшення показників у сфері НК і ТД;
- підвищення культури у сфері НК і ТД, особливо в частині своєчасного повідомлення про небезпеки та інциденти;
- надання відчутної підтримки щодо системи управління в НК і ТД з боку керівників вищої ланки;
- розширення процесу(ів) розслідування інцидентів;
- поліпшення процесу(ів) консультацій та участі персоналу;
- бенчмаркінг водночас із розглядом як власної (внутрішньої) діяльності підприємства в минулому, так і схожої діяльності (зовнішньої) на інших підприємствах;
- співпраця на форумах, які орієнтуються на теми, пов'язані з НК і ТД, охороною здоров'я та безпекою праці.

Висновки

Проаналізовано та розроблено перелік необхідних кроків з їх описом та рекомендаціями для впровадження на сучасній інформаційній платформі менеджменту якості на підприємстві, що виготовляє зварні конструкції, згідно зі стандартом ДСТУ ISO 9001:2015.

Список літератури

1. Бондаренко Ю.К., Потап'євський А.Г., Логінова Ю.В., Артюх К.О. (2020) *Аналіз і методики стандартизації, акредитації, метрології і експертизи зварювального виробництва*. Київ.
2. ДСТУ ISO 19011:2019 (ISO 19011:2018, IDT) *Настанови щодо проведення аудитів систем управління*.

3. Бондаренко Ю.К., Потап'євський А.Г., Логінова Ю.В. та ін. (2020) *Ризик менеджмент у зварювальному виробництві*. Київ.
4. Бондаренко Ю.К., Артюх К.О. (2021) Дослідження проблеми управління якістю при розвитку системи обстеження та технологічного регулювання виробництва зварних конструкцій з легких сплавів. *Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару «Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті», 15–19 березня 2021 р., Львів*, 14–17.

References

1. Bondarenko, Yu.K., Potapievskiy, A.G., Loginova, Yu.V., Artyukh, K.O. (2020) *Analysis and procedures of standardization, accreditation, metrology and examination of welding production*. Kyiv [in Ukrainian].
2. DSTU ISO 19011:2019 (ISO 19011:2018, IDT): *Guidelines for auditing management systems* [in Ukrainian].
3. Bondarenko, Yu.K., Potapievskiy, A.G., Loginova, Yu.V., Artyukh, K.O., Kovalchuk, O.V., Saenko, V.V. (2020) *Risk management in welding production*. Kyiv [in Ukrainian].
4. Bondarenko, Yu.K., Artyukh, K.O. (2021) Examination of the problem of quality management and development of a system for inspection and regulation of production of light alloy welded structures. In: *Proc. of Int. Sci. and Techn. Seminar on Current Problems of Production and Repair in Industry and Transport (15-19 March 2021, Lviv)*, 14–17 [in Ukrainian].

QUALITY CONTROL OF WELDED STRUCTURES BASED ON A SYSTEM OF INSPECTION AND TECHNOLOGICAL REGULATION OF THEIR FABRICATION, IN KEEPING WITH THE REQUIREMENTS TO DSTU ISO 9001:2015

Yu.K. Bondarenko, A.G. Potapievskiy, K.O. Artyukh, Yu.V. Loginova

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

In keeping with DSTU ISO 9001:2015 standard, an organization should develop, document, introduce and maintain in the working condition a system of quality management, and should constantly improve its effectiveness, in keeping with the requirements of the actual standard.

Keywords: quality management system, quality control system, normative documents, welded structure, nondestructive testing, technical diagnostics, welding fabrication

Надійшла до редакції 20.05.2021

VI Міжнародна конференція ТИТАН 2022: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

30 травня – 1 червня 2022 р.

Голова програмного комітету
академік С.В. Ахонін



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Національний університет «Запорізька політехніка»
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



Тематика конференції

- Технології та обладнання для отримання губки, злитків та відливок з титану та його сплавів
- Адитивні технології в виробництві виробів з титанових сплавів
- Деформаційна обробка титану
- Виробництво та використання порошків титану
- Структура та властивості титанових сплавів
- Нові сплави на основі титану та інтерметалідів титану
- Інженерія поверхні титанових сплавів
- Технології зварювання та пайки титанових сплавів
- Застосування виробів та конструкцій з титану та сплавів на його основі в промисловості

Контрольні дати

Надання заявок на участь в конференції та тез доповідей до 12.05.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі до 19.05.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску до 30.05.2022 р.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
вул. Казимира Малевича, 11,
м. Київ, 03150, Україна
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/ukr/titan2022

Інформаційна підтримка: **ІСУПАСА**
ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ
3 АВТОМАТИЧНЕ
ЗВАРЮВАННЯ
BIULETYN
Instytutu Spawalnictwa

СУЧАСНІ ЗАКОНОДАВЧІ ТА НОРМАТИВНІ ВИМОГИ ДО ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Ю.К. Бондаренко, О.В. Ковальчук

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

Проаналізовано сучасний стан міжнародного та державного технічного регулювання. З метою імплементації українського законодавства в галузі технічного регулювання до міжнародних вимог Україною здійснюється ряд важливих кроків. На підставі аналізу поля нормативних документів визначено, яка зварювальна продукція підпадає під дію технічних регламентів, гармонізованих з Європейськими директивами, які є обов'язковими до застосування. Зазначено накази відповідних міністерств, які визначають переліки стандартів, відповідність яким підтверджує відповідність вимогам технічного регламенту. Визначено, що при проведенні оцінювання відповідності відповідальній зварювальній продукції застосовуються комбінації модулів, складовими яких є сертифікація системи управління якістю. Проаналізовано поле нормативних документів стосовно специфічних вимог до системи управління якістю, які діють в різних галузях промисловості. Визначено план дій для підприємства зварювального виробництва, який має на меті впровадити заходи щодо забезпечення відповідності продукції вимогам технічних регламентів. Бібліогр. 6, табл. 1.

Ключові слова: технічне регулювання, зварювальна продукція, зварна конструкція, ризики продукції, ризик-орієнтований підхід, процедури підтвердження відповідності зварювальної продукції

При введенні в обіг продукції на внутрішньому ринку виробник має виконати обов'язкові законодавчі вимоги, які до цієї продукції ставляться, а також контрактні вимоги, які висуває покупець продукції. А при експорті продукції до будь-якої іншої країни виробник має виконати обов'язкові технічні вимоги до продукції, які встановлені країною-імпортером, або регіональні технічні вимоги, яких дотримується країна-імпортер (наприклад, Європейські стандарти – EN). Міжнародна спільнота промисловців докладає зусилля для уніфікації технічних вимог з метою усунення технічних бар'єрів в торгівлі [1]. Вступ України до Світової організації торгівлі (СОТ), на долю країн-членів якої припадає понад 98 % світового обігу, відкрило для нашої країни ряд перспектив як виробника продукції. Це стало майданчиком для представлення інтересів України на міжнародних ринках та в боротьбі з країною-агресором. Набуття Україною членства в СОТ створило необхідні передумови для підписання у червні 2010 р. Угоди про вільну торгівлю з Європейською асоціацією вільної торгівлі. Разом з тим Україна має виконати ряд вимог в галузі державного технічного регулювання, яке охоплює такі сфери, як стандартизацію, метрологію, акредитацію, оцінювання відповідності та державний технічний нагляд. Сучасне державне технічне регулювання, як і в інших країнах, ґрунтується на ризик-орієнтованому підході: держава втручається в ті сфери промисловості, де ризик продукції найбільший [1]. З метою імплементації національного законодавства до міжнародних вимог прийняті ряд Законів України: в сфері стандартизації – «Про стандар-

тизацію» № 1315-VII від 19.05.2014 р.; метрології – «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314-VII від 05.06.2014 р.; акредитації – «Про акредитацію органів з оцінки відповідності» від 17.05.2001 р. № 2407-III; підтвердження відповідності – «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» 15.01.2015 р. № 124-VIII; державний нагляд – «Про державний ринковий нагляд і контроль нехарчової продукції» № 2735-VI від 02.12.2010 р. На продукцію, яка підпадає під законодавчо регульовану сферу, поширюється дія закону «Про технічні регламенти та оцінку відповідності». На всю іншу нехарчову продукцію поширюється дія закону «Про загальну безпеку нехарчової продукції» № 2736-VI від 02.12.2010 р.

Для виробника зварювальної продукції важливо знати ці вимоги, а також процедури введення продукції в обіг. В роботі проаналізовано законодавчу базу щодо введення в обіг продукції зварювального виробництва. Також у сфері технічного регулювання діють раніше прийняті закони, які регулюють правовідносини зі споживачем продукції та продавцем – Закон України «Про захист прав споживачів», введений в дію Постановою ВР № 1024-XII від 12.05.1991 р. (ВВР, 1991, № 30), споживачем та виробником – Закон України «Про відповідальність за шкоду, завдану внаслідок дефекту продукції» № 3390-VI від 19.05.2011 р.

В цьому зв'язку виробникові необхідно орієнтуватись в цих вимогах і знати, чи підпадає його продукція, яку він випускає, під законодавчо регульовану сферу, а також які конкретно вимоги йому потрібно виконати для введення продукції в обіг. Законодавчо регульовані технічні вимоги визначе-

ні Технічними регламентами (ТР), які гармонізовані з Європейськими директивами. Технічний регламент – документ, у якому визначено характеристики продукту або пов’язані з ними процеси чи методи виробництва та випробувань, у тому числі застосовні адміністративні положення, дотримання яких є обов’язковим.

Серед зварювальної продукції, яка підлягає технічному регулюванню, зазначені наступні групи продукції (див. табл.). Відповідними наказами міністерств визначені переліки стандартів, відповідність яким підтверджує відповідність вимогам технічного регламенту.

