

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

Відкриття меморіальної дошки-горельєфу
академіку Б.Є. Патону..... 3

Історія розвитку технологій зварювання
на АТ «СМНВО—Інженіринг» 5

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

**КУЦ Ю.В., УЧАНІН В.М., ЛИСЕНКО Ю.Ю., ПЕТРИК В.Ф.,
ЛЕВЧЕНКО О.Е., БОГДАН Г.А.** Застосування перетво-
рення Гільберта для аналізу сигналів автоматизова-
ного вихрострумового контролю. Частина 2. Отримання
вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації..... 11

**ЛОБАНОВ Л.М., САВИЦЬКИЙ В.В., КИЯНЕЦЬ І.В.,
ШУТКЕВИЧ О.П., ШИЯН К.В.** Неруйнівний контроль
елементів титанових стільникових панелей методом
ширографії з використанням вакуумного навантаження..... 19

**ЯВОРСЬКИЙ І.М., ЮЗЕФОВИЧ Р.М., ЛИЧАК О.В.,
СЕМЕНОВ П.О.** Методи та засоби ранньої вібродіагно-
стики обертових вузлів механізмів причальних контей-
нерних перевантажувачів 25

МАХНЕНКО О.О., МАХНЕНКО О.В. Розрахункова оцінка
несучої здатності головних прогонових балок мосту
ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві за результа-
тами неруйнівного контролю 35

BAGALE N.C., BHAT M.R. Метод лазерно-індукованих
термопружних хвиль для оцінки гіротермічного старіння
композитів із вуглепластику..... 41

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

**ЛОБАНОВ Л.М., ДЯДІН В.П., ДАВИДОВ Є.О.,
ЛИТВИНЕНКО В.А.** Вибір неруйнівних методів
контролю щодо оцінки технічного стану металевих
конструкцій головних балок мосту ім. Є.О. Патона через
р. Дніпро у м. Києві..... 47

НЕСІН В.В., ФРАНКОВ О.С. Дослідження технології
виконання та перевірки якості гравіювання поверхонь
матеріалів з особливими органолептичними властиво-
стями із застосуванням контрастних барвників 54

ІНФОРМАЦІЯ

Генеральна асамблея Міжнародної академії неруйнівного
контролю..... 58

Промисловий форум – 2021 59

Програми професійної підготовки на 2022 р. 62

Дати, події, факти з історії технічного контролю 65

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

Opening of a memorial plaque-high relief to academician B.E. Paton	3
History of development of welding technologies at JSC «Sumy Machine-Building Science-and-Production Association-Engineering»	5

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<i>KUTS Yu.V., UCHANIN V.M., LYSENKO Yu.Yu., PETRYK V.F., LEVCHENKO O.E., BOGDAN, G.A.</i> Application of Hilbert transform for analysis of signals of automated eddy current inspection. Part 2. Deriving secondary diagnostic features and examples of realization.....	11
<i>LOBANOV L.M., SAVYTSKYI V.V., KYIANETS I.V., SHUTKEVICH O.P., SHYIAN K.V.</i> Non-destructive testing of elements of titanium honeycomb panels by shearography method using vacuum load	19
<i>YAVORSKYI I.M., YUZEFOVYCH R.M., LYCHAK O.V., SEMENOV P.O.</i> Methods and means of early vibration diagnostics of rotating components of mechanisms of quay container handlers	25
<i>MAKHNENKO O.O., MAKHnenko O.V.</i> Calculated estimation of load-carrying capacity of the main span beams of the E.O. Paton bridge across the Dnipro in Kyiv by nondestructive testing results	35
<i>BAGALE N.C., BHAT M.R.</i> Laser-Inducted Thermoelastic Wave Technique to Evaluate Hygrothermal Aging in CFRP Composites.....	41

INDUSTRIAL

<i>LOBANOV L.M., DYADIN V.P., DAVYDOV E.O., LYTVYNENKO V.A.</i> Selection of nondestructive testing methods for evaluation of the technical condition of metal structures of the main beams of E.O. Paton bridge across the Dnipro in Kyiv	47
<i>NESIN V.V., FRANKOV O.S.</i> Investigations of engraving technology and checking the quality of engraving the surfaces of materials with special organoleptic properties with application of contrasting dyes	54

INFORMATION

ACADEMIA NDT International	58
Industrial forum – 2021	59
Vocational training programs for 2022	62
Dates, events, facts in the history of technical non-destructive testing	65

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»

ВІДКРИТТЯ МЕМОРІАЛЬНОЇ ДОШКИ-ГОРЕЛЬЄФУ АКАДЕМІКУ Б.Є. ПАТОНУ

11 листопада 2021 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відбулося урочисте відкриття меморіальної дошки-горельєфу директору інституту, президенту Національної академії наук України академіку Б.Є. Патону. На мітингу з нагоди цієї події були присутні співробітники ІЕЗ, Національної академії наук України, підприємств Києва, представники преси. Відкрив мітинг директор ІЕЗ академік НАН України І.В. Кривцун.

У своїй промові І.В. Кривцун зазначив, що Борис Євгенович Патон – видатний український вчений в області зварювання, металургії та технології матеріалів, матеріалознавства, видатний громадський діяч і талановитий організатор науки. Разом зі своїм батьком Євгеном Оскаровичем Патоном він створив всесвітньо відому патонівську наукову школу. Світовий авторитет Б.Є. Патону принесли різнобічна та надзвичайно плідна наукова та інженерна діяльність, прагнення направити фундаментальні наукові дослідження на вирішення проблем суспільства.

Він глибоко розумів роль науки у суспільстві, її цілі та задачі, вдало поєднував активну наукову

і суспільно-політичну діяльність. Під його керівництвом українська наука набула нового потужного імпульсу у своєму розвитку. Після розпаду Радянського Союзу і утворення незалежної України за умов гострої економічної кризи Борис Євгенович зміг зберегти академію, її основні наукові школи, принципи академічного самоуправління, здійснити перебудову структури академії відповідно до нових умов, спрямувати фундаментальні та прикладні дослідження на розв'язання нагальних задач будівництва молодії держави.

Борис Євгенович був не тільки видатним вченим і організатором науки, а й прекрасним педагогом, вчителем з великої літери. Він виховав цілу плеяду вчених в галузі зварювання, металургії, матеріалознавства. Борис Євгенович завжди був демократичним, доброзичливим, відкритим до спілкування, готовим допомогти у вирішенні не тільки наукових, а й нагальних соціальних, життєвих проблем співробітників інституту і академії.





Борис Євгенович Патон був справжнім лідером, творчою особистістю, глибоко порядною та доброю людиною, яка мала фантастичну енергію і працездатність, глибокі знання в багатьох галузях. У нього була широка натура, гострий аналітичний розум, чудове почуття гумору. Світла пам'ять про цю видатну людину, талановитого вченого, організатора науки і громадського діяча назавжди залишиться в наших серцях.

Президент академії наук України, академік А.Г. Загородній відзначив, що відкриття пам'ятного горельєфу Б.Є. Патону є важливою подією. Він був видатним вченим та інженером, видатним організатором української науки. Б.Є. Патон мав в житті дві найважливіші справи – НАН України та ІЕЗ, про яких дбав, як про рідних дітей. За часи його керівництва українська наука плідно

розвивалася, відкривалися нові інститути, виникали нові наукові напрямки досліджень. Є наука фундаментальна та прикладна, але Б.Є. Патон є яскравим прикладом того, як можна, розвиваючи цілеспрямовані фундаментальні дослідження, поєднувати ці напрями. За часів його керівництва ІЕЗ здобув світову славу передового центру науки. Відкритий сьогодні горельєф продовжить життя Б.Є. Патона в наших серцях.

Теплими словами про Бориса Євгеновича поділились також заступники директора ІЕЗ академік Л.М. Лобанов, чл.-кор. В.О. Шаповалов, завідувач відділу ІЕЗ академік К.А. Ющенко, директор Інституту проблем реєстрації інформації академік В.В. Петров та голова Комісії НАН України з питань увічнення пам'яті академіка Бориса Євгеновича Патона академік А.Г. Наумовець.

На завершення мітингу І.В. Кривцун подякував всіх присутніх та наголосив, що пам'ять про Б.Є. Патона навіки залишиться в наших серцях і кращою запорукою цьому буде плідна праця в сучасній науці за прикладом видатного вченого.

Автор дошки-горельєфу – відомий скульптор, член спілки художників України В.Г. Корень. Бронзова дошка-горельєф виконана у класичному академічному стилі традиційного портретного жанру. Інсталяція у вигляді зварювального спалаху символізує зародження нових ідей, яких у Б.Є. Патона було чимало. Горельєф створено за рахунок добровільних внесків співробітників ІЕЗ ім. С.О. Патона.

Редакція журналу



ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ НА АТ «СМНВО – ІНЖИНІРИНГ»

Історія розвитку Акціонерного товариства «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – Інжиніринг» почалася з 28 листопада (за новим стилем) 1896 р. Указом Його Імператорської Величності про затвердження умов діяльності Бельгійського акціонерного товариства «Сумські машинобудівні майстерні». Його засновниками були, окрім закордонних акціонерів, сумські промисловці: П.І. Харитоненко, М.О. Суханов, Л. Кенінг, А. Гебіндер та ін.

У перші роки становлення підприємства для забезпечення виробничого процесу були задіяні європейські фахівці високої кваліфікації, насамперед, із Кайзерівської Німеччини.

З 1912 р. підприємство змінює назву на Анонімне товариство «Сумські машинобудівні заводи», а з початком Першої світової війни, коли багато іноземних фахівців прийняли російське підданство, виробничий колектив почав поповнюватися вітчизняними фахівцями.

Після закінчення Громадянської війни заводу було передано найбільш передові європейські технології в машинобудуванні і вже у 1926 р. завод випускав 4,2 % усієї продукції машинобудування Радянської України. На честь 10-річчя Червоної армії завод був перейменований на Сумський машинобудівний завод ім. М.В. Фрунзе.

У 1929 р. відбулася знаменна подія – вперше на промисловому підприємстві Радянського Союзу була запалена зварювальна дуга, що відкрила еру електродугового зварювання в радянській промисловості. Як і будь-яка інноваційна технологія, електродугове зварювання зіткнулося з багатьма проблемами під час її впровадження. Відсутність стандартів у підготовці фахівців, недосконале обладнання, відсутність якісних зварювальних матеріалів та відпрацьованих параметрів зварювання створювали великі труднощі на шляху впровадження нової технології. Всі вони з часом були подолані і на підприємстві розпочала роботу зварювальна ділянка з лабораторіями, що дозволило освоїти випуск нового складного обладнання.

З 1930 р. була організована електродна майстерня, де виготовляли електроди методом занурення. З цього часу у зварювальному виробництві використовувалися електроди лише власного виробництва.

З 1935 р. починається співпраця з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, що ознаменувало нову епоху у розвитку зварювального виробництва підприємства. Так, вже у 1936 р. була освоєна технологія зварювання хромонікелевих сталей для виготовлення обладнання, що працює в кислотовмісних та інших корозійних середови-



Під час підписання в ІЕЗ Меморандуму про співробітництво (рукописання директора ІЕЗ академіка Б.Є. Патона з генеральним директором СМВО В.М. Лук'яненком).



В.М. Лук'яненко в ІЕЗ ім. Є.О. Патона (зліва направо: Б.Є. Патон, В.М. Лук'яненко, К.А. Ющенко).

щах. А також були відпрацьовані практичні основи автоматичного зварювання під флюсом, що дозволило різко підвищити якість зварних швів, забезпечити високі економічні показники зварювального процесу та значно покращити умови праці електрозварників.

Після закінчення Другої світової війни співпраця з Інститутом електрозварювання виходить на новий технологічний рівень. З'являється нове обладнання та зварювальні матеріали, освоюється технологія автоматичного зварювання високолегованих сталей на установці для зварювання поздовжніх швів ємнісного обладнання та спеціалізованому стенді для зварювання кільцевих швів ємнісного обладнання діаметром до 3000 мм.

У 1950-х роках у складі котельно-зварювального цеху створюється електродна майстерня, де електроди виробляються вже не зануренням, а методом опресування на виготовленому своїми силами обладнанні. Однак зростаючим обсягам виробництва ця майстерня вже не задовольняла. Тож у об'єднанні на базі центральної зварювальної лабораторії будується новий електродний цех площею 4 тис. м². Для його оснащення купується найсучасніше на той момент обладнання швейцарської фірми «Манса-Судаж».

Одночасно фірма «Манса-Судаж» поставила лабораторний комплекс обладнання. Фактично це електродний цех у мініатюрі для виготовлення та випробування дослідних партій електродів перед виробництвом великих партій. Все це дозволило створити сучасне виробництво різних типів елек-

тродів високої якості, широкої номенклатури з повним циклом сертифікатних випробувань.

У цей же час завод спільно з Інститутом електрозварювання одним із перших розпочинає успішне впровадження технології напівавтоматичного зварювання під шаром флюсу.

З 1950-х р. стрімко розвивається космічна галузь. Активними учасниками процесу стали сумські машинобудівники, яким доручили виготовляти обладнання для космодромів Байконур та Плесецьк. Ферми, стріли, різні системи газів, повітря, вакуумування, заправники паливом, барокамери – це та багато іншого було зроблено та змонтовано на цих об'єктах із застосуванням зварювальних електродів сумського підприємства «СУМИ-ЕЛЕКТРОД».

З 1960-х р. освоюється технологія автоматичного зварювання алюмінію під шаром флюсу. Особливий внесок у розвиток цієї технології внесли співробітники відділу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, керованого д.т.н. Д.М. Рабкіним. У той же час у співпраці з відділом д.т.н. А.М. Макари було освоєно надійну стабільно повторювану технологію зварювання роторів центрифуг з високоміцної сталі 30ХГСА.

У міру розширення та розвитку заводу розвивалося і зварювальне виробництво, що стало одним із центрів розвитку інноваційної потужності підприємства. У кожному новому цеху були спеціалізовані зварювальні ділянки, що оснащувалися найбільш передовою на ті часи технікою, а фахівці науково-виробничого центру зварювання спільно зі співробітниками Інституту електрозварюван-

ня відпрацьовували нові інноваційні технології зварювання перед запуском їх в основне виробництво. Ця співпраця дала швидку віддачу у вигляді впровадження інноваційних технологій зварювання хімічного обладнання з високолегованих сталей та сплавів. Так, було освоєно виготовлення колонного масообмінного обладнання з різними видами контактних елементів: ковпачковими, клапанними, сітчастими, жалюзійними, комбінованими та вихровими тарілками. Було освоєно технологію автоматичного зварювання колонного обладнання під флюсом. Освоюються технології зварювання теплообмінного обладнання із високолегованих сталей із забезпеченням корозійної стійкості зварних з'єднань до агресивних середовищ, що працюють у широкому діапазоні екстремальних температур (від $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) та знакозмінних навантажень.