До зварювальної продукції, яка підпадає під технічні регламенти, застосовуються процедури оцінювання відповідності, які оговорені в ТР на основі модульної концепції. Модулі з підтвердження відповідності визначені Постановою КМУ № 95 від 13.01.2016 р. «Про затвердження модулів оцінки відповідності, які використовуються для розроблення процедур оцінки відповідності, та правил використан-

ня модулів оцінки відповідності». Для підтвердження відповідності застосовується комбінація модулів. Відзначено, що майже всі комбінації схем підтвердження відповідності для відповідальної зварювальної продукції містять модулі, складовими яких є сертифікація систем управління якістю згідно зі стандартом ISO 9001:2015 (наразі в Україні діє ДСТУ EN ISO 9001:2018 (EN ISO 9001:2015, IDT; ISO 9001:2015, IDT)).

Так, згідно з Технічним регламентом будівельних виробів будівель та споруд, до якого відносяться ряд зварних конструкцій, застосовуються наступні схеми підтвердження відповідності згідно з [2]:

а) декларування продукції здійснюється з використанням модуля А (внутрішній контроль виробництва) або D (забезпечення якості виробництва);

б) сертифікація з використанням модуля В (перевірка виробу певного типу) в комбінації з модулем D (забезпечення якості виробництва) (B+D) або в комбінації з модулем F (перевірка продукції), (B+F).

Перелік технічних регламентів, дія яких поширюється на підтвердження відповідності продукції зварювального виробництва

№ з/п	Назва зварної конструкції	Назва технічного регламенту	Наказ міністерства щодо затвердження переліку НД, відповідність яким підтверджує відповідність вимогам технічного регламенту
Зварні конструкції			
1	Парові та водогрійні котли	Технічний регламент водогрійних котлів, що працюють на рідкому чи газоподібному паливі. Затверджений Постановою КМУ від 27.08.2008 р. № 748	Наказ Мінекономіки № 748 від 27.08.2008 р.
2	Прилади, що працюють на газоподібному паливі	Технічний регламент приладів, що працюють на газоподібному паливі. Затверджений Постановою КМУ 04.07.2018 р. № 814	Наказ Мінекономіки № 1227 від 11.10.2013 р.
3	Посудини, що працюють під тиском	Технічний регламент обладнання, що працює під тиском. Затверджений Постановою КМУ від 16.01.2019 р. № 27 Технічний регламент безпеки простих посудин високого тиску Постанова КМУ від 28.12.2016 р. № 1025	Наказ № 1200 від 06.08.2019 р. Мінсоцполітики України (на основі переліку гармонізованих європейських стандартів, опублікованого в Офіційному віснику ЄС С326 від 14.09.2018 р. Проте на сьогодні в цьому переліку не враховано гармонізовані європейські стандарти, які опубліковані в Офіційному віснику ЄС L 250 від 30.09.2019 р., а це ще 14 стандартів) [2] 28 грудня 2016 р. № 1025. Наказ Мінекономіки № 1455 від 10.12.2013 р.
4	Пересувне обладнання, що працює під тиском	Технічний регламент пересувного обладнання, що працює під тиском	Наказ Мінекономіки № 112 від 16.03.2009 р.
5	Зварні конструкції для будівництва, матеріали (в тому числі полімерні труби)	Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд. Затверджений Постановою КМУ від 20.12.2006 р. № 1766	Наказ Міністерства розвитку громад та територій України (Мінрегіон) № 153 від 02.07.2020 р.
Складові до зварних виробів			
6	Складові частини для залізничного транспорту, рейки	Технічний регламент безпеки інфраструктури залізничного транспорту. Затверджений Постановою КМУ від 11.07.2013 р. № 494	Міністерство інфраструктури України, Наказ № 815 від 20.11.2019 р.

7	Зварні вироби для сільськогосподарських та лісгосподарських машин	Технічний регламент щодо складових частин і характеристик колісних сільськогосподарських та лісгосподарських тракторів, їх причепів і змінних причіпних машин, систем, складових частин та окремих технічних вузлів. Затверджений Постановою КМУ 28.12.2011 р. № 1368 ТР затвердження типу сільськогосподарських та лісгосподарських тракторів, їх причепів і змінних причіпних машин, систем, складових частин та окремих технічних вузлів. Затверджений Постановою від 28.01.2011 р. № 1367	Наказ Мінекономіки № 188 від 05.02.2016 р.) [3] Наказ Мінекономіки № 2810 від 30.12.2020 р. № 188 від 05.02.2016 р.) [3]
7	Вантажопідіймальне обладнання	Технічний регламент безпеки машин. Затверджений Постановою 30.01.2013 р. № 62	Наказ Мінекономіки № 1885 від 10.11.2016 р., № 1779 від 14.09.2020 р., № 137 від 26.01.2021 р.
8	Контейнери для зберігання радіоактивних відходів	Технічний регламент щодо пакувальних комплектів для зберігання і захоронення радіоактивних відходів. Затверджений постановою КМУ від 17.10.2018 № 884	В стадії формування. (примітка: Дієв наказ Держспоживстандарту України № 398 від 09.08.2010 р.)
9	Кузови автомобілів	На заміну «ТР з технічного обслуговування і ремонту колісних транспортних засобів, який втратив чинність. Згідно статті 4 Закону України «Про дорожній рух» та частини першої статті 20 Закону України «Про автомобільний транспорт»: Постанова КМУ від 22.12.2010 р. № 1166 статті 20 Закону України «Про автомобільний транспорт» «Про єдині вимоги до конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів, що експлуатуються»	Примітка. Детально про застосування нормативних вимог в [4]
Зварювальне обладнання			
10	Зварювальне обладнання	Технічний регламент низьковольтного електричного обладнання Затверджений Постановою КМУ від 16.12.2015 р. № 1067 Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання. Затверджений постановою КМУ від 16 грудня 2015 р. № 1077 Технічний регламент безпеки машин і механізмів. Затверджений Постановою КМУ від 30.01.2013 р. № 62 Технічний регламенту обмеження використання деяких небезпечних речовин в електричному та електронному обладнанні, сформованого на основі Рішення з імплементації Комісії (ЄС) № 2020/659 від 15.05.2020 р (за необхідності застосування)	Наказ Мінекономіки № 1181 від 22.08.2018 р. у редакції наказу №309 від 22.09.2019 р. Наказ Мінекономіки № 805 від 16.04.2021 р., № 74 від 15.01.2021 р., № 2569 від 08.12.2020 р., Наказ №1043 від 27.07.2018 р. у редакції наказу № 1705 від 20.11.2018 р. Наказ Мінекономіки № 137 від 26.01.2021 р., № 1779 від 14.09.2020 р., Наказ № 1414 від 27.09.2017 р. у редакції наказу 27.07.2018 р. № 1044, № 1885 від 10.11.2016 р. Наказ Мінекономіки № 84 від 18.01.2021 р.
Засоби індивідуального захисту			
11	Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)	Технічний регламент засобів індивідуального захисту. Затверджено постановою КМУ від 21.08.2019 р. № 771	Наказ Мінекономіки № 1462 від 10.12.2013 р. № 281-21 від 21.07.2021 р.

При цьому, при відсутності системи управління якістю і неможливості застосувати модуль D, обсяг сертифікаційних випробувань різко збільшується і необхідно проходити перевіряння майже кожної одиниці продукції згідно з модулем F. Тому важливо мати систему управління якістю на підприємстві, що виробляє зварні конструкції.

Необхідно зазначити, що на даний час діють ряд стандартів, які конкретизують вимоги ISO 9001 для тієї чи іншої галузі:

1. ISO/TS 16949 (ИСО/ТУ 16949) – вимоги до систем менеджменту якості підприємств, що займаються проектуванням, розробкою, виробництвом, установкою і обслуговуванням продукції автомобільної промисловості;

2. TL 9000 «Висока якість для постачальників в сфері комунікації» (Quality Excellence for Supplies of Telecommunications);

3. AS 9100 /EN 9100 «Системи менеджменту якості – Аерокосмічна промисловість. Вимоги»;

4. IRIS (International Railway Industry Standard) «Міжнародний стандарт залізничної промисловості», розроблений Асоціацією Європейської Залізничної Промисловості;

5. Серія стандартів EN ISO 3834 – регламентують вимоги до менеджменту при зварюванні, обсяг і організацію контролю, необхідні процедури. Серія стандартів ISO 3834 складається з шести частин, об'єднаних загальною назвою «Вимоги до якості виконання зварювання плавленням металевих матеріалів». Вони встановлюють: всебічні вимоги до якості (частина 2-ї серії, стандарт – ДСТУ EN ISO 3834-2:2019 (EN ISO 3834-2:2005, IDT; ISO 3834-2:2005, IDT); типові вимоги до якості (частина 3-ї серії, стандарт – ДСТУ EN ISO 3834-3:2019 (EN ISO 3834-3:2005, IDT; ISO 3834-3:2005, IDT); елементарні вимоги до якості (частина 4-ї серії, стандарт ДСТУ EN ISO 3834-4:2019 (EN ISO 3834-4:2005, IDT; ISO 3834-4:2005, IDT). Також сюди входять: частина 5 – документи, вимоги яких потрібно виконувати для підтвердження відповідності ISO 3834-2, ISO 3834-3 чи ISO 3834-4 і частина 6 – ISO/TR 3834-6:2009 «Настанови по виконанню вимог» ISO 3834.

В контактному зварюванні для забезпечення деталізації вимог до системи управління діють: ДСТУ EN ISO 14554-1:2015 (EN ISO 14554-1:2013, IDT; ISO 14554-1:2013, IDT) «Вимоги до якості зварювання. Електричне контактне зварювання металевих матеріалів. Частина 1. Всебічні вимоги до якості» та ДСТУ EN ISO 14554-2:2015 (EN ISO 14554-2:2013, IDT; ISO 14554-2:2013, IDT) «Вимоги до якості зварювання. Електричне контактне зварювання металевих матеріалів. Частина 2. Елементарні вимоги до якості».