Спільно з фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона М.І. Каховським, В.Г. Фартушним, К.А. Ющенком було вирішено питання досягнення необхідного рівня технологічної міцності аустенітних швів та зони термічного впливу, а також досягнуто необхідних значень холодостійкості, теплостійкості та жароміцності з'єднань. Для нових конструкційних матеріалів розроблялися технології зварювання, засоби механізації та автоматизації зварювального процесу. Так, було впроваджено імпульсно-дугове зварювання з електромагнітним перемішуванням зварювальної ван-

ни, що у поєднанні з іншими технологічними рішеннями дозволило механізувати зварювання виробів з аустенітних сталей типу ЭИ-943 та нікелевих сплавів типу хастеллой. Завдяки впровадженим технологічним рішенням вдалося збільшити термін служби обладнання, що виготовляється, в 2...3 рази.

У цей час освоюється технологія зварювання титану та його сплавів. Зіткнувшись із труднощами, пов'язаними з високою активністю титану до кисню, фахівці підприємства вирішили всі виробничі завдання, забезпечивши на десятиліття конкурентні переваги підприємства та країни як у військовій промисловості, так і в народному господарстві. Досягнутий рівень технологій був настільки високий, що навіть у 2000-х р. американські фахівці були захоплені досягненнями підприємства тих часів.

З 1963 р. було освоєно технологію автоматичного електрошлакового зварювання (ЕШЗ) поздовжніх та кільцевих стиків товстостінного обладнання. Спільно з Інститутом електрозварювання вирішено технологічні питання ЕШЗ високоміцних сталей, які пов'язані зі схильністю зварних з'єднань до утворення холодних тріщин та забезпечення необхідних механічних властивостей. Пізніше було освоєно технології ЕШЗ рам газоперекачувальних агрегатів (ГПА), товстостінних пелюсткових днищ та розроблено технологію електрошлакового лиття патрубків ГПА безпосередньо на корпусі нагнітачів.

До 1970 р. підприємство стало світовим лідером за рівнем та обсягом застосування зварювання в технологічних процесах виготовлення промислового обладнання.

У ці роки світова політична обстановка вимагала багаторазового збільшення виробництва гелію. Поставлене завдання було виконано фахівцями підприємства. Було спроектовано та побудовано Оренбурзький гелієвий завод, комплектну технологічну лінію з переробки газу для отримання гелієвого концентрату та тонкого очищення гелію продуктивністю 3 млрд м³ гелію на рік. Для



цього спільно з Інститутом електрозварювання та ЦНДІ «Прометей» було розроблено технологію механізованого зварювання під флюсом товсто-стінного колонного обладнання зі сталей АК-25 та АК-27, що працюють в умовах екстремально низьких температур, високого тиску та знакозмінних навантажень, а також супутніх технологій, таких, як плакування трубних решіток стрічковим електродом та енергією вибуху, елетрогідроімпульсного розвальцювання труб, об'ємної термообробки великогабаритних вузлів та багато інших. Надалі сумчани поставили Оренбурзькому заводу ще п'ять установок із виробництва гелію.

Після запровадження санкцій США на постачання ГПА та комплектуючих до них завдяки зусиллям Генерального директора В.М. Лук'яненка Сумське науково-виробниче об'єднання ім. М.В. Фрунзе стало базовим підприємством для освоєння виробництва вітчизняних ГПА та отримало необхідні ресурси та фінансування.

Були освоєні технології багатоелектродного електрошлакового приварювання мундштуком, що плавиться, квадратних патрубків до циліндричного корпусу нагнітача, технологія електрошлакового зварювання кільцевих і поздовжніх швів корпусів нагнітача. Під керівництвом академіка Б.І. Медовара було розроблено технологію електрошлакового переплаву для виробництва сталей особливої чистоти із заданими хімічними та технологічними характеристиками. Спільно з Інститутом електрозварювання були розроблені передові технології зварювання робочих коліс



ГПА зі сталі 13ХГМРБ із застосуванням напівавтоматичного зварювання замість дорогої технології вакуумного паяння.

1965–1975 рр. у розвитку заводу можна охарактеризувати як період найбільш інтенсивного зростання номенклатури та обсягів випуску хімічного обладнання та подальшого технічного оснащення виробництва. У ці роки вирішувалося поставлене урядом завдання з хімізації народного господарства країни, для чого потрібно було різко збільшити темпи розвитку галузі хімічного машинобудування.

Розвиток та створення нових хімічних виробництв та обладнання для них вимагало застосування нових матеріалів, насамперед складнолегованих сталей та спеціальних сплавів. Перед заводом постають одна за одною проблеми створення апаратури з корозійностійких та висо-



коміцних сталей, хастелою, двошарових сталей. Спільно з фахівцями науково-дослідних інститутів Києва, Москви, Ленінграда, Волгограда створюються та успішно впроваджуються нові технології зварювання цих матеріалів. ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» освоєло випуск таких електродів, як ОЗЛ-17У, ЗИФ-10, ЦЛ-11, АНВ-13, АНВ-17, НЖ-13, ЭА-400/10У, ОЗЛ-6, ЗИФ-5, ЗИФ -11.

Відповідно розвитку номенклатури продукції, що випускається заводом, розширювався і спектр зварювальних електродів. Для виготовлення обладнання, що є великогабаритними цільнозварними апаратами, були розроблені електроди марки ЗИФ-8, що забезпечують працездатність зварних швів при $t = -196^\circ\text{C}$. Фахівцями підприємства були забезпечені потреби нафтогазової промисловості півночі у пересувних заправниках. Так, було розроблено та освоєно технології автоматичного зварювання під флюсом низьколегованими зварювальними матеріалами сталі АБ1-Ш товщиною 60 мм, що працює під тиском понад 32 МПа.

Після включення до складу об'єднання заводу атомного та енергетичного насособудування було освоєно технологію зварювання уліток головного циркуляційного насосу першого контуру АЕС та іншого станційного обладнання, що потребує особливого підходу до забезпечення якості зварних з'єднань. Перші насоси для атомних електростанцій на підприємстві були створені ще у 1959 р. Масове їх виробництво стартувало з початку 1980-х р. і потребувало використання зварюваль-

них електродів найвищої якості та найрізноманітнішої номенклатури: для зварювання вуглецевих, теплостійких, високолегованих жароміцних і жаростійких, різномірних сталей.

З 1988 по 1993 рр. ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» випускало зварювальні електроди для енергетичного та атомного машинобудування під контролем Держатоменергонагляду СРСР.

У рамках проекту із запуску у 2011 р. ракети «Союз-СТ» у Французькій Гвіані завод ім. М.В. Фрунзе створював обладнання для стартової системи: стріли, ферми, сектори та інші супутні механізми. Тут також були використані зварювальні електроди ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД», проте варто зазначити, що обладнання для Гвіанського центру було виготовлено за більш жорсткими стандартами якості, що потребувало підвищення якості зварювальних електродів.

За цей час підприємство опанувало кілька поколінь обладнання для автоматичного зварювання – від наднадійного зварювального трактора ТС-17 розробки Інституту електрозварювання до зварювальних роботів.

Сумське науково-виробниче об'єднання перше у СРСР освоїло у виробництві одразу 27 одиниць зварювальних колон для автоматичного зварювання виробництва «Дойма» (Німеччина) та зварювальної колони виробництва «Бреда» (Італія) для об'ємного зварювання. Освоєно устаткування для автоматичного зварювання під флюсом товстостінного обладнання розщепленою дугою.

Найбільшу гордість викликає реалізація технології автоматичного зварювання під час виготовлення наступних виробничих замовлень:

- штамповано-зварні корпуси шарової арматури діаметром 300...1400 мм;
- ємнісне обладнання для газової промисловості товщиною до 260 мм і діаметром до 3500 мм;
- корпуси ГПА товщиною до 120 мм і діаметром до 1400 мм;
- зварні улітки ГЦН зі сталі 06Х12Н3Д товщиною до 200 мм;
- наплавлення та приварювання патрубків до корпусів ГПА;
- центрифуги зі сталей 12Х18Н10Т, 0Х17М13М3Т та ін.;
- пересувні автогазозаправні станції;
- зварювання труб в трубні решітки камерного типу через отвір;
- обладнання для заводів з виплавлення алюмінію.

– пенали і транспортно-пакувальні контейнери для зберігання відпрацьованого ядерного палива.

З 2019 р. підприємство перейменовано в АТ «СМНВО – Інжиніринг». Колектив підприємства докладає всіх можливих зусиль для відновлення





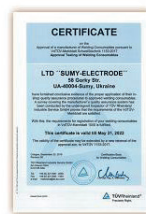
виробництва після наслідків рейдерського захоплення. Ядро фахівців, що залишилося, зберегло обладнання і технології, на ґрунті яких стало можливим повернення фахівців і відродження виробничих потужностей підприємства.

В області автоматичного зварювання заплановано впровадження робототехнічного зварювального комплексу з можливістю отримання зварних швів із заданими механічними властивостями і відображенням структури зварного шва в реальному часі. Даний проект планується реалізувати спільно з фахівцями відділу автоматизованих систем управління технологічними процесами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона.

В області систем управління продовжується впровадження системи автоматичного обліку витрат SAP ERP. У планах – запровадити автоматичний контроль і облік витрат зварювального виробництва із застосуванням сучасного зварювального обладнання. Триває активна співпраця з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона в рамках раніше укладеного Меморандуму.

У молодого покоління фахівців в області зварювання є чітке розуміння того, що конкурентна боротьба вирається інноваційним потенціалом підприємства і робиться все можливе для реалізації цього потенціалу.

Зварювальне виробництво АТ «СМНВО – Інжиніринг» атестовано на відповідність більшості міжнародних стандартів в галузі забезпечення якості. Так, триває успішна співпраця з Американським товариством інженерів-механіків (ASME), Американським інститутом нафти (API), Міжнародним інститутом зварювання (IIW). Внутрішня нормативна документація зварювального виробництва підприємства гармонізована з більшістю міжнародних стандартів, таких як ISO 3834, ASME IX; API 6D; AWS D 1.1 та ін. Координатори в галузі зварювання атестовані відповідно до вимог більшості міжнародних стандартів, що діють на території України, ЄС, США та Митного Союзу.



Сьогодні якість продукції ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» підтверджено сертифікатами Канадського бюро зварювання (CWV Group), TÜV Rheinland, Bureau Veritas, Регістром судноплавства України, Російським морським регістром судноплавства. Також компанія має дозвіл на поставку зварювальних матеріалів для ДП «НАЕК Енергоатом».

Серед наших клієнтів багато теплостанцій ДТЕК, підприємства ДП «НАЕК Енергоатом», Укроборонпрому, а також машинобудівні та виробничі компанії, серед яких Турбоатом, НКМЗ, ЗТМК, Арселор Міттал, Нібулон. Зараз продукція компанії поставляється в більш ніж 20 країн світу і застосовується для найвідповідальніших конструкцій. ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» успішно конкурує з кращими світовими брендами за якістю продукції.

Широке застосування отримують електроди власної розробки SF 7016 (аналог LB-52U) і SF 7018 (аналог FOX EV 50), призначені для зварювання поворотних і неповоротних стиків труб магістральних і промислових трубопроводів.

Номенклатура продукції ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» налічує близько 200 марок, серед яких електроди для зварювання вуглецевих сталей, низьколегованих і теплостійких сталей, високолегованих корозійностійких жаростійких і жароміцних сталей, нікелевих сплавів, електроди для зварювання чавуну, міді. Також ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» випускає електроди для наплавлення поверхневих шарів зі спеціальними властивостями.

Підприємство має багаторічний досвід поставок різних марок електродів по всьому світу і готове прийняти та виконати будь-яке замовлення на виготовлення зварювальних електродів за індивідуальними вимогами.

Отроков В.В., Погрібний П.М.,
Понамарьов І.В., Яковенко Є.М.

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛЬБЕРТА ДЛЯ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

Частина 2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації

Ю.В. Куц¹, В.М. Учанін², Ю.Ю. Лисенко¹, В.Ф. Петрик¹, О.Е. Левченко¹, Г.А. Богдан¹

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

У першій частині статті було показано, що дискретне перетворення Гільберта сигналів вихрострумowego контролю дає змогу отримувати вибірки дискретних характеристик цих сигналів. У другій частині розглядається використання цих даних для отримання детермінованих і статистичних характеристик – законів модуляції амплітуди та фази сигналів і кругових статистик, які отримують з різниці фазових характеристик сигналів. Стаття присвячена дослідженню застосування фазових методів обробки сигналів вихрострумowych перетворювачів, що ґрунтуються на комбінації дискретного перетворення Гільберта та методів детермінованого і статистичного вимірювання фази. Наведено приклади використання вторинних діагностичних ознак, отриманих за фазовою характеристикою сигналів, для вирішення задач автоматизованого вихрострумowego контролю. Розроблено експериментальну діагностичну систему вихрострумowego контролю, яка використовує частоту власних коливань сигналу перетворювача в якості інформативного параметру. Запропонована система передбачає використання перетворювачів в коливальному режимі як абсолютного типу, так і перетворювачів подвійного диференціювання. Наведено аналіз експериментальних результатів та отримані за запропонованою методикою залежності при виявленні дефектів та визначенні товщини діелектричного покриття. Бібліогр.10, табл. 1, рис. 11.

Ключові слова: вихрострумований неруйнівний контроль, дискретне перетворення Гільберта, фазова характеристика сигналу

У першій частині статті [1] було розглянуто особливості та переваги методології опрацювання сигналів вихрострумowego контролю, яка ґрунтується на використанні дискретного перетворення Гільберта (ДПГ). Перелік розглянутих питань включав: моделі формування сигналів вихрострумowego контролю (ВСК), особливості використання ДПГ для аналізу сигналів ВСК, структурно-логічну схему формування та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ, алгоритми отримання дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів вихрострумowych перетворювачів (ВСП). Було також відзначено, що ДПГ дає змогу отримувати більші обсяги вимірювальної інформації про об'єкти контролю (ОК) у цифровій формі та на цій основі виконувати пошук нових ознак сигналів ВСП та їх зв'язків (функціональних та кореляційних) з параметрами та характеристиками ОК. У наведеному в ч. 1 поданні процесу формування та опрацювання сигналів ВСК [1, рис. 3] ці завдання складають зміст третинного етапу опрацювання сигналів ВСП.