Деталізація вимог до системи управління зварювального виробництва розглянута в [4–6].

Аналіз нормативних документів показав, що в випадку застосування ТР виробнику необхідно:

1. Визначити класифікацію конструкцій за ТР (наприклад, «Група посудини I, II, III, IV, згідно ТР безпеки обладнання, що працює під тиском», і в зв'язку з цим визначити спеціальні вимоги до конкретної групи посудини).

2. Провести аналіз вимог стандартів, відповідність яким підтверджує відповідність ТР (сайт Мінекономіки/діяльність/технічне регулювання/стандартизація).

3. Визначити показники якості, які встановлюються технічним регламентом до процесів життєвого циклу конструкції:

3.1. проектування, яке враховує:

- визначення дій на конструкції;
- аналіз ризиків, які виникають у зв'язку з використанням конструкції, для визначення рівня її небезпеки;
- аналіз ризиків неналежного застосування (конструювання таким чином, щоб запобігти виникненню небезпеки);

– вибір розрахункових моделей;

3.2. виготовлення:

– вимоги до матеріалів, в тому числі необхідність сертифікації;

– вимоги до технологічних процесів, в тому числі попередня атестація (сертифікація) процесів зварювання;

– вимоги до підготовки персоналу, в тому числі атестація (сертифікація) персоналу;

3.3. приймання конструкції:

– обов'язкові показники безпеки конструкції;

– види та обсяги контролю;

3.4. вимоги до введення в обіг конструкції, в т.ч. надання необхідної документації.

4. Визначити показники якості, встановлені в ТР, в тому числі в формі Декларації відповідності, яка додається до ТР, які не вимірювались до цього або були нижчими за чинні.

5. Провести аналіз технічних можливостей підприємства. Визначити та виконати дії та забезпечити ресурсами підрозділи для досягнення запланованих показників і можливостей їх вимірювання.

6. Провести випробування виготовлених зразків продукції і впевнитись, що продукція відповідає вимогам ТР.

7. Розробити та впровадити елементи системи управління якістю виробництва згідно з ДСТУ EN ISO 9001:2018 (EN ISO 9001:2015, IDT; ISO 9001:2015, IDT). Встановити цільові показники безпеки та якості процесів не нижчі за ті, що встановлені в ТР.

8. Скласти «Декларацію про відповідність продукції».

9. Підготувати підприємство та пройти процедуру оцінювання відповідності за модульним підходом згідно з вимогами ТР.

При цьому модулі з оцінки відповідності можуть містити:

- контроль виробництва з боку виробника;
- декларування відповідності виробником;
- експертизу відповідності типу з боку органу з сертифікації;
- перевірку виробництва з боку органу з сертифікації;
- оцінювання системи управління з боку органу з сертифікації;
- проведення випробувань в акредитованій випробувальній лабораторії.

10. На підставі пройденної процедури з оцінки відповідності виконується маркування продукції знаком відповідності для розміщення її на ринку.

Програми нагляду з боку органів інспектування розробляються з боку інспекційних органів з урахуванням ступеню ризиків, пов'язаних з тією чи іншою продукцією. З метою визначення ступеню ризику застосовується положення документа Постанова КМУ № 342 від 10.05.2018 р. «Про затвердження методик

розроблення критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від впровадження господарської діяльності» та визначається періодичність проведення планових заходів державного нагляду (контролю), а також уніфікованих форм актів, що складаються за результатами проведення планових (позапланових) заходів державного нагляду (контролю).

Висновки

В роботі проаналізовано сучасний стан технічного регулювання зварювальної продукції підвищеної небезпеки. Відзначено, що основними аспектами діяльності, які підлягають технічному регулюванню, є стандартизація, метрологія, акредитація, оцінювання відповідності, технічний нагляд. Наведено законодавчу базу України, яка встановлює вимоги до цієї діяльності.

Відзначено, що ступінь технічного регулювання продукції пропорційний ризику, який з нею пов'язаний. На продукцію, яка містить серйозний ризик, поширюється дія технічних регламентів. Визначено, яка зі зварювальної продукції підпадає під дію технічних регламентів, які саме технічні регламенти на неї поширюються та наведено відповідні накази Міністерств, які затверджують перелік нормативних документів, відповідність яким підтверджує відповідність технічним регламентам.

Аналіз нормативних документів показав, що для введення в обіг зварювальної продукції в основному застосовуються процедури з комбінації модулів підтвердження відповідності, складовою яких є сертифікація систем управління згідно зі стандартом ДСТУ EN ISO 9001:2018 (EN ISO 9001:2015, IDT; ISO 9001:2015, IDT).

Проведено аналіз діючого нормативного поля і зазначені стандарти, які визначають галузеві вимоги до системи управління якістю виробництва зварювальної продукції відповідального призначення.

Визначено план дій для підприємства, який має на меті виробляти і ввести в обіг продукцію відповідального призначення зварювального виробництва.

Список літератури

1. Віткін Л., Лапач С. (2007) Як визначити ступінь небезпеки продукції. *Стандартизація, сертифікація, якість*, 3, 48–54.
2. Папазов В., Папазова О., Махамадєй Н., Щербаків П. (2020) Про новий технічний регламент обладнання, що працює під тиском. *Додаток до журналу «Охорона праці»*, 3, 50–60.
3. Кравчук В.І., Цема Т.В., Афанасьєва С.С. та ін. (2018) Порівняльний аналіз національних вимог для затвердження типу тракторів, причепів, причіпних машин з новими європейськими нормами. *Збірник наукових праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого*, 22(36), http://www.ndipvt.com.ua/zbirnyk_2018_5.html.
4. Міністерство інфраструктури. *Технічне регулювання на транспорті*. <https://mtu.gov.ua/content/tehnichne-regulyuvannya-na-transporti.html?PrintVersion>.
5. Бондаренко Ю.К., Ковальчук О.В. (2020) Дослідження впливу джерел ризиків на технічну безпеку зварних конструкцій при експлуатації з використанням неруйнівного контролю та технічної діагностики. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 49–57.
6. Бондаренко Ю.К., Ковальчук О.В. (2017) Оценка риска эксплуатации сварных конструкций на основе мониторинга процессов системы управления качеством и проведения испытаний методами НК и ТД. *Там же*, 3, 56–62.
7. Бондаренко Ю.К., Ковальчук О.В. (2018) Ідентифікація ризиків при виробництві зварних конструкцій на підставі ризик-менеджменту на підприємстві. *Там само*, 3, 47–57.

References

1. Vitkin, L., Lapach, S. (2007) How to determine the hazard level of products. *Standartyzatsiya, Sertyfikatsiya, Yakist*, 3, 48–54 [in Ukrainian].
2. Papazov, V., Papazova, O., Makhamadei, N., Shcherbakov, P. (2020) On new technical regulations of pressure equipment. *Okhorona Pratsi, Suppl.*, 3, 50–60 [in Ukrainian].
3. Kravchuk, V.I., Tsema, T.V., Afanasieva, S.E., Lysak, L.I., Ryzhkova, S.A., Gorbatova, I.V. (2018) Comparative analysis of national requirements for approval of type of tractors, trailers, trailer trucks with new European codes. In: *Transact. of UkrNDIPVT*, 22(36) [in Ukrainian]. http://www.ndipvt.com.ua/zbirnyk_2018_5.html.
4. Ministry of Infrastructure. *Technical regulation in transport*. <https://mtu.gov.ua/content/tehnichne-regulyuvannya-na-transporti.html?PrintVersion>.
5. Bondarenko, Yu.K., Kovalchuk, O.V. (2020) Investigation of the influence of risk sources on technical safety of welded structures in operation with application of nondestructive testing and technical diagnostics. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 49–57 [in Ukrainian].
6. Bondarenko, Yu.K., Kovalchuk, O.V. (2017) Evaluation of risk of welding structures service using monitoring of processes of the quality control system and testing using NT and TD methods. *Ibid.*, 3, 56–62 [in Ukrainian].
7. Bondarenko, Yu.K., Kovalchuk, O.V. (2018) Risk identification in fabrication of welded structures in order to introduce risk-management at the enterprise. *Ibid.*, 3, 47–57 [in Ukrainian].

MODERN LEGAL AND NORMATIVE REQUIREMENTS TO WELDED PRODUCTS

Yu.K. Bondarenko, O.V. Kovalchuk

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

Current state of international and state technical regulation was analyzed. Ukraine is taking a number of important steps, in order to bring Ukrainian legislation in the field of technical regulation to the level of international requirements. Proceeding from analysis of normative documents, it was determined, which welded products are covered by technical regulations, harmonized with European Directives, which are mandatory for application. Orders of the respective Ministries are indicated, which determine the lists of standards, compliance with which confirm the correspondence to requirements of technical regulations. It is defined that assessment of the compliance of critical welded products is performed with application of a combination of modules, a component of which is certification of quality management system. The field of normative documents was analyzed in terms of specific requirements to quality management system that apply in different industries. The plan of action was determined for welding production plants, which has the objective to introduce measures to ensure product compliance with the requirements of technical regulations. 6 Ref., 1 Tabl.

Keywords: technical regulation, welded products, welded structure, product risks, risk-oriented approach, procedures for confirmation of welded product compliance

Надійшла до редакції 05.05.2021

II НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ»

6-10 вересня 2021 р. в Одесі в готелі «Аркадія» відбулась II науково-практична конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану», яка була організована Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, Українським товариством неруйнівного контролю і технічної діагностики та Міжнародною Асоціацією «Зварювання». Інформаційну підтримку конференції надали журнали «Автоматичне зварювання» та «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Конференцію відкрив вітальним словом академік НАН України, директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона акад. Кривцун І.В. Він відзначив значну роль неруйнівного контролю та моніторингу технічного стану в промисловості, будівництві та на транспорті в сучасній Україні.