На сьогоднішній день в практиці ВСК в якості носіїв інформації про ОК використовують безпосередньо амплітуду, фазу та частоту сигналів

ВСП [2, 3]. Відповідно методи ВСК – амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий та частотний – найчастіше використовують для вимірювання чи контролю одного параметра (наприклад, електропровідності, товщини покриття, товщини шару металу тощо) та заглушення дії іншого перешкоджаючого фактора (найчастіше коливань зазору між ВСП і ОК). У таких випадках вдається досить легко встановити зв'язок між параметрами сигналу ВСП та параметрами ОК [4]. У складніших завданнях контролю така залежність може бути прихована.

Пошук нових інформаційних ознак сигналів ВСП дозволить розширити науково-технічну базу проектування та розробити нові інтелектуальні засоби ВСК, що створить перспективу представлення функціональної чи кореляційної залежності між параметрами сигналу ВСП та параметрами ОК не лише з фазою чи амплітудою сигналу, а за їх вторинними характеристиками. У такому випадку підвищити ймовірність контролю можна не за однією характеристикою, а за сукупністю характерних ознак, як детермінованих, так і статистичних, тобто за рахунок повнішого використання інформаційного ресурсу сигналу. Використання

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>,
 Петрик В.Ф. – <https://orcid.org/0000-0003-2301-0722>, Богдан Г.А. – <https://orcid.org/0000-0001-6745-1509>
 © Ю.В. Куц, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, В.Ф. Петрик, О.Е. Левченко, Г.А. Богдан, 2021

тільки амплітуди та фази сигналів ВСП орієнтоване більше на виконання ручного контролю та має певні обмеження на застосування в автоматизованих системах ВСК. Крім того, збільшення інформаційних ознак сигналів ВСП актуалізує пошук нових розв'язань задач багатопараметричного ВСК та способів коректного тлумачення результатів контролю. На підтвердження цього можна привести висновок, зроблений в роботі [5]: не дивлячись на те, що за більш ніж 100-річну історію розвитку ВСК в цій галузі зроблено дуже багато, найцікавіші або найперспективніші відкриття та події нас чекають попереду. Автори цієї роботи вважають, що новий поступ розвитку вихрострумового методу можливий шляхом розроблення складніших методів та алгоритмів обробки сигналів ВСП у поєднанні з новітніми досягненнями електроніки, комп'ютерних технологій та засобів моделювання та обробки сигналів.

Історично так склалось, що амплітудні методи опрацювання сигналів ВСК, які мають простішу апаратну реалізацію та тлумачення, на відміну від фазових були розвинуті краще. Характерними ознаками, що отримують з амплітудних характеристик, є мінімальне та максимальне значення, пікове відхилення, розмах, середнє квадратичне значення, спектральна функція імпульсу, кореляційна функція тощо. Мета статті – дослідження можливостей фазових методів опрацювання сигналів ВСП, які ґрунтуються на поєднанні ДПГ та методів детермінованої та статистичної фазометрії, та використання інформаційних ознак, що отримують за фазовою характеристикою сигналів (ФХС).

1. Постановка задачі. Нехай трансформаторний ВСП збуджується гармонічним сигналом $u_o(t) = U \cos(2\pi ft)$, $t \in T_o$, де U, f – амплітуда та частота сигналу; T_o – часовий інтервал існування сигналу. Вихідний сигнал ВСП відповідає моделі:

$$u(t, p_{ок}, p_d) = U(t, p_{ок}, p_d) \times \cos[2\pi ft - \varphi(t, p_{ок}, p_d)] + u_{ш}(t), t \in T_o, \quad (1)$$

де $U(\cdot)$, $\varphi(\cdot)$ – відповідно амплітудна характеристика (обвідна) та початкова фаза сигналу; $p_{ок}$, p_d – вектори параметрів ОК та дефекту (в подальших викладках для спрощення ці аргументи не вказані); $u_{ш}(t)$ – реалізація Гауссового шумового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 . Для сигналів $u_o(t)$, $u(t)$ існує перетворення Фур'є. Після аналого-цифрового перетворення ці сигнали представляються вибірками $\{u[j], j = \overline{1, J}\}$, $\{u_o[j], j = \overline{1, J}\}$, де $J = \text{int}(T_o/T_d)$ – обсяг вибірки.

Необхідно розглянути особливості отримання фазової характеристики сигналу ВСП та визначення на її основі вторинних інформаційних ознак для застосування в засобах автоматизованого ВСК, а також навести ряд прикладів їх застосування у ВСК.

2. Методологія отримання дискретної фазової характеристики сигналів ВСП. Методологія отримання та аналізу ФХС ґрунтується на сукупності таких складових: ДПГ, яке дає змогу отримати вибірки фазових (а також частотних та амплітудних) характеристик сигналів для їх наступного аналізу; детермінованого аналізу фазових даних, що дає змогу отримати вторинні детерміновані ознаки, та методів статистичного аналізу фазових даних, що дає можливість отримати ряд кругових статистик (рис. 1).

Реалізацію цієї методології ілюструє її структурно-логічна схема, представлена на рис. 2.

Вибірки сигналів $\{u[j], j = \overline{1, J}\}$, $\{u_o[j], j = \overline{1, J}\}$ проходять безпосередньо та через модулі ДПГ,

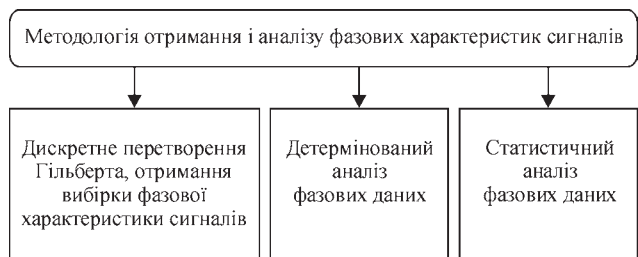


Рис. 1. Графічне представлення складових методології отримання та аналізу ФХС

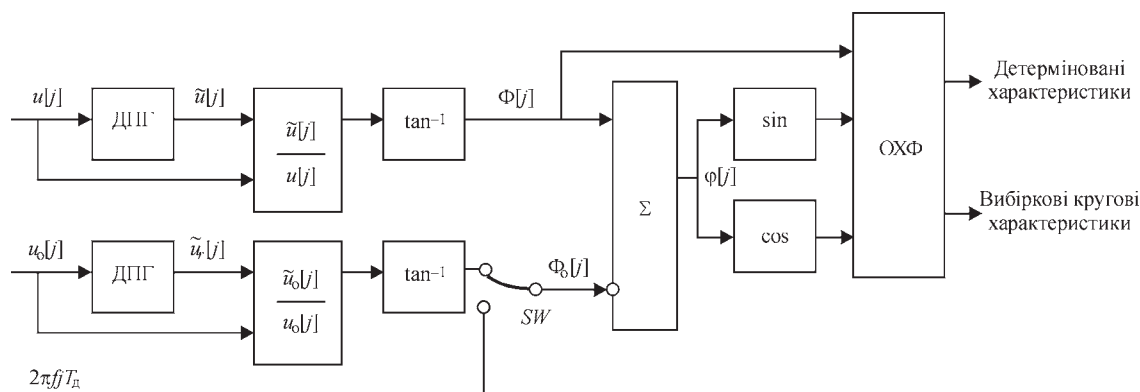


Рис. 2. Структурно-логічна схема реалізації методології отримання дискретних ФХС та вторинних інформаційних ознак на її основі

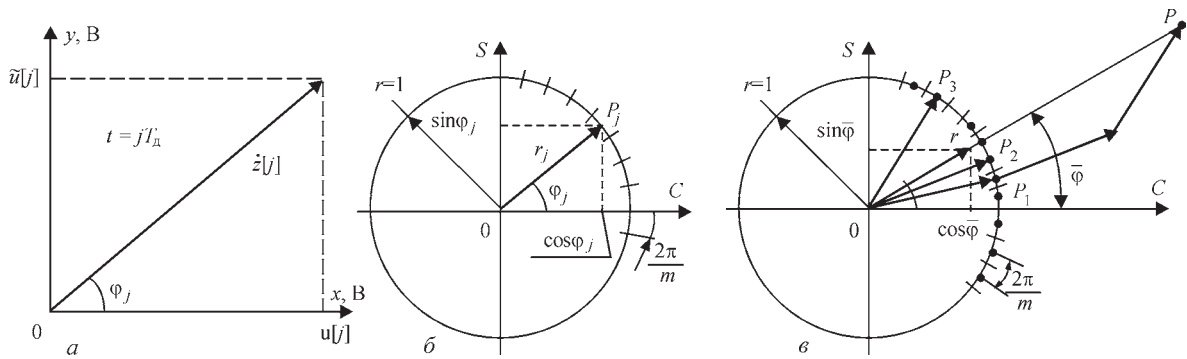


Рис. 3. Графічне представлення процесу опрацювання дискретної ФХС: а – визначення поточного значення $\varphi_j = \Phi[j] \bmod 2\pi$; б – представлення φ_j на одиничному колі; в – підсумовування фазових даних на колі для вибірки обсягу $M = 3$

які формують вибірки Гільберт-образів цих сигналів $\{\tilde{u}[j], j=1, J\}$ на пристрої ділення. Останні обчислюють значення $\{\tilde{u}[j]/u[j], j=1, J\}$ та $\{\tilde{u}_0[j]/u_0[j], j=1, J\}$. Блоки $\tan^{-1}$ реалізують функцію отримання розгорнутої дискретної ФХС [1]. Канал визначення дискретної розгорнутої фази $\{\Phi_0[j], j=1, J\}$ сигналу збудження ВСП може бути замінений на схемі рис. 2 власне на дискретну фазову характеристику цього сигналу, якщо така є в наявності. Ця можливість існує, наприклад, у випадку цифрового формування сигналу збудження. Переключення різних режимів отримання вибірки $\{\Phi_0[j], j=1, J\}$ здійснюється за допомогою перемикача SW. Блок Σ забезпечує отримання різниці дискретних ФХС $\varphi[j] = \Phi[j] - \Phi_0[j], j=1, J$ [1]. Інформаційні ознаки формує обчислювач характеристик фази (ОХФ), на вхід якого надходять вибірки $\{\Phi[j], j=1, J\}$, а також $\{\sin \varphi[j], j=1, J\}$ та $\{\cos \varphi[j], j=1, J\}$. Останні отримують відповідно в блоках «sin» та «cos». Графічне представлення цих процесів дає рис. 3.

На рис. 3, а представлено зображення в Декартових координатах значень $\tilde{u}[j]$ та $u[j]$ в момент часу $t = jT_d$ та показане утворення та можливість визначення поточного значення фази сигналу $\varphi_j = \Phi[j] \bmod 2\pi$ в радіанах через обернені тригонометричні функції від $\tilde{u}[j]$ та $u[j]$. На рис. 3, а вектор $z[j] = u[j] + i\tilde{u}[j]$ – це дискретний аналог аналітичного сигналу ($i = \sqrt{-1}$). Кожному оберту $z[j]$ відповідає збільшення фази сигналу на 2π . Зазвичай приймається умова, що позитивному відліку фази відповідає обертання $z[j]$ в напрямку проти ходу стрілки годинника. Безперервне спостереження за фазою сигналу $z[j]$ дає змогу отримати розгорнуту дискретну фазу $\Phi[j]$ аналізованого сигналу $u[j]$.

На рис. 3, б показано відображення значення φ_j на колі радіуса $r = 1$ (одиничному колі), якому відповідає точка кола P_j . Зручність такого відображення полягає в тому, що Декартові координати точки P_j визначаються як $(\cos \varphi_j, \sin \varphi_j)$. У випадку застосування цифрового способу вимірювання все коло розбивається на m інтервалів величиною $2\pi/m$.

На рис. 3, в наведено графічне представлення процесу усереднення фазових даних на одиничному колі. Результируючий вектор $\mathbf{r} = |\mathbf{r}| \cdot e^{i\bar{\varphi}}$ містить інформацію як про середню фазу $\bar{\varphi}$, так і про розкид окремих відліків фази відносно $\bar{\varphi}$. Зі збільшенням розкиду зменшується значення $|\mathbf{r}|$.

Одиничне коло як область представлення напрямків на площині використовується в статистичному аналізі кутових даних. Спорідненість математичних об'єктів кутових та фазових вимірювань та однакові одиниці вимірювання цих величин дає підстави для використання методів статистичного аналізу випадкових кутів на площині [6, 7] в аналізі результатів фазових вимірювань.

3. Отримання вторинних інформаційних ознак з дискретних ФХС. У практиці ВСК довгий час найбільш уживаними були інформаційні ознаки, що отримувались за амплітудою сигналів – функція амплітудної модуляції сигналу, амплітуда сигналу, точки перетину сигналом певного рівня тощо [2, 3]. Такий підхід не вимагав застосування складних технічних рішень.

Чому ми звернули увагу на використання фазової характеристики? Відповідь на це питання міститься у особливостях фази сигналу, а саме:

- фаза є неенергетичним параметром сигналу;
- фаза сигналу як інформаційний параметр стійка до впливу шумів;
- природною мірою фази є величина 2π , яка не залежить від амплітуди сигналу;
- значення 2π може бути відтворено обчислювальними методами з високою точністю незалежно від місця та часу проведення експериментів.

Застосування ДПГ дає змогу більш повно використати інформаційний ресурс ФХС і визначити з неї ряд вторинних детермінованих та статистичних інформаційних ознак. Перелік найбільш характерних з них наведено на рис. 4.