Виступ академіка І.В. Кривцуна при відкритті конференції

Конференція хвилиною мовчання віддала шану колегам, що пішли з життя в останній рік – Ткаченку А.А., директору «INTROSKOP NDT SRL», м. Кишинів; президенту Молдавського товариства НКТД, Горкунову Е.С., академіку РАН, президенту Російського товариства НКТД в 2014-17 рр.; Мітко Міховськи, президенту Болгарського товариства НК; Якубовичу І.П., провідному фахівцю НВФ «Діагностичні прилади».

В пленарних засіданнях конференції взяли участь більше 50 учених та спеціалістів з України, Німеччини та Естонії. На них було заслухано 27 доповідей. Ще 10 стендових доповідей було представлено авторами, які з різних причин не змогли приїхати в Одесу. В цілому на конференцію подали доповіді або брали участь в роботі без доповіді представники 30 підприємств та організацій з 17 міст. Тези доповідей, що були подані на конференцію, видано окремою збіркою. Її співавторами стали 108 фахівців.

Одночасно працювала виставка засобів та матеріалів неруйнівного контролю та технічної діагностики, на якій 6 провідних підприємств України демонстрували свої найкращі розробки останніх років та пропонували передові технології і обладнання від своїх закордонних партнерів з усього світу.

Перше пленарне засідання розпочалось з доповідей представників Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (Львів).

Д.т.н. Учанін В.М. в доповіді «Нотатки про майбутнє революцію у неруйнівному контролі», розпочав дискусію про майбутнє НК та можливу роль науковців України. Тут важливо визначити основні напрямки розвитку технологій НК на основі власного бачення, показати та популяризувати перспективні українські проекти як можливі зародки технологій NDE 4.0. Приклади українських напрацювань у цих напрямках на прикладі вихрострумового методу НК: автоматизація і роботизація (система ВК «Краб»), інтелектуалізація засобів НК та реалізація принципів адаптивності (система ВК контролю виробів зі складною геометрією, в яких сканування здійснюється за допомогою робота), тривимірна візуалізація результатів НК методами обчислювальної томографії. В другій доповіді «Вихрострумний автогенераторний дефектоскоп з автоматичним налаштуванням на заданий рівень чутливості» Учанін В.М. показав, що для виявлення поверхневих дефектів успішно впроваджено автогенераторні вихрострумні дефектоскопи (ВД) типу ЛЕОТЕСТ (ВД 3.01Н; ВД 3.2Н і ВД 3.03Н), які пройшли державні випробування і включені в регламент з технічного обслуговування літаків ДП «АНТОНОВ» і двигунів ДП «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС» і ПАТ «МОТОР-СІЧ». Розроблений ВД забезпечує можливість точного відтворення рівня



Доповідь В.М. Учаніна

чутливості, який прописано в методиці контролю, незалежно від кваліфікації оператора. В третій доповіді доповідач розповів про нові вихрострумові перетворювачі магнітної анізотропії (ВСПМА) з феритовими осердями, які дозволяють розширити діапазон частот щонайменше до 50 кГц.

Д.т.н. Юзефович Р.М. в доповіді «Підходи до побудови систем вібродіагностики» обґрунтовано показав, що ефективними сучасними засобами вібродіагностики є інформаційно-вимірювальні комплекси, які поєднують у собі набір різноманітних первинних перетворювачів, обладнаних бездротовими каналами передачі інформації з можливістю поєднання в локальну цифрову мережу передачі даних. Такі комплекси використовують функції зберігання зареєстрованих вібраційних сигналів, та систему багатоканального збору інформації з можливостями апаратної попередньої обробки вхідних сигналів та комп'ютерним програмним забезпеченням повноцінної сигнальної обробки для формування діагностичних висновків. В другій доповіді «Система відбору вібраційних сигналів для діагностики обертових механізмів» Юзефович Р.М. представив багатоканальну портативну систему для відбору та обробки вібраційних сигналів з метою виявлення і попередження аварійних ситуацій на механізмах з обертним або обертково-поступальним рухом. Давачами вібраційного сигналу є п'єзокерамічні акселерометри промислового типу.

Спільну доповідь від Одеського припортового заводу та ІЕЗ ім. Є.О. Патона представив начальник відділу технічного нагляду ОПЗ Ободовський Б.М. – «Впровадження технології акустико-емісійного моніторингу на ОПЗ», в якій розповів про досвід використання системи інтегрального моніторингу технічного стану небезпечних виробничих об'єктів з застосуванням методу акустичної емісії (АЕ). Наведено результати застосування методу АЕ на прикладі моніторингу і контролю сховищ аміаку ST-1... ST-4 у цеху перевантаження аміаку, окремих ліній та агрегатів у цеху виробництва аміаку, а також об'єктів станції розподілу повітря цеху водообробки. Аналіз результатів термографічного контролю та АЕ моніторингу дозволив



Доповідь Б.М. Ободовського

зробити висновок щодо наявних проблем з температурним станом та ізоляцією корпусу аміакосховища ST-4. Автоматизовані системи ЕМА, розроблені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України спільно з угорськими фахівцями, визначають ступінь небезпеки стану об'єктів з локалізацією місць можливого руйнування, прогнозують руйнівне навантаження при поточних умовах експлуатації, оцінюють залишковий ресурс конструкцій.

Друге пленарне засідання першого дня було віддано доповідям спонсорів конференції та учасникам виставки засобів технічного контролю.

Представник генерального спонсора, директор Асоціації «ОКО» Луценко Т.М. в своїй доповіді «Перспективи і розвиток компаній Асоціації «ОКО» в нових умовах сучасного світу» розповіла про значний науковий та виробничий потенціал УкрНДІНК, що дозволяє розробляти сучасні засоби неруйнівного контролю, а тісно співпрацюючи з виробничими підприємствами «Ультракон-Сервіс» та «Промприлад», що також входять в Асоціацію «ОКО», ці розробки успішно впроваджуються в різних галузях промисловості: машинобудуванні, енергетиці, металургії, нафтогазовій галузі, залізничному та авіаційному транспорті. На сьогоднішній день прилади та системи, розроблені Асоціацією «ОКО», використовуються майже у сорока країнах світу, таких, як: США, Німеччина, Туреччина, Китай, Японія, Канада, Франція, Сінгапур, Індонезія, Італія, країни СНД, Балтії та інші.



Доповідь Т.М. Луценко

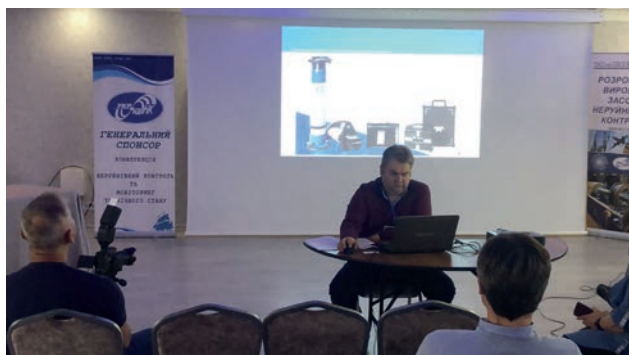
У доповіді провідного спеціаліста УкрНДІНК Верютіна М.В. «Системи вихрострумового контролю авіаційних коліс серії SMARTSCAN» висвітлена тема виконання неруйнівного контролю коліс сучасного авіаційного парку. Розглядаються методи НК, які на сьогоднішній день є актуальними і застосовуються в авіаремонтних підприємствах. Показується важливість проведення вихрострумового контролю і варіанти його реалізації на авіаремонтних підприємствах. Розглядаються ручний і автоматизований варіанти реалізації вихрострумового контролю, переваги і недоліки кожного з них. У другій його до-



Представники Асоціації «ОКО»

повіді «Перша вітчизняна система швидкісного контролю залізничної колії OKOSCAN 73HS» мова йшла про розробку і впровадження на залізниці Туреччини (TCDD) швидкісної системи неруйнівного контролю (ультразвуковий і вихрострумний) рейок OKOSCAN 73HS, яка розроблена відповідно до вимог європейських стандартів і забезпечує контроль рейок на швидкості до 40 км/год (з можливістю збільшення швидкості контролю до 60 км/год).

Представник офіційного спонсора, директор НВФ «Діагностичні прилади» Павлій О.В. в доповіді «Науково-виробнича фірма «Діагностичні прилади» – 25 років пошуку та досвіду» розповів про етапи становлення фірми та представив зарубіжних партнерів, чії технології та засоби НК поставляються фірмою на підприємства України. Особливий інтерес викликала друга доповідь Павлія О.В. – «Радіаційні методи неруйнівного контролю: сучасний стан і перспективи розвитку», в якій він розповів про шляхи розвитку джерел іонізуючого випромінювання: зменшення розмірів фокусної плями та масо-габаритних показників, покращення характеристик потужності джерел. Також він розповів про стан розробок, переваги та недоліки детекторів, фосфатних пластин та традиційних рентгеновських плівок та підкреслив, що правильний вибір джерел та детекторів іонізуючого випромінювання дозволяє забезпечити високу якість робіт з рентгеновського контролю, з мінімальними дозами випромінювання та високою достовірністю рентгеновських зображень.



Доповідь О.В. Павлія

Провідний фахівець НВФ «Діагностичні прилади» Козін О.М. в доповіді «OmniScan X3 від OLYMPUS завойовує довіру у споживачів» розповів про те, що навесні 2020 р. лідер УЗК з використання фазованих решіток Olympus випустив OmniScan X3 – вдосконалений сучасний дефектоскоп на фазованих решітках. Потужні інструменти, такі, як метод загального фокусування (TFM) та покращені засоби візуалізації, дозволяють із впевненістю виконати контроль. Доповідач детально зупинився на технічних характеристиках нового дефектоскопа, який стане в нагоді вітчизняному споживачу.