Що стосується детермінованих характеристик, то їх більша частина отримується за алгоритмами, наведеними у ч. 1:

- нерозгорнута фаза сигналу – формула (8) за виключенням оператора $\mathbf{L}$;
- розгорнута фаза сигналу – формула (8);

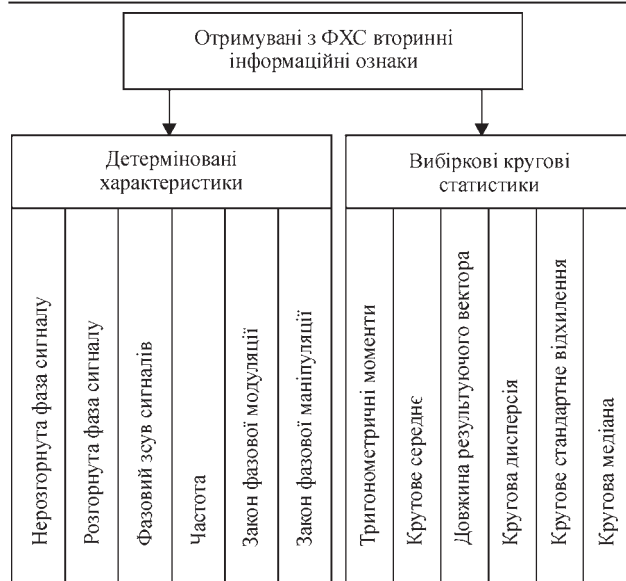


Рис. 4. Найхарактерніші вторинні детерміновані та статистичні інформаційні ознаки сигналів ВСП, які можуть бути отримані з їх ФХС

• фазовий зсув сигналів, закони фазової модуляції та маніпуляції – формула (9).

У ряді завдань ВСК актуальним є вимірювання миттєвої частоти сигналів. Якщо відношення $c/\text{ш} \gg 1$, миттєва частота в дискретні моменти часу може бути визначена безпосередньо з дискретної розгорнутої фази за рівнянням:

$$f[j, \bar{p}] = \frac{\Phi[j, \bar{p}] - \Phi[j-1, \bar{p}]}{2\pi T_d}, \quad 1 \leq j \leq J-1 \quad (2)$$

Якщо сигнал ВСК є гармонічним, його миттєва фаза описується лінійною функцією. Графік такої функції наведено на рис. 5, а, де ϕ_0 – початкова фаза сигналу.

Якщо сигнал ВСП синусоїдної форми спостерігається на фоні шуму, з метою підвищення точності визначення його частоти може бути виконано за трендом фазової характеристики, що отримують методами регресійного аналізу [8, 9].

У разі нелінійної функціональної залежності фази від часу, навіть у межах одного сигнального циклу, її визначення необхідно узгодити із самим визначенням частоти: для циклічних процесів частота визначається як кількість циклів за одиницю

часу. Запропоновано визначати «миттєву» частоту як обернену до поточного значення періоду T величину, тобто як $f = T^{-1}$, а період визначати за стабільною мірою фази 2π , що відповідає одному періоду сигналу $u(t)$. Метод полягає у ковзному обробленні ФХС вікном з апертурою 2π та визначенні інтервалів часу, впродовж яких фаза змінюється на величину 2π :

$$T(t_2) = \lim_{\Phi(t_2) - \Phi(t_1) \rightarrow 2\pi} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

За дії шумів більш стійкими вторинними ознаками є статистичні ознаки. Якщо методи статистичного аналізу амплітудних характеристик сигналів широко відомі та мають багато технічних застосувань, то методи статистичного опрацювання фазових характеристик сигналів ще не набули належного поширення в технологіях ВСК.

За умови дії шумів, що супроводжують процес отримання сигналів ВСП, значення фазових зсувів сигналів $\phi[j, \bar{p}]$ [1] треба розглядати як реалізації випадкової кутової величини. Отже до них можуть бути застосовані методи статистичного аналізу результатів кутових спостережень і відповідні статистики. Загальні питання цього розділу математичної статистики викладено в [6, 7]. В цих роботах розглянуто різні аспекти статистичного аналізу кутових даних: основні поняття та кругові моделі, вибіркові кругові статистики, фундаментальні теореми для розподілених на колі кутів, розподіли ймовірності випадкових кутів тощо.

Для статистичного аналізу результатів фазових вимірювань природним є використання так званих кругових статистик – вибіркового кругового середнього, вибіркової кругової дисперсії, результуючої довжини вектора (r -статистики) та ін. Оскільки ці статистики ще не набули достатнього поширення в практиці ВСК, нижче викладено їх стислий огляд.

Вхідними даними для отримання вибірових кругових статистик є вибірка фазових зсувів сигналів $(\phi_1, \dots, \phi_j, \dots, \phi_M)$, $\phi_j \in [0, 2\pi)$ обсягу M . Ця вибірка розглядається як реалізація вектора випадкових фазових зсувів, всі елементи якого мають однакову безперервну щільність розподілу

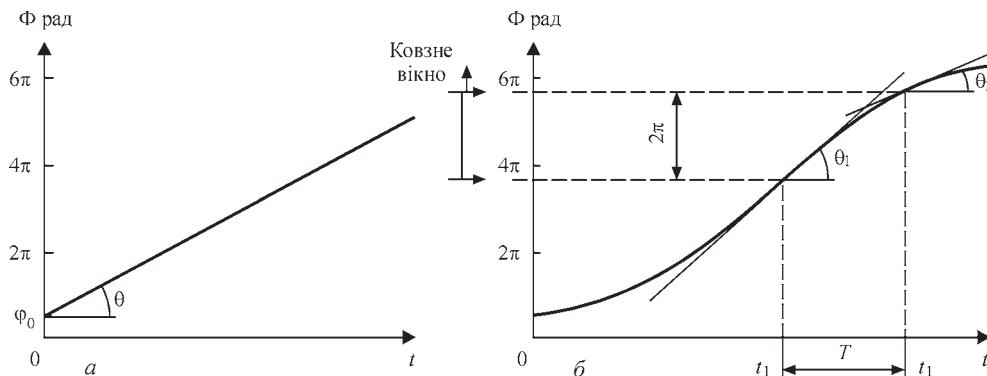


Рис. 5. Визначення миттєвої частоти за лінійною (а) та нелінійною (б) ФХС

Вибіркові кругові статистики, отримані з вибірки обсягу M

Найменування статистичної характеристики	Зміст, математичний запис
Вибіркове кругове середнє статистики кутів	$\bar{\varphi} = \arctg(S/C) + 0,5\pi \{2 - (\text{sign } S) \times [1 + \text{sign } C]\}$ $C = M^{-1} \sum_{j=1}^M \cos \varphi_j, S = M^{-1} \sum_{j=1}^M \sin \varphi_j$
Вибіркова середня довжина результуючого вектора (r-статистика)	$r = f_1(\alpha) = \sqrt{S^2 + C^2}$
Вибіркова кругова дисперсія статистики кутів	$V = 1 - r$
Кругове стандартне відхилення статистики кутів	$\sigma = \sqrt{-2 \ln(1-V)}; V = 1 - \exp(-0,5\sigma^2)$
Вибіркова кругова медіана статистики кутів	Це кут, якому відповідає точка кола Р, для якої діаметр PQ ділить значення вибірки кутів навпіл, і в околі Р спостерігається максимальна концентрація значень вибірки
Вибіркова мода статистики кутів	Це кут, якому відповідає точка кола і в околі якої спостерігається максимальна концентрація значень статистики

ймовірностей $p(x)$. Для такої вибірки розглядаються наступні вибіркові кругові характеристики.

Вибірковий тригонометричний момент порядку u відносно напрямку $\alpha \in [0, 2\pi]$ (або відносно певної початкової фази):

$$f_u(\alpha) = M^{-1} \sum_{j=1}^M e^{iu(\varphi_j - \alpha)} = a_u(\alpha) + ib_u(\alpha) = r_u(\alpha) e^{im_u(\alpha)}, \quad (4)$$

де $r_u(\alpha)$, $m_u(\alpha)$ – відповідно модуль та аргумент $f_u(\alpha)$; u – ціле число.

Функція (4) є комплексно значною. Послідовність вибіркових тригонометричних моментів утворює вибіркову характеристичну функцію.

Вибіркові косинусний та синусний моменти порядку u відносно напрямку $\alpha \in [0, 2\pi]$

$$a_u(\alpha) = M^{-1} \sum_{j=1}^M \cos[u(\varphi_j - \alpha)],$$

$$b_u(\alpha) = M^{-1} \sum_{j=1}^M \sin[u(\varphi_j - \alpha)] \quad (5)$$

Найменування та зміст інших важливих для ВСК вибіркових кругових статистик наведено в таблиці.

Дві перші з наведених в таблиці характеристик отримують з вибіркового тригонометричного моменту першого порядку: $\bar{\varphi} = \arg(f_1(0))$, а $r = |f_1(\alpha)|$, де $\alpha \in [0, 2\pi]$.

Ці та інші характеристики можуть бути використані як для пошуку нових діагностичних ознак (features extraction), так і в якості вхідних даних для класифікаторів дефектів, зокрема, на основі нейронних мереж. Нижче наведено приклади використання вторинних діагностичних ознак, визначених з використанням ФХС стосовно імпульсного ВСНК у коливальному режимі.

4. Приклади використання отриманих з ФХС вторинних діагностичних ознак у ВСК.

4.1. Імпульсна вихрострумова дефектоскопія з коливальним режимом роботи ВСП.

Експериментальні дослідження було проведено з використанням стандартних зразків ВСО-1, ВСО-2 та ВСП подвійного диференціювання з імпульсним збудженням. На рис. 6, а приведено стенд діагностичної системи ВСК експериментального макету. Зразки мали вигляд пластин товщиною 5 мм, довжиною 100 мм, шириною 30 мм (рис. 6, б). ВСО-1 зі сталі марки Ст.20, а ВСО-2 – з алюмінієвого сплаву Д16. На одній з поверхонь обох зразків

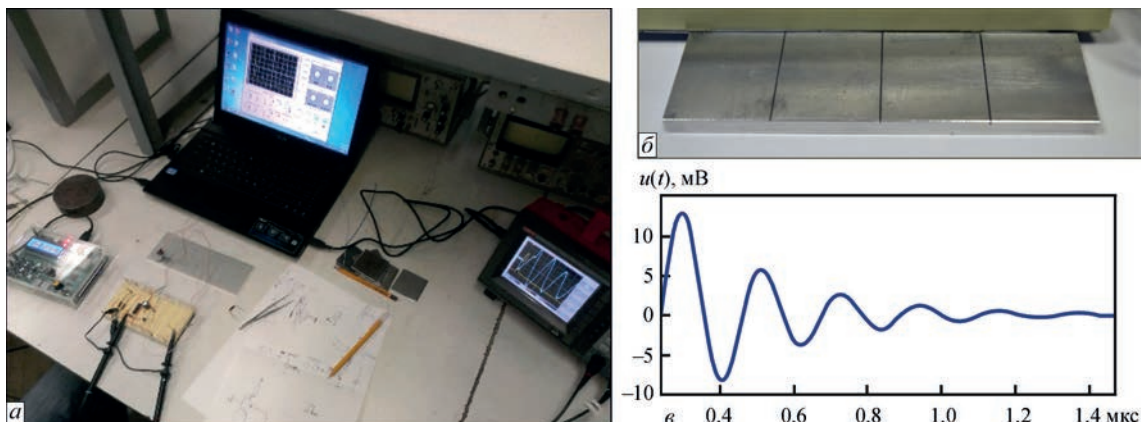


Рис. 6. Експериментальні дослідження імпульсної вихрострумової дефектоскопії: а – діагностична система ВСК; б – об'єкт дослідження; в – фрагмент сигналу ВСП

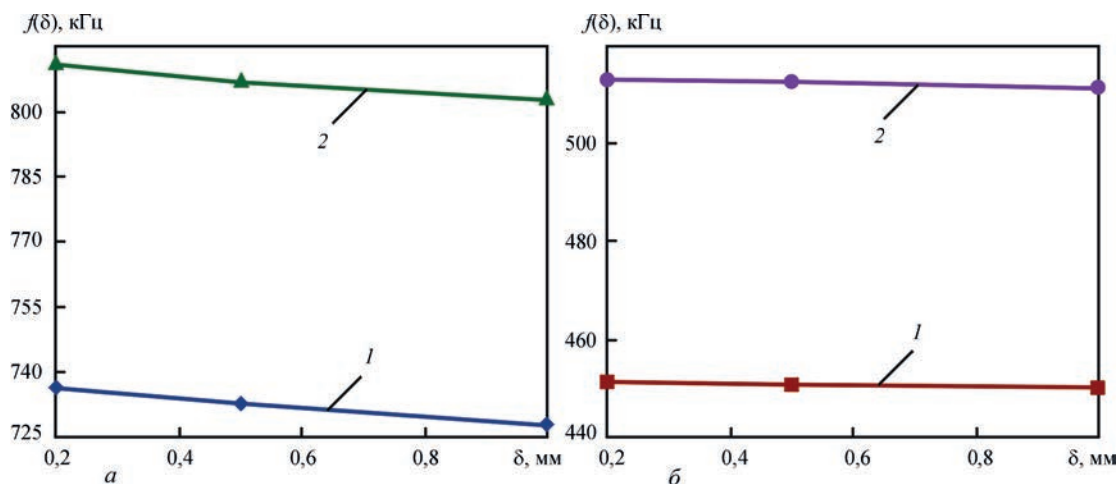


Рис. 7. Залежності частоти сигналу ВСП від глибини тріщини в різних матеріалах: 1 – зразок ВСО-1; 2 – зразок ВСО-2

з рівним інтервалом знаходились три штучні дефекти, що імітують поверхневі тріщини, з розкритом 0,2 мм глибиною $\delta = \{0,2; 0,5; 1,0\}$ мм. Шорсткість робочої поверхні не перевищувала 1,6 мкм. Фрагмент вихідного сигналу ВСП наведено на рис. 6, в.

У процесі обробки та аналізу інформаційних сигналів ВСП оцінювались частота власних коливань сигналу ВСП та її зміна в залежності від глибини тріщини δ . Результати визначення зміни частоти власних коливань сигналу ВСП з імпульсним збудженням як функції від глибини тріщини в ОК приведені на рис. 7. Зразку ВСО-1 відповідають залежності $f(\delta)$ у випадку, коли початкова частота власних коливань сигналу ВСП дорівнює 667 кГц та 434 кГц на рис. 7, а, б (крива 1) відповідно. Зразку ВСО-2 – крива 2 на рис. 7, а для частоти 787 кГц та рис. 7, б – 507 кГц. З аналізу цих графіків видно, що залежність $f(\delta)$ наближена до лінійної та має тенденцію до зменшення зі збільшенням δ . У цьому випадку чутливість до δ покращується зі збільшенням частоти сигналу ВСП: для зразка ВСО-2 чутливість становить $S_f(f = 787 \text{ кГц}) = 83,6 \text{ Гц/мм}$ та $S_f(f = 507 \text{ кГц}) = 28,8 \text{ Гц/мм}$.

4.2. Визначення товщини шару діелектричного покриття на електропровідній основі. Для експериментальних досліджень в якості ОК використовувались пластини з алюмінію Д16, бронзи БрО7Ф0.2 та сталі Ст-30 (питома електропровідність $\gamma_{\text{ал}} = 4,87 \cdot 10^7 \text{ См/м}$, $\gamma_{\text{бр}} = 2,75 \cdot 10^7 \text{ См/м}$, $\gamma_{\text{ст}} = 1,45 \cdot 10^6 \text{ См/м}$). Метою дослідження було виявлення та аналіз впливу різної товщини h діелектричного покриття ОК із зазначених матеріалів на такий інформативний параметр інформаційного сигналу ВСП, як частота.

Збуджуюча котушка ($W_1 = 80$) накладного ВСП отримувала імпульсний сигнал від генератора струму (сила струму $I = 5 \text{ мА}$, період повторювання $T_p = 125 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, тривалість $\tau = 62,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$). Сигнал вимірювальної котушки ($W_2 = 420$) ВСП підсилювався та оцифровувався, в результаті чого отримувались вибірки сигналу $u[j]$, $j = 1, \dots, 10000$.

Дискретизація сигналу виконувалася з періодом $T_d = 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. На рис. 8 наведено зображення розробленого лабораторного стенду.

На рис. 9 (крива 1 – зразок зі сталі, крива 2 – з бронзи, крива 3 – з алюмінію) наведено графіки функцій $f(h)$, що показують залежність частоти власних коливань сигналу ВСП від зміни товщини покриття на різних матеріалах ОК. Приведені експериментальні криві свідчать про можливість використання цього інформативного параметру для оцінювання товщини покриття в досліджуваних умовах тільки для немагнітних матеріалів (див.

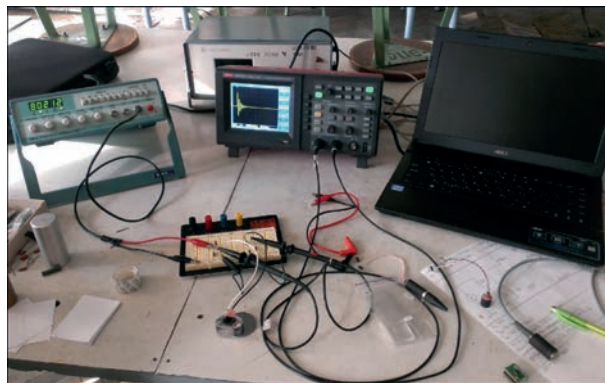


Рис. 8. Експериментальний стенд системи імпульсного ВСК

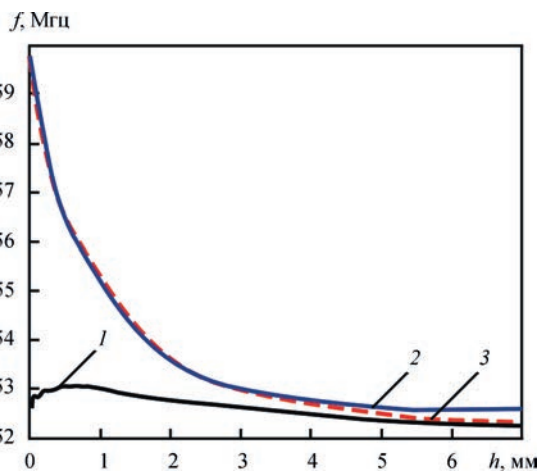


Рис. 9. Залежності частоти від товщини покриття для різних матеріалів ОК

криві для бронзи та алюмінію). У цьому випадку чутливість до товщини покриття збільшується зі зменшенням її величини.

4.3. Оцінювання параметрів об'єктів циліндричної форми з електропровідних немагнітних матеріалів. Експерименти проводились на зразках циліндричної форми з електропровідних немагнітних матеріалів. В якості ОК було використано дві серії циліндричних зразків з алюмінію Д16 та бронзи БрО7Ф0.2 (питома електропровідність відповідно $\gamma_{ал} = 4,87 \cdot 10^7$ См/м, $\gamma_{бр} = 2,75 \cdot 10^7$ См/м) з діаметрами 34...35 мм (рис. 10).

Для досліджень використано прохідний перетворювач трансформаторного типу з кількістю витків збуджуючої котушки $W_1 = 176$ та вимірювальної – $W_2 = 870$. На ВСП подавався імпульсний сигнал з генератора амплітудою 15 В, періодом повторення $T_n = 10^{-2}$ с та тривалістю $\tau = 10^{-3}$ с. Параметром оцінювання був діаметр d зразків.

На рис. 11 представлено графік залежності $f(d)$ для алюмінієвих (крива 1) і бронзових (крива 2) зразків, а також наведено їх лінійні тренди (криві 3 і 4 відповідно). Аналіз цих залежностей вказує на те, що зміна діаметра зразків призводить до зміни частоти сигналу ВСП, яка має наближений до лінійного характер.

Аналіз залежностей свідчить про можливість використання частоти власних коливань сигналу ВСП в якості інформативного параметру для сортування матеріалів за електропровідністю, а також

його використання для оцінювання значень діаметру ОК за умови відповідного калібрування системи імпульсного вихрострумового контролю.

Висновки

Використання методики опрацювання сигналів ВСК на основі поєднання ДПГ та методів детермінованої та статистичної фазометрії дає змогу включити в технологію ВСК нові інформаційні ознаки, які отримують з фазової характеристики сигналів ВСП.

Запропонована методологія обробки сигналів ВСП може підвищити завадостійкість ВСК, що дозволить збільшити його достовірність. Крім того, отримані з фазової характеристики сигналів вторинні ознаки є зручнішими для використання з огляду можливостей автоматизації ВСК, на відміну від представлення результатів контролю у вигляді годографів.

Проведені експериментальні дослідження показали можливість використання отриманих з ФХС вторинних діагностичних ознак в задачах дефектоскопії, контролю діаметру об'єктів з електропровідних немагнітних матеріалів, оцінювання товщини діелектричного покриття на електропровідній основі.

Подальше дослідження буде спрямовано на виділення з сигналу ВСП нових інформаційних ознак та аналіз їх кореляційних зв'язків з характеристиками ОК, а також на дослідження переваг запропонованої методології порівняно з традиційними підходами.

Дана робота виконана в рамках договору про співпрацю між КПІ ім. Ігоря Сікорського та Фізико-механічним інститутом ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Список літератури

1. Куц Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю., Левченко О.Е. (2021) Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумовому контролі. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 7–13. DOI: doi: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.03.01>
2. 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.
3. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. (2005) *Неразрушающий контроль и диагностика: справочник*. Москва, Машиностроение.
4. Тетерко А.Я., Назарчук, З.Т. (2004) *Селективна вихрострумова дефектоскопія*. Львів, НАН України, ФМІ ім. Г.В. Карпенка.
5. Udpa, S., Upda, L. (2004) *Eddy current testing—Are we at the limits? Proc. of 16th World Conference on Non-Destructive Testing*, Canada, Montreal, August/September 2004 (<http://www.ndt.net>).
6. Mardia, K.V., Jupp, P.E. (2000) *Directional Statistics*. England, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
7. Fisher, N.I. (2000) *Statistical Analysis of Circular Data*. England, Cambridge University Press.



Рис 10. Об'єкт дослідження

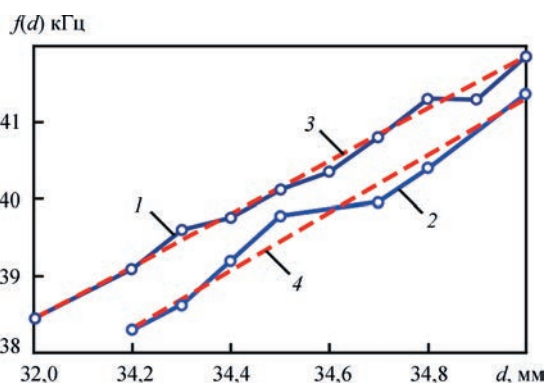


Рис. 11. Залежності частоти власних коливань від діаметра ОК

8. Cameron, S. (2005) *Making Regression Analysis More Useful, Econometrics*. Maidenhead, McGraw Hill Higher Education.
9. Дрейпер Н., Сміт Г. (2016) *Прикладний регресійний аналіз*: 3-є видання. Вид-во «Вільямс».
10. Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Y. 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>
3. Klyuev, V.V., Sosnin, F.R., Kovalev, A.V. et al. (2005) *Non-destructive testing and diagnostics: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Teterko, A.Ya., Nazarchuk, Z.T. (2004) *Selective eddy current flaw detection*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
5. Udpa, S., Udpa, L. (2004) Eddy current testing – Are we at the limits? In: *Proc. of 16th World Conf. on Non-Destructive Testing, Canada, Montreal, August/September 2004* (<http://www.ndt.net>).
6. Mardia, K.V., Jupp, P.E. (2000) *Directional Statistics*, England: John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
7. Fisher, N.I. (2000) *Statistical Analysis of Circular Data*. England: Cambridge University Press.
8. Cameron, S. (2005) *Making Regression Analysis More Useful, Econometrics*. Maidenhead: McGraw Hill Higher Education.
9. Draper, N., Smith, G. (2016) *Applied regression analysis. 3rd Ed*. Moscow, Williams [in Russian].
10. Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Y., 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>

References

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

Part 2. Deriving secondary diagnostic features and examples of realization

Yu.V. Kuts¹, V.M. Uchanin², Yu.Yu. Lysenko¹, V.F. Petryk¹, O.E. Levchenko¹, G.A. Bogdan¹

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Sve., 03056, Kyiv, Ukraine.
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

In the first part of the paper it was shown that the discrete Hilbert transform of eddy current control signals allows obtaining samples of discrete characteristics of these signals. The second part deals with application of these data to derive the deterministic and statistical characteristics – the laws of modulation of the amplitude and phase of the signals and round robin statistics, obtained from the difference in phase characteristics of the signals. The paper is devoted to investigations of application of phase methods of processing signals of eddy current transducers, which are based on a combination of discrete Hilbert transform and methods of deterministic and statistical measurement of the phase. The paper gives examples of application of secondary diagnostic features, derived by phase characteristic of the signals to solve the problems of automated eddy current control. An experimental diagnostic system of eddy current control was developed, which uses the frequency of natural oscillations of the transducer signal as an information parameter. The proposed system envisages transducer application in the oscillation mode, both of absolute type and double differentiation transducers. Analysis of experimental results is given and dependencies were derived by the proposed procedure at defect detection and determination of the thicknesses of the dielectric coating. 10 Ref., 1 Tabl., 11 Fig.

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

Надійшла до редакції 08.11.2021

ХІ МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах

12–16 вересня 2022 р., Одеса, готель «Аркадія»

Голова програмного комітету академік І.В. Кривцун



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 серпня 2022 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць десяти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/mmww>

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.08.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 05.09.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 12.09.2022 р.

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича 11,
м. Київ, 03150, Україна
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/ukr/mmi2022>



НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ЕЛЕМЕНТІВ ТИТАНОВИХ СТІЛЬНИКОВИХ ПАНЕЛЕЙ МЕТОДОМ ШИРОГРАФІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАКУУМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

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

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

Розглянуто застосування сучасного методу неруйнівного контролю якості – електронної ширографії у поєднанні з вакуумним навантаженням для дослідження елементів титанових стільникових панелей. Показано ефективність методики виявлення у стільникових панелях внутрішніх дефектів різного розташування, величини та конфігурації. Бібліогр. 10, рис. 9.

Ключові слова: неруйнівний контроль якості, стільникові панелі, електронна ширографія, вакуумне навантаження

Виробництво сучасних виробів і конструкцій, що характеризуються високою якістю та надійністю, пов'язане із використанням нових конструкційних матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями. Здебільшого вони працюють в умовах складного механічного навантаження та температурних градієнтів. При цьому навіть незначна концентрація напружень, що виникає у зоні дефектів елементів конструкцій, може призвести до втрати їх працездатності.

Забезпечення високої якості створюваних конструкцій є однією з найбільш важливих науково-технічних проблем. У зв'язку з цим важливим є удосконалення відомих і розробка нових сучасних автоматизованих методів і засобів контролю якості механізмів і конструкцій.

На даний час для виявлення дефектів у матеріалах і конструкціях застосовують групу неруйнівних методів, до якої входять: радіологічні, акустичні, люмінесцентні, метод вихрових струмів та ін. [1, 2]. Кожен з цих методів має свої недоліки та переваги, але жоден з них не є універсальним і не задовольняє усім вимогам, що пред'являються до засобів і методів неруйнівного контролю.

Групу вищезазначених методів контролю вдало доповнюють методи лазерної інтерферометрії, особливо спекл-інтерферометричні. Перспективним для інженерних застосувань є метод зсувної спекл-інтерферометрії (ширографії) [3, 4]. Цей метод дозволяє безпосередньо отримати значення похідних від переміщень і є ефективним при аналізі деформацій. Метод ширографії не чутливий до переміщення об'єкту як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації, а також не потребує особливого захисту від вібрацій.

Інтенсивний розвиток комп'ютерної та обчислювальної техніки дозволив суттєво удосконалити метод ширографії та розробити метод цифрової ширографії [5–10]. Важливою характерною особливістю методу цифрової ширографії є те, що він дозволяє спостерігати динамічну картину інтерференційних смуг на моніторі в режимі реального часу. Відносна простота цього методу дозволяє застосувати його для вирішення суттєво більш складних задач, які пов'язані з аналізом деформацій та контролем якості конструкцій у лабораторних та промислових умовах.

На даний час цифрова ширографія інтенсивно розвивається і має такі переваги, як наочність, безконтактність, високу чутливість, можливість виконання досліджень об'єктів складної форми та значних розмірів у реальному масштабі часу. Окрім цього, важливою перевагою, як було згадано вище, є нечутливість до вібрацій.

Ширографічна система для неруйнівного контролю якості. Ширографічний контроль якості заснований на реєстрації різниці у деформуванні при навантаженні бездефектного елемента та зони дефекту, оскільки в цій зоні характерним є зменшення жорсткості.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено автоматизовану ширографічну систему на основі модифікованого інтерферометра Майкельсона зі змінним кутом нахилу дзеркала в одному з оптичних плечей. Блок-схема цієї системи для неруйнівного контролю якості наведена на рис. 1.