Представник спонсора Козарчук Д.В. в доповіді «Комплексні рішення для галузевих лабораторій від компанії «Хімлаборреактив» розповів про напрямки роботи компанії. ХЛР пропонує рішення для контролю якості на всіх стадіях технологічного процесу: від видобутку сировини до виробництва кінцевого продукту, від контролю технічних параметрів продукту до параметрів умов праці. Для вирішення поставлених завдань в активі компанії значна матеріальна база та тісні партнерські відносини з кращими світовими виробниками лабораторного обладнання. Крім цього, ХЛР пропонує загальнолабораторне обладнання, обладнання для контролю навколишнього середовища та охорони праці, лабораторні меблі, посуд і реактиви, стандартні зразки і еталони, обладнання для лабораторій ПММ.

Директор НВФ «Ультракон» Павлій І.В. розповів про нові розробки фірми. Слід зазначити, що НВФ «Ультракон» пропонує на ринку засоби технічного контролю власної розробки і виробництва. Це ультразвукові та вихрострумні дефектоскопи і товщиноміри, твердоміри та ін.

Вперше у виставці засобів технічного контролю взяло участь ТОВ «Еталон-Прилад» з Харкова. Його представники Боклаг М.В. і Корнієнко О.С. представили доповідь «Сучасні прилади неруйнівного контролю фірми «Starmans electronics».

Керівник відділу УДВП «Ізотоп» Король О.М. розповіла про обладнання та матеріали, що поставляються на підприємства та в медичні установи України цією організацією з багаторічним досвідом. Зокрема, вона приділила увагу гамма-дефектоскопам та іншим засобам неруйнівного контролю.

Не менш насиченими були пленарні засідання наступного дня. Відзначимо найпомітніші доповіді другого дня.

Завідувач відділу ІЕЗ ім. Є.О. Патона, д.т.н. Махненко О.В. в доповіді «Розрахункова оцінка несучої здатності головних прогонових балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві за результатами неруйнівного контролю», розповів про проведений в 2020 р. неруйнівний контроль головних прогонових балок мосту, при якому були виявлені досить значні корозійні

пошкодження в зоні з'єднання стінки з полкою. Результати чисельного визначення НДС прогонової балки показали, що наявність локальних корозійних дефектів в різних характерних зонах балки в зоні з'єднання стінки з полкою не викликає суттєвого підвищення повздовжніх напружень в цих зонах та зварна конструкція головних прогонових балок мосту ім. Є.О. Патона має досить значний коефіцієнт запасу статичної міцності стосовно нормативного розподіленого навантаження. Було представлено дві доповіді, які торкалися давньої проблеми атомних станцій – «Нові аспекти пошкоджуваності металу вузла зварного з'єднання колектора з патрубком Ду1200 парогенератора ПГВ-1000», «Визначення залишкових напружень в вузлі приварювання колектору до патрубка Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000 після локальної термічної обробки».



Доповідь О.В. Махненко

В доповіді «Фрактальна параметризація, як допоміжний засіб при моніторингу технічного стану зварних конструкцій» проф. Усов В.В. з ОНУ ім. Ушинського (Одеса) доповів про результати сумісного дослідження з ІЕЗ ім. Є.О. Патона та НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» про використання методу фрактального аналізу як експрес методу неруйнівного контролю. Для вивчення експлуатаційного стану конструкцій запропоновано комплексний підхід, орієнтований на пошук кореляційних залежностей між фрактальними параметрами структури та показниками фізико-механічних властивостей матеріалів, зокрема текстурної обстановки, коерцитивної сили, механічних характеристик матеріалів.

Дві доповіді зробив Учанін В.М.: «Магнітопружні давачі для безконтактного визначення механічних напружень і крутного моменту обертальних вузлів» та «Контроль шаруватих феромагнітних матеріалів коерцитиметрами з приставними давачами».

Гість із Німеччини Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Mook із Otto von Guericke University Magdeburg розповів про «Методики цікавого навчання вихрострумовому контролю».



Доповідь Prof. Gerhard Mook

Ще ряд доповідей було представлено ІЕЗ ім. Є.О. Патона:

«Основні напрямки робіт в ІЕЗ ім. Є.О. Патона з розвитку технологій неруйнівного контролю», Посипайко Ю.М.

• «Дистанційне діагностування технічного стану промислових димових труб пасивним тепловізійним методом», Глуховський В.Ю.

• «Рівні якості зварних з'єднань для системи автоматизованого візуального контролю», Литвиненко В.А.

• «Ширографічна система для неруйнівного контролю якості елементів стільникових панелей з використанням вакуумного навантаження», Шуткевич О.П.

• «Про роботу Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики», Посипайко Ю.М.



Учасники виставки



Під час засідання

Відповідальний секретар Технічного комітету стандартизації №78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», Щупак С.О у своїй доповіді «Стандартизація і сертифікація в сфері неруйнівного контролю в Україні» розповіла про новини стандартизації і сертифікації, про структуру, напрямки діяльності та основні досягнення ТК 78. Зусиллями ТК-78 в Україні введено в дію біля 200 стандартів у галузі неруйнівного контролю. Також ТК 78 робить багато кроків, спрямованих на поступове забезпечення відповідності вітчизняних стандартів технічним регламентам ЄС, усунення розбіжностей між системами стандартизації та оцінки відповідності. Користуючись хорошим інтернетом в залі, Щупак С.О. продемонструвала наживо, як користуватись базами даних стандартів ISO, EN та ДСТУ.

УЧАСНИКИ ВИСТАВКИ ПРИЛАДІВ, ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ: УкрНДІНК, «Ультракон-сервіс», «Промприлад», «Діагностичні прилади»,

«ХІМЛАБОРРЕАКТИВ», «ОНІКО», «Ультракон», «Еталон-Прилад».

Паралельно проходила X Міжнародна конференція «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів» (LTWMP-2021), яка також була організована ІЕЗ ім. Є.О. Патона та Міжнародною Асоціацією «Зварювання».

Оргкомітет конференції вдячний спонсорам – УкрНДІНК, НВФ «Діагностичні прилади», ТОВ «Хімлаборреактив», учасникам виставки, авторам доповідей та всім, хто приїхав на конференцію в Одесу. Бажаємо всім професійних успіхів та особистого щастя. Ми сподіваємось, що конференція, виставка та час, проведений в Одесі, були корисні для Вас. І ми ще не раз зустрінемося з Вами в цьому чудовому місті! А наступного, 2022 року, конференція запланована на 12 – 16 вересня.

Юрій Посипайко, Ірина Романова



Учасники конференцій НКМТС-2021 та LTWMP-2021

VII МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ HIGHMATTECH-2021

З 5 по 7 жовтня 2021 р. у Києві в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відбулася VII Міжнародна конференція HighMatTech-2021. Конференція проводилась у офлайн та онлайн режимах, мова конференції англійська.

Організаторами конференції виступили Українське матеріалознавче товариство ім. І. М. Францевича, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», МОН України та Міжнародний науковий комітет, до складу якого увійшли Andrey Ragulya, Yury Solonin, Petro Loboda, Maryna Storozhenko, Gennadiy Bagliuk, Yuriy Bogomol, Andriy Buketov, Sergiy Firstov, Tetyana Konstantinova, Yevstakhiy Kryzhanivkyu, Tetyana Prikhna, Viktor Rud, Anatoliy Sanin, Volodymyr Turkevych, Ihor Zavaliy, Roman Yavetskiy, Oleksandr Vasiliev, Petro Smertenko (Ukraine); Levan Chkhartishvili (Georgia); Yury Gogotsi, Richard Haber (USA); Mathias Herrmann (Germany); Viktor Mironov (Latvia); Lech Pawlowski (France); Maksim Antonov (Estonia); Virupaxi Auradi (India).

Урочисто відкрив конференцію голова оргкомітету к.т.н. Олександр Васильєв (Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, Україна). Пленарні доповіді представили відомі вчені: проф. Andrey Ragulya (President of Frantsevich Ukrainian Materials Research Society, Kyiv, Ukraine); Prof. Gogotsi Yury (Drexel University Materials Science & Engineering, Philadelphia, USA); Dr. Franke Ralf (International Sales Manager Eastern Europe); Prof. Prichna Tatiana (Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine); Antonov Maksim (Tallinn Technical University, Estonia);



Представники міжнародного наукового комітету конференції HighMatTech-2021

Bilan Iryna (Frantsevich Institute for Problems of Materials Science National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine); Prof. Igor Lukyanchuk (University of Picardy, France Laboratory of Cond. Mat. Physics, Amiens, France).

Конференція була присвячена матеріалознавчим питанням від фундаментальних основ сучасного матеріалознавства до розроблення сучасних матеріалів та їх практичного використання, вивченню їх фізико-хімічних та механічних властивостей, а також новим технологіям. Робота конференції проходила у вигляді пленарних доповідей, тематичних симпозіумів та стендових презентацій. Усього було представлено 110 робіт, з яких 48 доповідей наживо. У конференції приймали участь фахівці, які працюють у різних галузях знань, включаючи фізику, хімію, медицину, біологію, металознавство тощо. Актуальними напрямками у роботі конференції були: композиційні матеріали, інженерія поверхні та захисні покриття, метали та сплави, наноматеріали, кераміка.

Від колективів авторів, співробітників Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України були представлені доповіді, присвячені перспективним технологіям отримання зварних з'єднань при підводному та лазерному зварюванні, а також вивченню структурно-фазових особливостей цих з'єднань:

«Use of mathematical modelling to optimize the external influence on the processes in the dislocation structure during underwater welding», *Berdnikova Olena, Maksimov Sergey, Prilipko Olena*;

«Laser spot welding in different spatial positions», *Bernatskyi Artemii, Berdnikova Olena, Kushnarova Olha, Klochkov Illia, Motrunich Sviatoslav*.