Зовнішній вигляд ширографічного інтерферометра із лазерними модулями наведений на рис. 2. П'єзоелектричний фазозсувний елемент із джерелом живлення забезпечує необхідний зсув фаз між двома хвильовими фронтами в результаті зміщен-

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

© Л.М. Лобанов, В.В. Савицький, І.В. Киянець, О.П. Шуткевич, К.В. Шиян, 2021

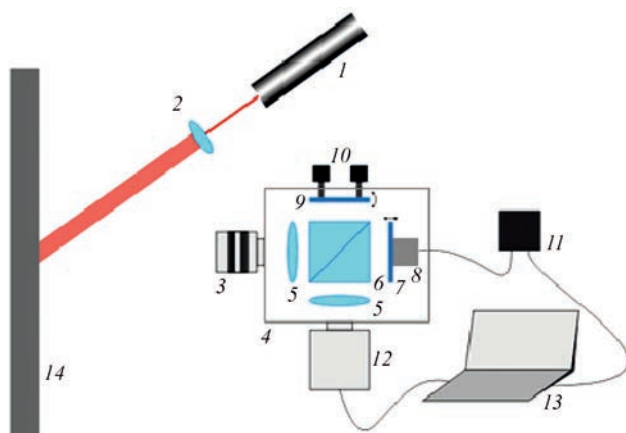


Рис. 1. Блок-схема широкографічної системи: 1 – джерело когерентного випромінювання; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – об'єкти; 4 – широкографічний інтерферометр, який включає в себе лінзи 5, діляльний кубик 6, дзеркало 7, закріплене на п'єзоелементі 8, дзеркало 9, яке створює зміщення зображення за допомогою гвинтів 10; 11 – контролер для керування п'єзоелементом 8; 12 – цифрова камера; 13 – ноутбук; 14 – досліджувані зразки

ня дзеркала в одному з оптичних плечей інтерферометра на величину $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$, де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання. Широ-дзеркало 9 слугує для створення широзміщення. Змінюючи кут нахилу дзеркала в інтерферометрі за допомогою гвинтів 10, можна задавати необхідну величину зміщення. При цьому величина широзміщення впливає на чутливість вимірювань системи контролю. Лазер призначений для освітлення об'єктів дослідження та формування на ньому спекл-структури. Змінний об'єкт 3, встановлений на широмодуль 4, дозволяє отримати та сфокусувати отримані спекл-картини на матрицю цифрової камери 12 для подальшої їхньої цифрової обробки. Змінюючи об'єкти, можливо налаштувати інтерферометр для дослідження ділянок об'єктів різної площі.

Дослідження якості об'єктів потребує визначення, які саме деформації поверхні краще реєструвати – площинні чи позаплощинні, оскільки різні типи навантаження досліджува-

ного зразка, що використовуються в процесі широкографічного контролю, спричиняють різні види деформування. Наприклад, при застосуванні термічного навантаження або внутрішнього тиску в об'єкті виникають позаплощинні деформування його поверхні, а у випадку механічного розтягу – площинні деформування.

Отримати чутливість інтерферометра до різних видів деформування (у площині або позаплощинне) можна змінюючи взаємне розташування об'єкта, освітлюючого лазерного випромінювання та напрямку спостереження крізь об'єкти інтерферометра. З метою досягнення максимальної чутливості оптичної схеми інтерферометра до позаплощинного деформування потрібно, аби кут між напрямками освітлення та спостереження був мінімальним. Тому лазери закріплюються безпосередньо на широкографічному інтерферометрі.

Розроблена автоматизована широкографічна система працює за наступним алгоритмом. Хвильовий фронт від лазера, відбитий від поверхні досліджуваного об'єкта, проходить крізь інтерферометр та фокусується на матрицю цифрової камери, за допомогою якої передається до комп'ютера для подальшої цифрової обробки. Потім об'єкт навантажують (внаслідок чого він деформується) і знов записують зображення досліджуваної поверхні. Зображення, що отримані до та після навантаження, опрацьовуються до отримання широкограми за допомогою розробленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона програмного забезпечення. Така широкограма являє собою картину поперемінних світлих та темних ділянок (смуг), що потребує подальшого опрацювання, а саме, зниження рівня спекл-шума, підвищення контрасту смуг та деякі інші. Програмне забезпечення дає можливість будувати поле розподілу фаз та тривимірне зображення поверхні деформування об'єкта, що контролюється, а також записувати отримані результати у вигляді документів.

До параметрів комп'ютерного опрацювання, окрім стандартних операцій (отримання інтерференційних картин, фільтрація та зшивка), належить додаткова фільтрація, оскільки картина інтерференційних смуг може бути «зашумленою» та недостатньо контрастною. Занадто велика кількість інтерференційних смуг призводить до зниження контрасту зображення, а це збільшує час і зменшує ефективність комп'ютерного опрацювання. Кількість інтерференційних смуг обирається для швидкого та ефективного опрацювання широкограми. Змінювати кількість інтерференційних смуг можна також регулюванням величини широзміщення, тобто зміною чутливості інтерферометру.

Неруйнівний контроль якості елементів титанових стільникових панелей проводили з використанням розробленого програмного забезпечення,



Рис. 2. Зовнішній вигляд широкографічного інтерферометра із лазерними модулями

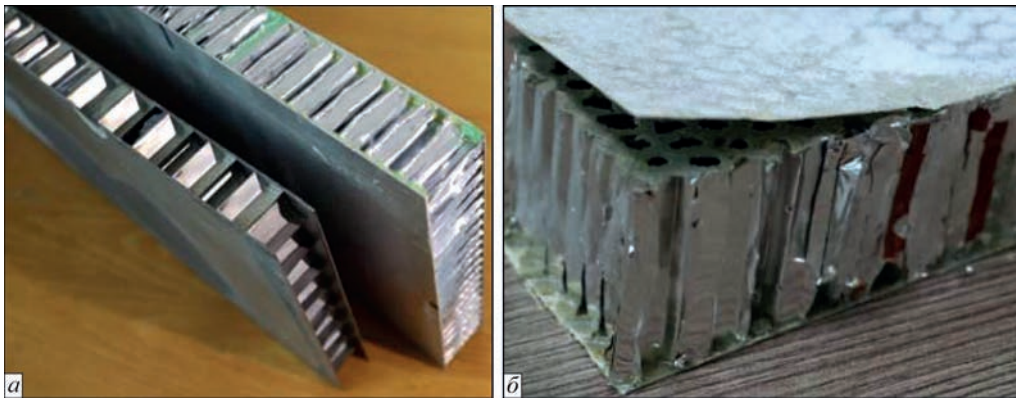


Рис. 3. Зовнішній вигляд стільникових панелей: а – паяно-клеєні з алюмінієвого та титанового сплавів; б – зруйнована панель

яке дозволяло отримувати інтерференційні картини смуг контрольованих об'єктів, фільтрувати отримані зображення, будувати поля фаз та тривимірне подання поверхні деформування об'єкта, записувати отримані результати у файл.

Розроблене програмне забезпечення використовується для: введення спекл-зображень з цифрової камери до комп'ютера; керування подачею напруги на п'єзоелемент, що розміщений в одному з плечей широкографічного інтерферометра; опрацювання широкографічних спекл-зображень до обчислення та тривимірної візуалізації полів деформування поверхні досліджуваних об'єктів; побудови графіків зміни похідних у заданому напрямку уздовж обраних перерізів; зберігання отриманих результатів у вигляді файла; виведення результатів широкографічного контролю на пристрій для друкування.

Вибір оптимального навантаження. Для отримання широкограми необхідно записувати відбиту світлову хвилю у двох станах досліджуваного об'єкта – початковому та навантаженому. Тому важливим є вибір способу навантаження, оскільки від цього залежить ефективність і достовірність широкографічного контролю. Концепція оптимального навантаження об'єкта при широкографічному неруйнівному контролі полягає у виборі такого способу навантаження, який дозволив би викликати в зоні ймовірного дефекту концентрацію напружень. При цьому намагаються створити такий напружений стан, який спричиняє найбільшу різницю у розподілі деформування уздовж поверхні досліджуваного об'єкта на дефектних та бездефектних ділянках.

Оптимальна величина навантаження обирається в залежності від механічних властивостей матеріалу, з якого виготовлено досліджуваний об'єкт. Наприклад, якщо об'єкт з полімерного матеріалу, температура навантаження має не викликати пластичну деформацію. У процесі широкографічного контролю якості в більшості випадків достатньо створити незначний (декілька градусів)

перепад поміж температурою досліджуваного об'єкта до та після нагріву.

При використанні механічного навантаження, тиску чи вакууму для всіх типів матеріалів величину навантаження обирають так, щоби спричинені деформації залишалися пружними та не досягали границі плинності матеріалу. Зазвичай спосіб навантаження та його параметри обирають експериментальним шляхом.

Неруйнівний контроль якості стільникових панелей. При виробництві сучасних конструкцій авіакосмічної техніки широко застосовують стільникові панелі (рис. 3), що дозволяє значно зменшити вагу виробів. Такі панелі складаються з двох зовнішніх обшивок, між якими знаходиться стільниковий наповнювач. В свою чергу наповнювач з'єднаний з зовнішніми листами за допомогою зварювання, пайки або склеювання. Зовнішні листи можуть бути виготовлені як з металів, так і з пластиків або композитів. Стільникова конструкція має високу жорсткість при вигині та міцність. До дефектів стільникової конструкції, які зменшують міцність при вигині та міцність при стисканні, відносять ушкодження наповнювача, дефекти поверхні, відсутність суцільності, невірно сформоване з'єднання.

Для використання вакуумного навантаження при широкографічному неруйнівному контролі якості стільникових панелей в ІЕЗ ім. Є.О. Патона було розроблено обладнання, що складається з вакуумної накладної камери, компресора, за до-



Рис. 4. Зовнішній вигляд вакуумної накладної камери (1) та компресора (2)

помогою якого створюється вакуум, та регулятора тиску в камері (рис. 4). Розміри вакуумної накладної камери можуть бути змінені відповідно до бажаних розмірів та кривизни досліджуваної ділянки елементів конструкцій. Досліджувана ділянка зразка навантажується рівномірно, проведення експериментів автоматизоване та займає до 2 хв.

Елементи стільникових панелей, в яких виявлялись дефекти методом ширографії, виготовлені з титанового сплаву. Обшивка панелей мала товщину 1 мм, товщина листа, з якого був виготовлений наповнювач, складала 0,5 мм, а діаметр стільникової комірки дорівнював 6 мм. Обшивка та наповнювач з'єднувались між собою шляхом паяння. При такому способі з'єднання сусідні кромки іноді знаходяться у стані прилипання, що призводить до виникнення дефектних зон у вигляді неспаювання. В умовах статичних або динамічних навантажень на ділянці такого дефекту з'являється розкриття країв, що може призвести до руйнування вузлів та елементів конструкцій в процесі їх експлуатації.

При тестуванні елементів титанових стільникових панелей використовувалось вакуумне навантаження, яке на відміну від термічного методу дозволяє забезпечити рівномірне та автоматизоване навантаження всієї досліджуваної ділянки зразка, а також зменшити час для проведення діагностики. Під час експерименту до поверхні досліджуваної ділянки прикладали спеціальну камеру та створювали вакуум до 0,7 атм і записували початковий стан поверхні (спекл-картину зображення поверхні досліджуваної ділянки панелі). Потім знижували або підвищували тиск в камері на величину 0,1...0,3 атм та записували стан стільникової панелі після навантаження. Зниження або підвищення тиску спричиняло деформування поверхні, що дозволяло проявлятися на широграмі деформації кожної стільникової комірки та візуалізовувало їх. На ділянках, де ослаблені зв'язки між комірками (наявність тріщини, відсутність зварного з'єднання тощо) або присутні інші види поверхневих дефектів, на широграмі з'являється локальне аномальне деформування поверхні досліджуваних елементів.

Під час тестування елементів стільникових панелей використовували широзміщення в інтерферометрі уздовж горизонтального, вертикального та діагонального напрямків. Широзміщення визначає напрямок оптичного диференціювання величин переміщень досліджуваної поверхні та дозволяє отримати параметри її деформування, що виникли під дією прикладеного навантаження.

На рис. 5 наведено результати ширографічного контролю елемента титанової стільникової панелі з використанням вакуумного навантаження

та широзміщення в діагональному напрямку. На зображеннях видно візуалізований стільниковий наповнювач з приблизно однаковою періодичністю зміни амплітуди деформування та визначено локальну дефектну ділянку, де є порушення цієї періодичності у вигляді «гантелі» (позначені

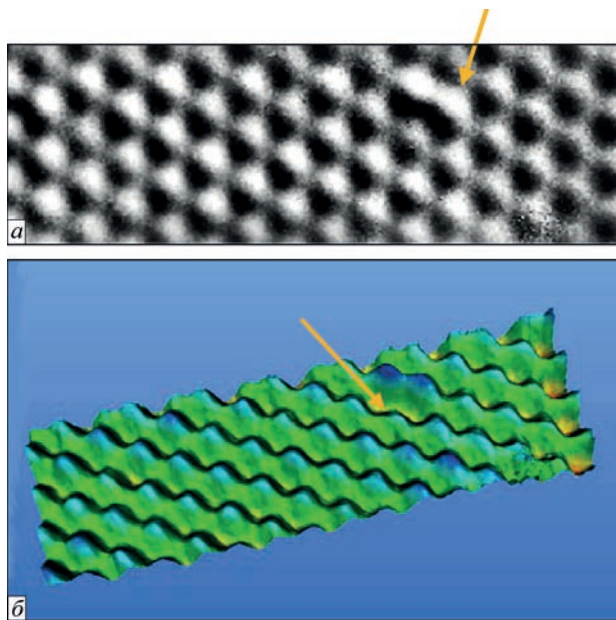


Рис. 5. Контроль якості елемента стільникової панелі, виготовленої з титанового сплаву, під вакуумним навантаженням при використанні широзміщення у діагональному напрямку: а – широграма досліджуваної ділянки; б – тривимірне зображення деформування досліджуваної ділянки