Також дослідниками Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України у співавторстві із співробітниками з Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України були представлені доповіді:

«High Young's modulus magnesium alloy strengthening by icosahedral quasicrystals», *Maksymchuk Ihor, Khrypliviy Anatoliy, Frizel Viktor, Khokhlova Julia, Khokhlov Maxim*;

«Magnetic, electric and thermoelectric properties of $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Co/SiO_2 and Co/TiO_2 ferromagnetic nanocomposites», *Baibara Oleksii, Radchenko M.V., Bykov O.I., Stelmakh Y.A., Krushinskaya L.A., Ievtushenko A.I.*

Доповіді конференції HighMatTech-2021 опубліковані в електронному вигляді, з ними можна ознайомитися на сайті інституту Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

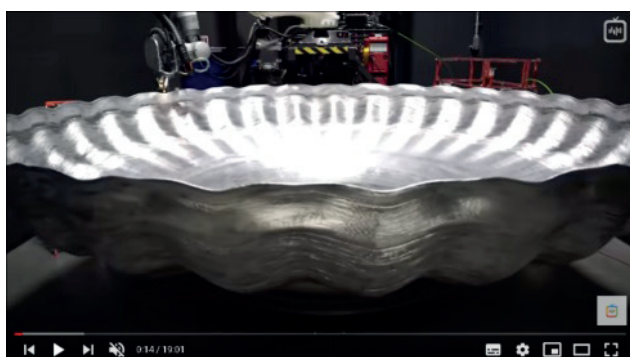
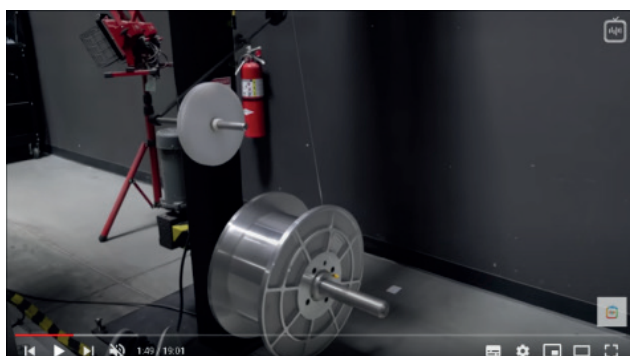
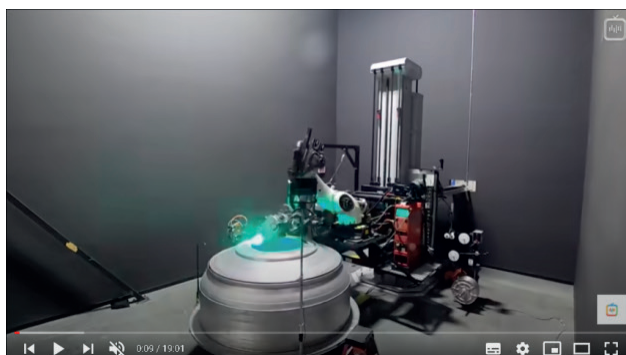
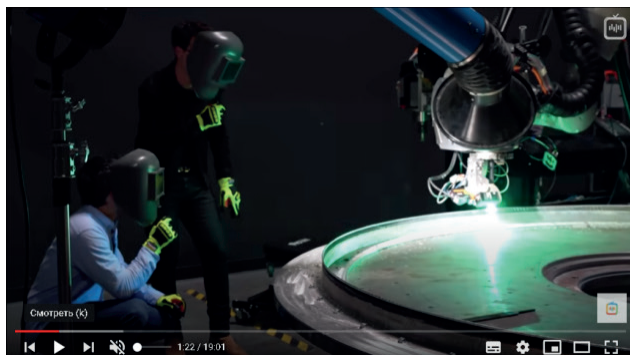
Олена Берднікова

3D-ДРУК КОСМІЧНИХ РАКЕТ

(чи відбудеться руйнування традиційної космічної промисловості?)

Компанія «Relativity Space» (США) розробила технологію та обладнання для 3D-друку корпусу та паливних баків космічних ракет. Ракета висотою 30 м друкується за 60 днів. Використовується гібридна зварювальна технологія «дуга + лазер»,

швидкість друку 25,4 см/с, матеріал для друку – алюміній. Всі розміри при друці витримуються з точністю за волосину людини (до 0,1 мм). Шорсткість збільшує масу на 5...10 %, але вона не впливає на аеродинамічні властивості корпусу ракети.



<https://m.youtube.com/watch?v=6d-Rhi5kRyw&feature=youtu.be>

ГІБРИДНИЙ ОПТИКО-ЦИФРОВИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ

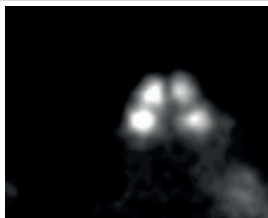
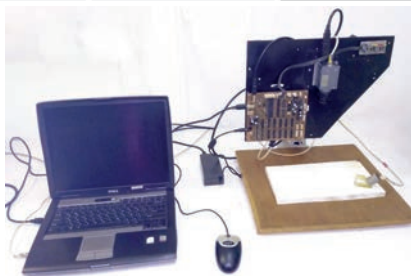
Призначення: Виявлення технологічних та експлуатаційних підповерхневих дефектів у шаруватих композитних і метало-композитних елементах конструкцій та з'єднаннях «композит–композит» і «метал–композит» з метою оцінювання їх надійності та ресурсу.

Область застосування: літальні апарати авіакосмічної техніки, композитні та метало-композитні елементи та з'єднання машинобудівних та будівельних конструкцій.

Основні технічні характеристики та переваги: Робота гібридного оптико-цифрового пристрою базується на виявленні підповерхневих дефектів за динамічними спекл-зображеннями поверхні шаруватих композитних і метало-композитних елементів конструкцій під час їх ультразвукового збудження.

Частота зміни кадрів	до 10 с ⁻¹	Особливості функціонування: - простота конструкції, відсутність інтерферометра; - набагато менша чутливість до вібрацій та інших завад, більша площа захоплення ділянки поверхні; - можливість виявляти дефекти більших розмірів; - здатність працювати в натурних умовах; - можливість сканувати поверхню зразка розмірами 30×30 см (сканування більшої площі з додатковим устаткуванням).
Поле зору	60×45 мм	
Час зміни поля зору	1...3 с	
Товщина досліджуваного зразка	до 10 мм	
Виявлення дефектів розмірами	до 40 мм	
Глибина залягання	до 8 мм	

Макет оптико-цифрового пристрою та приклади виявлення глухого отвору глибиною 3 мм у композитній панелі товщиною 4 мм за різної частоти ультразвукового збудження



Виявлення глухого отвору на частоті 35,5 кГц



Виявлення глухого отвору на частоті 12,5 кГц

Стан розробки: виготовлено та випробувано макетний зразок.

Галузі застосування: Розроблена на основі пристрою методика виявлення внутрішніх дефектів у композитних і метало-композитних структурах може знайти застосування у ДП «КБ «Південне»», ДП «АНТОНОВ», ТОВ «Сіка Україна» та інших підприємствах авіакосмічної та будівельної галузей.



Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України,
e-mail: kuts@ipm.lviv.ua

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ДАТЧИКИ ВІБРОПЕРЕМІЩЕННЯ ТА ВІБРОШВИДКОСТІ

Призначення: оцінка вібраційного стану обертових та необертових частин механізмів ТЕС, ТЕЦ і інших промислових об'єктів.

Область застосування: підприємства енергетики, нафтової, вугільної та газової промисловості.

Основні технічні характеристики та переваги:

- діапазон вимірювання розмаху вібропереміщення від 20 до 1000 мкм з дискретністю 1 мкм та відносного переміщення від 20 мкм до 4 мм;
- діапазон частот вимірювання розмаху вібропереміщення від 0,05 до 500 Гц;
- діапазони вимірювання СКЗ віброшвидкості від 0,5 до 50 мм/с;
- діапазон частот вимірювання віброшвидкості від 0,5 до 200 Гц та від 5 до 1000 Гц.

Особливості функціонування:

Датчики безперервно визначають поточні значення вібропереміщення, віброшвидкості та спектральні характеристики; формують аналогові і цифрові сигнали, придатні для передачі та обробки в зовнішніх інформаційно-вимірювальних системах аналізу й вібродіагностики з автоматичною компенсацією впливу температури та нелінійності амплітудно-частотної характеристики первинного перетворювача з автоматичною перевіркою функціонування.

Стан розробки: інтелектуальні датчики створено, випробувано та використовуються на підприємствах енергетики.



Інтелектуальні датчики вібропереміщення



Встановлення датчиків на щітково-контактному апараті турбоагрегата

Інститут проблем машинобудування НАН України ім. А.М. Підгорного,
e-mail: shulzhenko@ipmach.kharkov.ua

ДАТИ, ПОДІЇ, ФАКТИ З ІСТОРІЇ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

2 липня 1929 р. американський винахідник і бізнесмен Едвард Бадд (1870-1946) отримав патент на технологію зварювання в автопромисловості. Він був піонером масового виробництва суцільнометалевих автомобільних кузовів. Заснована ним фірма «Едвард Бадд Меньюфекчурінг Компані» виготовляла сталеві кузова для легкових автомобілів, вперше застосовуючи точкове зварювання. Попередньо спеціалісти фірми виконали великий обсяг робіт з механічних випробувань точкових зварних з'єднань та рамних конструкцій кузовів в цілому



2 липня 1862 р. народився Вільям Генрі Брегг (помер 12.03.1942 р.) – британський фізик, основоположник рентгеноструктурного аналізу, лауреат Нобелівської премії з фізики 1915 р. Професор Аделаїдського (Австралія, з 1886 р.), Лідського (з 1909 р.) і Лондонського (з 1915 р.) університетів. Член (з 1906 р.) і президент (1935 – 1940 рр.) Лондонського королівського товариства. Відомий науковими працями зі структурного аналізу. Ряд його науково-популярних праць перекладено українською мовою («У світі атомів і молекул». Х., 1932; «Вступ до аналізу кристалів». М. – Л., 1930, та ін.)



4 липня 1981 р. в Баренцеве море на випробування вийшов найбільший в світі атомний підводний човен – важкий ракетний крейсер стратегічного призначення «Акула» (проект 941) довжиною 172,8 м і водотоннажністю 48 000 т. Подібний підводний човен в цей же час створювалася і в США. Згодом він отримала назву «Огайо». Міцний корпус було зварено з секцій (обичайок) циліндричної, конічної і еліптичної форми з товщиною стінок 75 мм. Така товщина зварних з'єднань вимагала створення потужних рентгенівських апаратів на основі бетатронів



4 липня 2012 р. у CERN (Європейській організації з ядерних досліджень) повідомили про відкриття на Великому адронному колайдері бозона Хіггса. CERN – міжнародний дослідницький центр європейської спільноти, найбільша у світі лабораторія фізики високих енергій. Ідея заснування CERN належить французькому фізику Луї де Бройлю, оприлюднена ним в 1949 р. на Європейській конференції в Лозанні. Він запропонував створити міжнародну організацію для здійснення наукових досліджень. Офіційним днем народження CERN вважають 29 вересня 1954 р., коли 12 країн-учасниць ратифікували угоду про її заснування. CERN має в своєму розпорядженні цілу низку прискорювачів заряджених частинок, найбільший з яких, Великий адронний колайдер, був запущений впродовж 2008 – 2010 рр.



10 липня 1856 р. народився Нікола Тесла (помер 7.01.1943 р.) – сербський та американський винахідник і фізик. Походив із сербської сім'ї, згодом став громадянином США. Працював в компаніях Едісона та Вестінгауза, причому останній викупив у нього 40 патентів. Тесла найбільш відомий своїми винаходами у галузі електрики, магнетизму та електротехніки. Зокрема, він відкрив явище обертового магнітного поля, йому належать винаходи змінного струму, поліфазової системи та електродвигуна змінного струму, електрогенератора надвисокої частоти. Був ключовою фігурою при побудові першої гідроелектростанції на Ніагарському водоспаді. Одиниця вимірювання магнітної індукції в системі SI названа на честь дослідника



11 липня 1979 р. з орбіти зійшла, завершивши свою роботу, «Скайлеб» – перша і єдина національна американська орбітальна станція. Під час польоту були проведені експерименти з електронно-променевою зварювання для встановлення впливу невагомості на якість зварного з'єднання і мікроструктуру. На станції «Скайлеб» був обладнаний матеріальний переробний комплекс, який включав багатоцільові електричні печі, камери і електронно-променеву гармату. Серед експериментів було дослідження обробки розплавленого металу; вивчення росту кристалів; обробки сплавів; пайки нержавіючої сталі. Отримані в результаті експериментів зразки стали об'єктом технічного діагностування та різного виду досліджень





13 липня 2006 р. відбулось офіційне урочисте відкриття нафтопроводу Баку - Тбілісі - Джейхан для транспортування каспійської нафти до турецького порту Джейхан, розташованого на березі Середземного моря. Його довжина 1760 км, а пропускна спроможність 50 мільйонів тон нафти на рік. Такий трубопровід є складною технічною спорудою. При його будівництві використовувались найсучасніші засоби неруйнівного контролю, а надійність роботи підтримується постійним моніторингом його технічного стану



14 липня 1969 р. розпочав занурення під воду перший підводний апарат, призначений для дослідження середніх глибин (до 1000 м), мезоскаф «Огюст Пікар», сконструйований Жаком Пікаром в 1964 р. для швейцарської виставки. Названий на честь батька конструктора, видатного швейцарського вченого Огюста Пікара. Особлива увага приділялася міцності та герметичності зварних з'єднань, люків та ілюмінаторів. Були проведені численні перевірки та експертизи, перш ніж було дозволено використовувати апарат. Загальна кількість пасажирів-туристів, що занурювалися під воду в мезоскафі протягом кількох років, перевищила 33 000 чоловік



16 липня 1965 р. урочисто відкрився Монбланський автомобільний тунель, прокладений під горою Монблан між Шамоні-Мон-Блан (Франція) та Курмайором (Італія). Довжина тунелю – 11611 м, ширина – 8,6 м, висота – 4,35 м. Тунель складається з однієї галереї, рух здійснюється по одній смугі шириною 3,5 м в кожну сторону. Має профіль у вигляді несиметричної букви Λ для полегшення зливу води. Висота portalу на французькій стороні 1274 м над рівнем моря біля підніжжя льодовика Bossons, на італійській – 1381 м біля підніжжя льодовика Brenva. При прокладанні тунелю використовувались засоби контролю зварних з'єднань арматури та контролю міцності бетону і гірських порід



18 липня 1898 р. П'єр і Марія Кюрі представили в Паризьку Академію доповідь про те що, окрім урану, існують і інші радіоактивні елементи. Згодом подружжя Кюрі оголосило про відкриття двох нових елементів, які були названі ними полонієм (на честь Польщі – батьківщини Марії) і радієм. Вони екстрагували два нові елементи з уранової смоляної обманки. Щоб екстрагувати їх у вимірних кількостях, дослідникам необхідно було переробити величезні кількості руди. У 1903 р. за дослідження явищ радіації Марія і П'єр Кюрі разом Анрі Беккерелем, який першим відкрив це явище, отримали Нобелівську премію з фізики. Ці відкриття та наступні дослідження стали в основу гамма-дефектоскопії



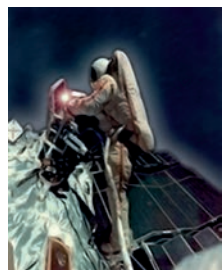
19 липня 1900 р. відбулося відкриття Паризького метрополітену. Відкриття було приурочено до початку Всесвітньої виставки 1900 р. Паризький метрополітен – один з найстаріших метрополітенів в Європі (третій після лондонського та будапештського). Неперевершені в той час можливості термітного зварювання були наочно продемонстровані під час прокладання рейкових шляхів Паризького метрополітену, а до його випробування були залучені провідні спеціалісти Європи



20 липня 1966 р. командир екіпажу Ніл Армстронг і пілот Едвін Олдрін американського космічного корабля «Аполлон-11» посадили місячний модуль на Місяць. Виконання цього проекту не могло бути досягнуто без застосування сучасних технологій зварювання та технічного контролю. Заслугує на увагу той факт, що двигуни ракети-носія «Сатурн-5» мали тисячі зварних швів, виконаних вручну. Розробники ракети предметом гордості вважали саме зварні роботи та роботи з технічних випробувань, називаючи їх «витвором мистецтва»

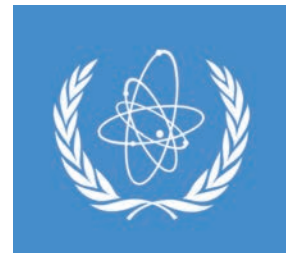


21 липня 2007 р. хмарочос висотою 829,8 м «Бурдж-Халіфа» в процесі будівництва став найвищою будовою в світі. Урочиста церемонія відкриття відбулася 4 січня 2010 р. в найбільшому місті Об'єднаних Арабських Еміратів – Дубаї. Зварювальні та випробувальні технології були особливо затребувані під час будівництва, починаючи від фундаменту і закінчуючи самою верхньою точкою колон, де все кріпилося або болтами, або електродуговим зварюванням. Хмарочос є одним із зварювальних рекордів і демонструє, яких розмірів можуть досягати споруди за допомогою зварювання. Шпиль «Бурдж-Халіфа» – це складна сталева конструкція з безліччю колон і зварних балок. Будівництво хмарочоса супроводжувала великий кількість дефектоскопів



25 липня 1984 р. у відкритому космосі, за бортом орбітальної станції «Салют-7», були проведені експерименти з електронно-променевого зварювання за допомогою зварювального апарату УРІ (універсальний ручний інструмент). Цей апарат дозволяв здійснювати зварювання, різання, пайку металу, нанесення покриттів. Космонавти Володимир Джанібеков і Світлана Савицька вийшли у відкритий космос для зварювання в космосі. Протягом трьох з половиною годин космонавти провели весь комплекс запланованих робіт. Всі поставлені завдання експерименту були успішно виконані. В подальшому отримані зразки зварних та паяних з'єднань, наплавов та напиленів були всебічно досліджені в лабораторіях ІЕЗ ім. Є.О. Патона і провідних металознавчих інститутах країни

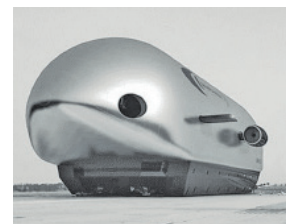
29 липня 1957 р. заснована Міжнародна агенція з атомної енергії (МАГАТЕ), провідна світова міжнародна організація з науково-технічної співпраці в області мирного використання ядерної технології. Станом на сьогодні до складу Агентства входять біля 170 країн-членів. МАГАТЕ входить до загальної системи міжнародних організацій ООН і встановлює стандарти ядерної безпеки і захисту довкілля, надає країнам-членам технічну допомогу, а також заохочує обмін науковою і технічною інформацією щодо ядерної енергії. Головна ціль цих програм – сприяти передачі навичок і знань для того, щоб країни могли здійснювати атомні програми ефективніше і безпечніше. Агентство пропонує радників й обладнання, навчає спеціалістів, координує роботи з технічного контролю на атомних електростанціях