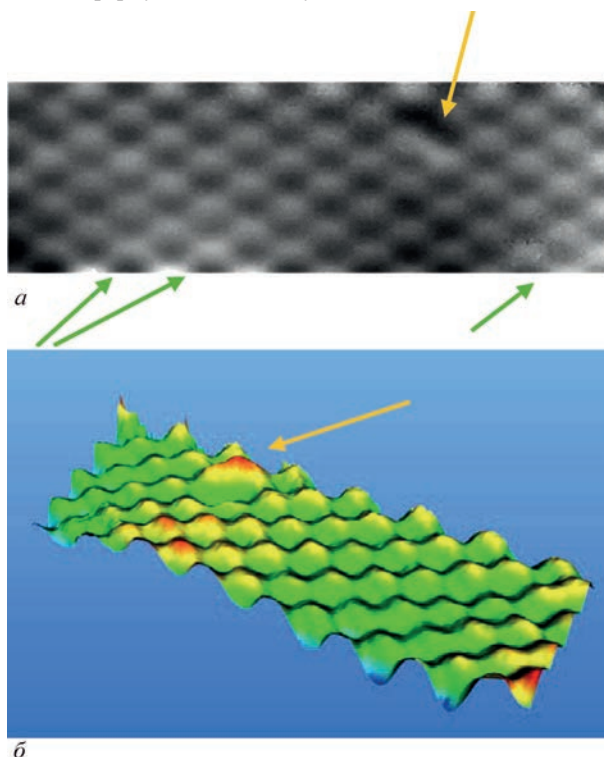


Рис. 6. Контроль якості елемента стільникової панелі під вакуумним навантаженням при використанні широзміщення у вертикальному напрямку: а – широграма досліджуваної ділянки; б – тривимірне зображення деформування досліджуваної ділянки

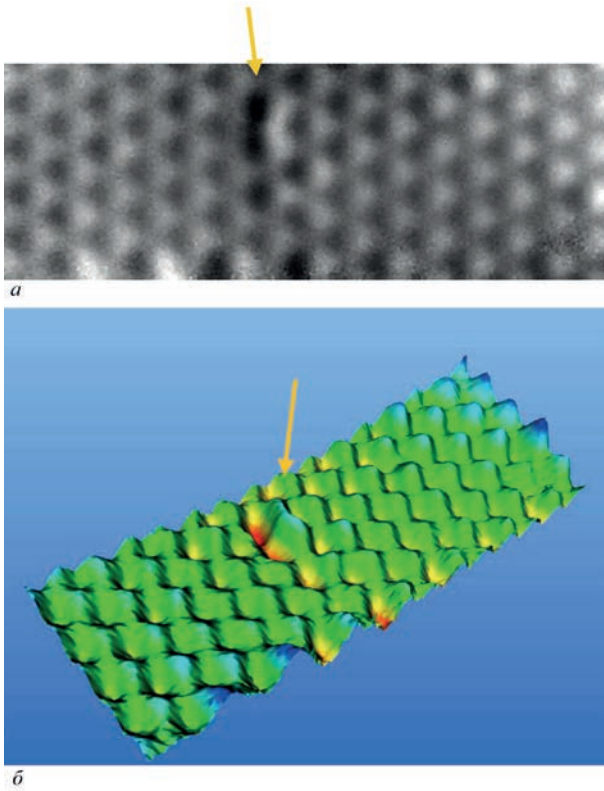


Рис. 7. Контроль якості елемента стільникової панелі під вакуумним навантаженням: широграма (а) та тривимірне зображення деформування досліджуваної ділянки (б) при використанні широзміщення у горизонтальному напрямку

стрілочками), що характеризує відсутність з'єднання між обшивкою і наповнювачем.

Використання широзміщення у вертикальному напрямку також дозволяє візуалізувати стільниковий наповнювач та визначити дефектну локальну ділянку (рис. 6). Однак у цьому випадку проявля-

ються аномальні зони уздовж країв досліджуваної ділянки поверхні стільникового елемента, що пов'язано з крайовим ефектом навантаження вакуумної камери (позначено стрілками знизу на рис. 6, а).

На рис. 7 наведено результати неруйнівного контролю якості елемента стільникової панелі методом ширографії з використанням вакуумного навантаження та широзміщення у горизонтальному напрямку. Локальну дефектну зону у вигляді «вертикальної гантелі», що позначена стрілками, чітко видно на фоні візуалізованого стільникового наповнювача.

Результати ширографічного контролю дефектних ділянок, що включають в себе більше двох стільникових комірок, наведені на рис. 8, 9. На зображеннях видно локальні зони аномального деформування досліджуваної поверхні на фоні візуалізованого стільникового наповнювача, що дає можливість оцінити кількість пошкоджених стільникових комірок.

На рис. 8 спостерігається істотно зменшена амплітуда деформування уздовж чотирьох вертикально розміщених комірок. Таке виявлення особливостей зазвичай пов'язано з більшою жорсткістю локальної ділянки зразка у порівнянні з іншими ділянками. Ця дефектна зона добре візуалізується як при горизонтальному, так й при вертикальному напрямі широзміщення.

На рис. 9 наведено результати тестування іншої ділянки елемента стільникової панелі, де крім вертикальної дефектної зони 1, існує дефектна зона 2, на що вказує зменшення амплітуди деформування більшої площі досліджуваної поверхні.

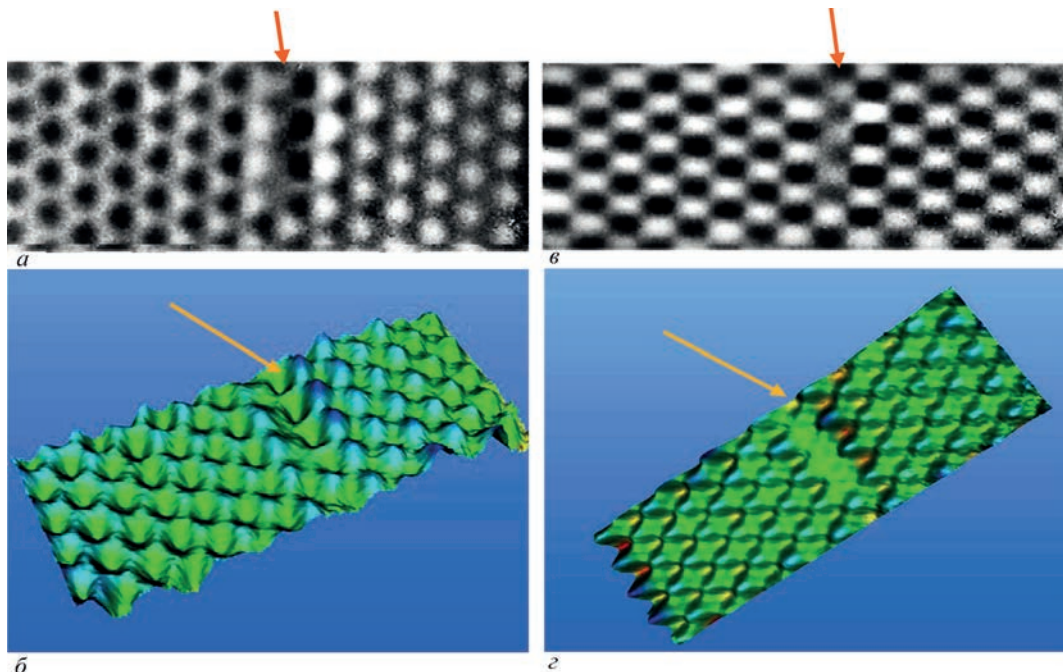


Рис. 8. Контроль якості елемента стільникової панелі під вакуумним навантаженням: широграма та тривимірне зображення деформування досліджуваної ділянки при використанні широзміщення у горизонтальному (а, б) та вертикальному (в, г) напрямку

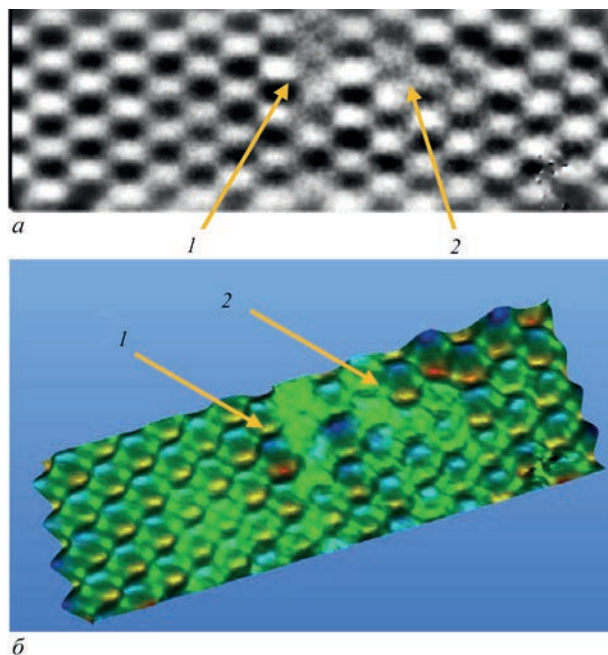


Рис. 9. Контроль якості елемента стільникової панелі під вакуумним навантаженням при використанні широзміщення у вертикальному напрямку: ширोगрама (а) та тривимірне зображення деформування (б) досліджуваної ділянки

Застосування вакуумної накладки дозволяє зберігати однакові умови під час проведення експериментів, що збільшує повторюваність отриманих результатів та підвищує їх достовірність на відміну від широко застосованого термічного навантаження, яке вимагає контролю навколишньої температури та часу на нагрівання та охолодження.

Отримані результати показали, що найбільш наочно дефектна зона виявляється у тому випадку, коли її площа становить менше 20 % від загальної площі контрольованої ділянки поверхні досліджуваного елемента.

Висновки

Метод електронної ширографії в поєднанні з вакуумним навантаженням є ефективним для виявлення внутрішніх дефектів різного розміру та конфігурації в елементах стільникових панелей.

Створене ширографічне обладнання та вакуумне навантаження дозволили підвищити ефективність досліджень за рахунок автоматизації експериментів та зменшення часу, необхідного для їх

проведення. Використання вакуумного навантаження дозволило покращити повторюваність отриманих результатів та підвищити їх достовірність.

Список літератури/References

- (2001) *Неруйнівний контроль і технічна діагностика*. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, Фіз.-мех. ін-т.
- (2001) *Non-destructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, PMI [in Ukrainian].
- Rastorgi, P.K., Inaudi, D. editors (2000) *Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection*. Oxford, Elsevier Science B.V.
- Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Олейник Е.М., Киянець І.В. (2004) Методика, технологія і апаратура ширографічного неразрушаючого контролю матеріалів і елементів конструкцій. *Техн. діагностика і неразр. контроль*, 2, 25–28.
- Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Oleinik, E.M., Kiyanets, I.V. (2004) Procedure, technology and instrumentation of shearographic non-destructive testing of materials and elements of structures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 25–28 [in Russian].
- Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: an optical measurement technique and applications. *Materials Sci. and Eng.*, R49, 61–87.
- Лобанов Л.М., Знова В.А., Пивторак В.А., Киянець І.В. (2016) Діагностика композиційних елементів авіаційних конструкцій методом електронної ширографії. *Техн. діагностика і неразр. контроль*, 2, 19–27.
- Lobanov, L.M., Znova, V.A., Pivtorak V.A., Kiyanets, I.V. (2016) Diagnostics of composite elements of aircraft structures by electron shearography method. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 19–27 [in Russian].
- Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Ткачук Г.І. і др. (2005) Оперативний контроль якості та определение остаточных напряжений в сварных конструкциях методами электронной ширографии и спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, 8, 39–44.
- Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Tkachuk, G.I. et al. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 8, 39–44.
- Zhao, Q., Dan, X., Sun, F. et al. (2018) Digital Shearography for NDT: Phase Measurement Technique and Recent Developments. *Appl. Sci.*, 8, 2662.
- ASTM E2581-14 (2019) *Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites and Sandwich Core Materials in Aerospace Applications*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Feng, H.J., Zhang, J., Liu, X.K. (2011) Studies on Digital Shearography for Testing of Aircraft Composite Structures and Honeycomb-Based Specimen. *Applied Mechanics and Materials*, 121–126 (October 2011), 1264–1268. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.121-126.1264>.
- Schuth, M., Buerakov, W., Vössing, F. et al. (2014) Shearographic inspections by an interferoscope. *Proc. SPIE 9302, International Conference on Experimental Mechanics, 2014, 93020C (4 March 2015)*. <https://doi.org/10.1117/12.2080807>.

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ELEMENTS OF TITANIUM HONEYCOMB PANELS BY SHEAROGRAPHY METHOD USING VACUUM LOAD

L.M. Lobanov, V.V. Savytskyi, I.V. Kyianets, O.P. Shutkevich, K.V. Shyian

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

The use of the modern method of non-destructive quality testing – electron shearography in combination with vacuum load for the study of elements of titanium honeycomb panels is considered. The effectiveness of the procedure for detecting inner defects of different location in the honeycomb panels, size and configuration is shown. 10 Ref., 9 Fig.

Key words: non-destructive quality testing, honeycomb panels, electron shearography, vacuum load

Надійшла до редакції 12.11.2021

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РАННЬОЇ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ МЕХАНІЗМІВ ПРИЧАЛЬНИХ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВАНТАЖУВАЧІВ

І.М. Яворський^{1,2}, Р.М. Юзефович^{1,3}, О.В. Личак¹, П.О. Семенов⁴

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

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Бидгощська Політехніка. 85796, Польща, Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

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

⁴Одеський національний морський університет. 65029, м. Одеса, вул. І. Мечнікова, 34

Описано властивості моделі вібрацій взаємозв'язаних обертових механізмів у вигляді біперіодично нестаціонарних випадкових процесів (БПНВП). Розглянуто окремі випадки такої моделі, що дають змогу проводити аналіз даних методами періодично нестаціонарних випадкових процесів (ПНВП). З використанням цих методів проаналізовано стан механізмів з підвищеним рівнем вібрацій. Проведено розділення детермінованих і стохастичних вібрацій та визначено параметри, які описують структуру прихованих періодичностей першого і другого порядку. Встановлено причини підвищеного рівня вібрацій. Бібліогр. 18, табл. 3, рис. 14.

Ключові слова: підйомний механізм, вібрація, періодична нестаціонарність, детерміновані коливання, амплітудний спектр, стохастична високочастотна модуляція, дисперсія

Вступ. У системах вібраційної діагностики носіями інформації про технічний стан механізму є переміщення, швидкість чи прискорення контактних поверхонь механізмів, які виникають у результаті взаємодії їх дефектних деталей. Характер такої взаємодії відображається у параметрах зареєстрованих вібраційних сигналів. Для опису та аналізу закономірностей останніх необхідно обґрунтувати їх адекватні математичні моделі, методи й алгоритми обробки та комп'ютерної підтримки процесів виділення діагностичних ознак і прийняття рішень про технічний стан об'єкта діагностування.