2 серпня 1930 р. народився Сергій Іванович Кучук-Яценко (помер 22 березня 2021 р.) – вчений в галузі зварювання металів тиском, заступник директора з науки ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Займався вивченням швидкоплинних процесів нагріву і руйнування контактів при високих концентраціях енергії. Фундаментальними дослідженнями вченого є розробки нових способів контактного зварювання постійним, імпульсним і пульсуючим оплавленням, запатентованими в провідних країнах світу. На їх основі С.І. Кучуком-Яценком з колективом співробітників розроблена технологія зварювання різних виробів, системи управління і нові зразки зварювального обладнання, що не мають аналогів у світовій практиці. Ці види контактного зварювання поставили нові завдання перед розробниками методів технічного контролю



4 серпня 2009 р. британський ентузіаст і інженер Алан Рой Хендлі вирішив повернутися до створення металевого дирижабля. Свій проект він назвав Varialift. Алан вирішив створити гібридну систему, здатну об'єднати в собі переваги літака, вертольота та дирижабля. Родзинка проекту – авторське рішення проблеми балансування і підйому повітряного судна. Цю ідею Хендлі запатентував в Європейському патентному бюро. Перший апарат серії Varialift - ARH-50 A Хендлі позиціонує як дирижабль для транспортування вантажів вагою 50-55 т. У 2011 р. був успішно протестований прототип довжиною 150 м. Оболонка апарату зварювалася з алюмінієвих листів, що утримує газ – гелій. Особлива увага приділяється герметичності оболонки



12 серпня 1908 р. зійшов з конвеєра перший екземпляр автомобіля «Ford Model T», також відомий як «Жерстяна Ліззі» – автомобіль, що випускався «Ford Motor Company» з 1908 по 1927 рр. Зазвичай, він розглядається як перший доступний автомобіль, що вироблявся мільйонами екземплярів, який «посадив Америку на колеса». Це стало можливим, у тому числі, завдяки нововведенням Форда, таким, як застосування складальної лінії замість індивідуальної ручної збірки, а також концепції виплати працівникам заробітної плати пропорційно вартості автомобіля. Всього було випущено 16 500 000 автомобілів «Ford Model T»



30 серпня 1871 р. народився Ернест Резерфорд (помер 19.10.1937 р.) – британський фізик, лауреат Нобелівської премії з хімії 1908 р. «за проведені ним дослідження в області розпаду елементів в хімії радіоактивних речовин». Резерфорд відомий, передусім, експериментами з розсіювання альфа-частинок (Резерфордівське розсіювання), завдяки якому він встановив структуру атома як системи, що складається із малого за розмірами позитивно зарядженого ядра й електронів. У 1898 р. Резерфорд відкрив альфа- і бета-промені, згодом вивчав гамма-промені, досліджував недавно відкрите явище радіоактивності урану і торію. Резерфорд відноситься до тієї групи вчених, чиї роботи лежать в основі рентгенівської та гаммадефектоскопії



31 серпня 1995 р. запущений перший український космічний апарат Січ-1, вагою 1920 кг, призначений для спостереження поверхні Землі в інтересах господарської діяльності та проведення наукових експериментів з дослідження іоносфери та магнітосфери. Розробник: Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля. Виробник: Державне підприємство «Виробниче об'єднання «Південний машинобудівний завод ім. О.М. Макарова». Супутник запущений за допомогою ракети-носія «Циклон-3» і працював до 2001 р. У створення супутника значний вклад внесли спеціалісти відділу неруйнівного контролю, яким в ті роки керував Віктор Тихий



9 вересня 2013 р. у США відкрито атракціон під назвою «Las Vegas High Roller», що має висоту 168 м. Колесо огляду є фантастичним втіленням досягнень машинобудування і дизайну, а також рекордсменом в світі за висотою. У новому атракціоні обладнано 28 кабінок діаметром шість метрів, в кожній з яких можуть розміститися по 40 чоловік. Зовнішній обід колеса був зварений з двох трубчастих сталевих балок дюймової товщини, потім вони були з'єднані в групи по чотири балки з утворенням секції обода. Опорні конструкції були спроектовані і побудовані таким же чином, щоб нести величезне навантаження колеса. Щороку всі зварні з'єднання металоконструкцій колеса огляду підлягають обстеженню та дефектоскопії





11 вересня 1816 р. народився Карл Фрідріх Цейс (помер 3.12.1888 р.) – всесвітньо відомий німецький інженер і виробник оптики, засновник фабрики оптичних систем «Цейс» в Єні (з 1846 р.). Цейс зробив істотний внесок у розвиток технології виготовлення лінз. Його досягнення в цій галузі використовуються й досі. Заснований ним у 1840 р. у Веймарі (Німеччина) завод згодом став одним із найвідоміших і найкрупніших виробників оптики. На фабриці в Єні Цейс розробив лінзи, які лягли в основу популярної оптики Zeiss. Спочатку продукція заводу використовувалася у виробництві мікроскопів, а після винаходу фотокамери компанія «Цейс» почала виробляти і знамениті високоякісні об'єктиви. Створені Цейсом об'єктиви мали дуже велику апертуру, що давало змогу отримувати якісніші зображення. К. Цейс, безумовно, є піонером оптичного контролю



12 – 15 вересня 1994 р. відбулася Перша Українська конференція «Неруйнівний контроль і технічна діагностика». Учасники конференції з провідних наукових та виробничих організацій України зібрались на базі відпочинку ДКБ «Південне» біля м. Дніпро на березі р. Самара. В програмі конференції було представлено 93 доповіді. Наступні, 2-га і 3-тя конференції в 1997 та 2000 рр. відбулись теж на р. Самара. Згодом національні конференції з неруйнівного контролю та технічної діагностики проводились в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона і Міжнародному виставковому центрі на Броварському проспекті в м. Києві



14 вересня 1939 р. у США уродженець Києва авіаконструктор Ігор Сікорський підняв у повітря свій перший вертоліт VS-300. Номер 300 зафіксував третій побудований Сікорським вертоліт, з урахуванням двох, побудованих у Києві. На початку 1941 р. діяльність компанії Сікорського оцінило керівництво ВПС США, і високі армійські чини підтримали розробку вертольота і виділили кошти на розробку проекту VS-316 (S-47), який отримав армійське позначення XR-4, і будівництво зразка. У жовтні 1943 р. VS-300 передали в музей Генрі Форда в Дірборні, штат Мічиган. Він міститься там донині, за винятком подорожі назад на завод Sikorsky Aircraft для відновлення у 1985 р.



15 вересня 1830 р. відкрилась перша в світі залізниця від Ліверпулю до Манчестера для перевезення сировини і готової продукції між морським портом в Ліверпулі і Манчестером, де була велика кількість фабрик. Довжина дороги склала 56 км. Тяга поїздів на дорозі з самого початку здійснювалася паровозами. Інженерне забезпечення дороги було передовим для того часу. Було побудовано 64 мостів і віадуків, а також тунель довжиною 2 км. Висота віадуків над долиною Sankey Brook сягала 21,3 метра. Потяги курсували зі швидкістю 27 км/г. За перші три місяці експлуатації було перевезено 71950 пасажирів, 2630 т вугілля, 1432 т інших товарів. Успіх цієї дороги визначив початок «залізничної лихоманки» і в наступне десятиліття були побудовані тисячі кілометрів залізниць



20 вересня 1842 р. народився Джеймс Дьюар (помер 27.03.1923 р.) – шотландський фізик і хімік. Коло його наукових інтересів було дуже широке. Найбільш відоме ім'я Дьюара у зв'язку з його роботою над зріджуванням газів і дослідженнями температур, близьких до абсолютного нуля. Його інтерес до цієї галузі фізики та хімії припадає на початок 1870-х р. В Королівському інституті Дьюар вперше продемонстрував на публіці дослід зрідження кисню і повітря. В 1880-х р. в Королівському інституті були спроектовані і побудовані машини, які виготовляли рідкий кисень в промислових кількостях. Близько 1892 р. Дьюару прийшла ідея використання посудин з вакуумною оболонкою для зберігання рідких газів, що призвело до створення посудини Дьюара – його найбільш відомого винаходу. Посудина Дьюара входить до складу мас-спектрометричних течошукачів



22 вересня 1791 р. народився Майкл Фарадей (помер 25.08.1867 р.) – англійський фізик і хімік, основоположник вчення про електромагнітне поле, член Лондонського королівського товариства (1824 р.) і безлічі інших наукових організацій. Займаючись дослідженням зв'язку між електричними і магнітними явищами, Фарадей у 1831 р. відкриває явище електромагнітної індукції, вивів її основний закон, з'ясував залежність індукційного струму від магнітних властивостей середовища, дослідив явище самоіндукції та екстраструми замикання та розмикання, заклавши тим самим початок основ електротехніки. У 1845 р. Фарадей відкрив явище парамagnetизму та діамagnetизму, обертання площини поляризації світла в магнітному полі (ефект Фарадея). Це було перше спостереження зв'язку між магнітними й оптичними явищами. Фактично Фарадей є основоположником електромагнітних методів неруйнівного контролю



24 вересня 1975 р. на легендарному літаку «Ан-2» перевезений 250-мільйонний пасажир. «Ан-2» відноситься до літаків з коротким злетом і посадкою. Літак «Ан-2» по праву називають крилатими трудівниками. Він має ряд якостей, які і зробили його популярним – це простота, надійність, можливість експлуатації на невеликих злітно-посадкових полосах. З метою спрощення ремонту літака в польових умовах конструкція фюзеляжу виконувалася зі сталевих труб, з'єднаних між собою зварюванням, а обшивку зробили полотняною. «Ан-2» вироблявся не тільки в СРСР, а і в Польщі та КНР. Всього було побудовано більше 18 тис. машин. Він занесений до Книги рекордів Гіннеса, як єдиний в світі літак, який випускався серійно більше 60 років