Вібраційні сигнали обертових механізмів характеризуються ритмічною мінливістю, основними рисами якої є циклічна повторюваність і стохастичність. Нелінійні ефекти, які виникають у механічних системах при появі дефектів, спричиняють їх взаємодію, яка відображається у властивостях сигналів у вигляді модуляцій. Така модуляція кількісно характеризується параметрами, що описують структуру періодичних чи майже періодичних часових змін моментних функцій першого та другого порядків відповідних класів нестаціонарних випадкових процесів [1–11]. Ці параметри доцільно використовувати при формуванні діагностичних ознак для виявлення дефектів. Як показали дослідження [1, 7–9, 12], використання таких ознак дає можливість виявляти дефекти на ранніх стадіях їх

розвитку та проводити ефективний моніторинг об'єкта діагностування.

Вібрації механізмів, які складаються з багатьох обертових вузлів, мають складну поліритмічну структуру. Вона зумовлена, насамперед, різними швидкостями обертання окремих елементів. Так, вібрації підшипника кочення в залежності від місця розташування дефекту можуть характеризуватися коливаннями з частотами обертання валу, частотами обертання тіл кочення по зовнішньому чи внутрішньому кільцях, частотами сепараторів, а також частотами, що визначаються їх комбінаціями. Вібрації зубчатої пари можуть мати коливання з частотами обертання валів, частотами зубозачеплення та їх комбінаціями. Тому в загальному випадку вібрації можуть описуватися поліперіодично нестаціонарними випадковими процесами [1, 3, 4], що належать до класу майже періодично нестаціонарних. У найпростішому випадку, коли взаємодіють між собою тільки два стохастичних ритми, приходимо до моделі у вигляді біперіодично нестаціонарного випадкового процесу. Нижче ми коротко охарактеризуємо таку модель вібраційного сигналу, розглянемо окремі випадки, котрі дають можливість обґрунтувати аналіз вібрацій об'єктів зі складною кінематикою з використанням методів періодично нестаціонарних випадкових процесів.

БПКВП модель вібраційного сигналу. Ефективність методів обробки циклостационарних сиг-

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

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

© І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, О.В. Личак, П.О. Семенов, 2022

налів у моніторингу стану машин можна загалом пояснити їх здатністю виявляти модуляції, викликані появою несправностей. Ефекти модуляції у вібраційній моделі у вигляді періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП), які описують стохастичну повторюваність з одним періодом, характеризуються взаємостационарними випадковими процесами в їх гармонічному представленні [1, 11, 13]:

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \xi_k(t) e^{ik \frac{2\pi}{P_1} t},$$

де Z – множина цілих чисел і; P_1 є періодом нестационарності (періодом обертання однієї з шестерень). Узагальнюючи це подання, можна зробити висновок, що модуляція двох стохастичних періодичностей, зумовлена обертанням двох шестерень, може бути представлена наступним чином:

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \xi_k^{(P_2)}(t) e^{ik \frac{2\pi}{P_1} t}, \quad (1)$$

де гармоніка частоти $2\pi/P_1$ і кратні їй модулюють ся ПКВП з періодом P_2 :

$$\xi_k^{(P_2)}(t) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} \xi_{kl}(t) e^{il \frac{2\pi}{P_2} t}.$$

Отже, для випадкового процесу (1), маємо:

$$\xi(t) = \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} \xi_{kl}(t) e^{i\Lambda_{kl} t}, \quad (2)$$

де $\xi_{kl}(t)$ є взаємостационарними випадковими процесами і $\Lambda_{kl} = k \left(\frac{2\pi}{P_1} \right) + l \left(\frac{2\pi}{P_2} \right)$. Можна зауважити, що процес (2) є сумою амплітудно- і фазо-модульованих гармонік, в яких частоти Λ_{kl} є лінійною комбінацією двох основних частот $\Lambda_{10} = k(2\pi/P_1)$ та $\Lambda_{01} = l(2\pi/P_2)$. Математичні сподівання модулюючих процесів $m_{kl} = E\xi_{kl}(t)$ є коефіцієнтами Фур'є функції середнього:

$$m(t) = E\xi(t) = \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} m_{kl} e^{i\Lambda_{kl} t}. \quad (3)$$

Для функції кореляції $R(t, \tau) = E\overset{\circ}{\xi}(t)\overset{\circ}{\xi}(t+\tau)$, $\overset{\circ}{\xi}(t) = \xi(t) - m(t)$ ми маємо:

$$R(t, \tau) = \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} R_{kl}(\tau) e^{i\Lambda_{kl} t}, \quad (4)$$

де

$$R_{kl}(\tau) = \sum_{p,q \in \mathbb{Z}} r_{p-k, q-l, p, q} e^{i\Lambda_{pq} \tau}, \quad (5)$$

і $r_{pqkl}(\tau) = E\overset{\circ}{\xi}_{pq}(t)\overset{\circ}{\xi}_{kl}(t+\tau)$, $\overset{\circ}{\xi}_{pq}(t) = \xi_{pq}(t) - m_{pq}$ є взаємкореляційними функціями модулюючих процесів, знак « $\overset{\circ}{\cdot}$ » означає комплексне спряження. Таким чином, коефіцієнти Фур'є кореляційної функції (4) визначаються взаємкореляційними функціями модулюючих процесів, у яких індекси зсува-

ються на k і l відповідно. З (5) випливає, що взаємні кореляції модулюючих процесів $\xi_{kl}(t)$ з різними індексами призводять до біперіодичної нестационарності другого порядку. Наслідком цього є кореляції відповідних спектральних складових, які кількісно характеризуються перетворенням Фур'є виразу (5):

$$f_{kl}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{kl}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (6)$$

З (5) випливає, що:

$$f_{kl}(\omega) = \sum_{p,q \in \mathbb{Z}} f_{p-k, q-l, p, q}(\omega - \Lambda_{pq}),$$

де

$$f_{pqkl}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r_{pqkl}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

– взаємоспектральні густини модулюючих процесів $\xi_{pq}(t)$. Величини (5) і (6) називають, відповідно, кореляційними та спектральними компонентами [1–3]. Нульовий кореляційний компонент $R_{00}(\tau)$ визначається автокореляційною функцією

$$r_{pq}(\tau) = E\overset{\circ}{\xi}_{pq}(t)\overset{\circ}{\xi}_{pq}(t+\tau):$$

$$R_{00}(\tau) = \sum_{p,q \in \mathbb{Z}} r_{pq}(\tau) e^{-i\Lambda_{pq} \tau}.$$

Це усереднена за часом кореляційна функція випадкового процесу (2), тобто кореляційна функція її стаціонарного наближення.

Нульовий спектральний компонент

$$f_{00}(\omega) = \sum_{p,q \in \mathbb{Z}} f_{pq}(\omega - \Lambda_{pq}) \quad (7)$$

є спектральною густиною потужності стаціонарного наближення для (2). Вона визначає спектральний розклад усередненої за часом миттєвої потужності коливань $R(0, t)$. Випадкові процеси, математичне сподівання та кореляційна функція, які є біперіодичними функціями та можуть бути представлені рядами (3) та (4), називаються БПКВП. Коефіцієнти Фур'є кореляційної функції та спектральної густини є загальними характеристиками амплітудної та фазової модуляції гармонік несучої БПКВП. Нульова спектральна складова, як видно з (7), є сумарною потужністю спектральних густин модулюючих процесів $\xi_{pq}(t)$, зміщених на Λ_{pq} . Спектральний компонент $f_{kl}(\omega)$ (6) є сумою зміщених взаємоспектральних густин модулюючих процесів, індекси яких відрізняються k і l відповідно. Виходячи з вищезазначених тверджень, можна зробити висновок, що $f_{00}(\omega)$ описує спектр коливань, а функції $f_{kl}(\omega)$ – кореляцію гармонік цього спектру, в якому частоти зміщені на $\Lambda_{kl} = k \left(\frac{2\pi}{P_1} \right) + l \left(\frac{2\pi}{P_2} \right)$. Ці кореляції не дорівнюють

нулю, лише якщо процеси модуляції з відповідними номерами взаємопов'язані.

З виразу (2) легко отримуються окремі випадки прихованої періодичності біоритміки. Виділимо серед них тільки ті, аналіз яких можна провести в рамках ПНВП-підходу.

Припустимо, що $\xi_{kl}(t) = c_{kl} + \xi_{k0}(t) + \xi_{0l}(t)$, де c_{kl} – деякі комплексні числа, а $\xi_{k0}(t)$ і $\xi_{0l}(t)$ – стаціонарні випадкові процеси. Тоді:

$$\xi(t) = \sum_{k,l \in Z} c_{kl} e^{i\Lambda_{kl}t} + \sum_{k \in Z} \xi_{k0}(t) e^{ik \frac{2\pi}{P_1}t} + \sum_{l \in Z} \xi_{0l}(t) e^{il \frac{2\pi}{P_2}t} = s(t) + \xi_1(t) + \xi_2(t). \quad (8)$$

Тут $s(t)$ є біперіодичною функцією. Якщо множини $\{\xi_{k0}(t), k \in Z\}$ і $\{\xi_{0l}(t), l \in Z\}$ є некорельованими, а випадкові процеси, що належать до кожної з них, стаціонарно зв'язаними, то $\xi_1(t)$ і $\xi_2(t)$ є ПНВП. Адитивна модель (8) може бути застосована до аналізу вібрацій двох ушкоджених вузлів, розвиток дефектів яких не впливає один на одного. У випадку одностороннього вузла один з ПНВП у представленні (8) стає стаціонарним випадковим процесом. Тоді випадкові процеси, що описують модуляції, а саме $\xi_{k0}(t)$ чи $\xi_{0l}(t)$, є некорельованими.

Мультиплікативну модель у вигляді добутку двох ПНВП з різними періодами P_1 і P_2 отримуємо у випадку, коли $\xi_{kl}(t) = \xi_{k0}(t)\xi_{0l}(t)$. Тоді:

$$\xi(t) = \sum_{k \in Z} \xi_{k0}(t) e^{ik \frac{2\pi}{P_1}t} \sum_{l \in Z} \xi_{0l}(t) e^{il \frac{2\pi}{P_2}t} = \xi_1(t)\xi_2(t).$$

Аналіз такої моделі може бути проведений методами ПНВП, якщо один з періодів суттєво перевищує значення другого. Якщо дефектним є

тільки один з вузлів, то власне його вібрації описуватимуться ПНВП, а іншого – стаціонарним випадковим процесом $\eta(t)$. Тоді $\xi(t) = \eta(t)\xi_1(t)$. У такому представленні вплив бездефектного вузла відображається у взаємодії характеристик модуляції несучих гармонік пошкодженого вузла.

Дослідження вібрацій причального контейнерного перевантажувача. Співробітниками відділу методів та засобів відбору та обробки діагностичних сигналів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (ФМІ) спільно з представниками ТОВ «ПОРТТЕХЕКСПЕРТ» у вересні 2021 р. було проведено виміри та запис сигналів вібрацій механізму підйому вантажу причальних контейнерних перевантажувачів «ЗРМС» (Кран 1 і Кран 2 відповідно), що належать ТОВ «БРУКЛІН КИЇВ ПОРТ», який є оператором контейнерного терміналу на базі причалів №№ 42, 43 Державного підприємства «Одеський морський торговельний порт».

Схема розташування точок контролю приводу механізму наведена на рис. 1, 2. Під час вимірювань давачі були прикріплені до корпусу механізму з використанням магнітів. У кожній точці записувався сигнал віброприскорення та визначалося його середньоквадратичне значення (СКЗ) при роботі механізму крана на підйом та на опускання спредера без корисного навантаження за допомогою давачів віброприскорення АВС-117. Частота дискретизації вібраційних сигналів складала 10 кГц, смуга частот вхідного сигналу від 2 Гц до 2 кГц, тривалість запису реалізацій сигналів для кожної точки контролю становила 5 с.

Визначення рівнів вібрацій механізмів проведено у відповідності до ДСТУ ISO 10816-1:2007 «Класи механізмів та норми їх вібрації» віброді-

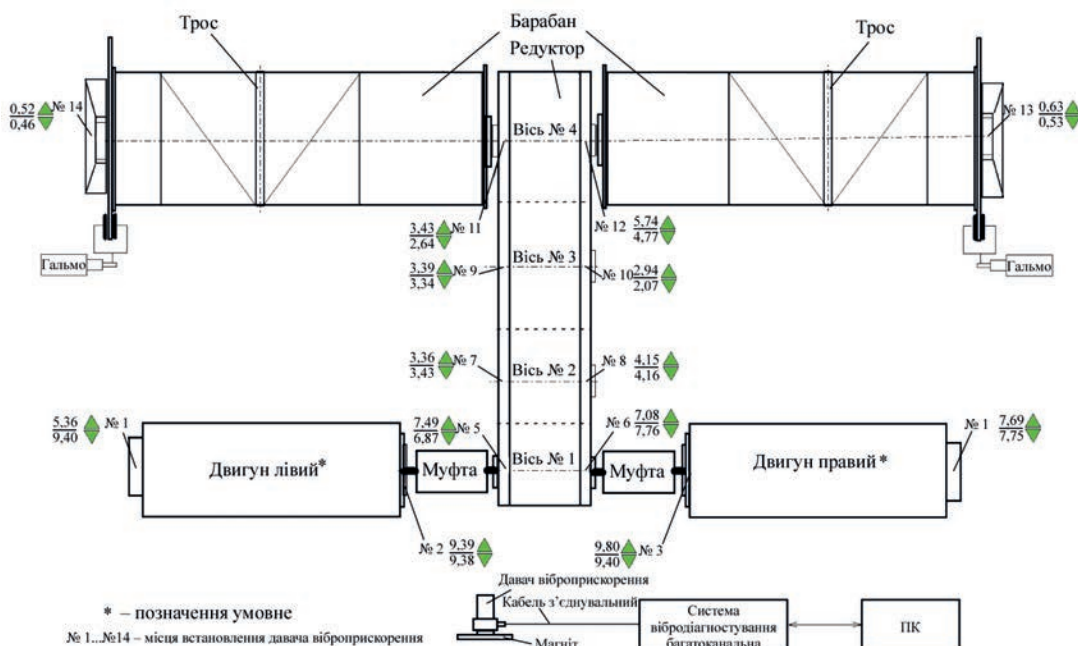


Рис. 1. Схема розташування точок контролю та виміряні значення СКЗ віброприскорення (на підймання та опускання) для Крану 1

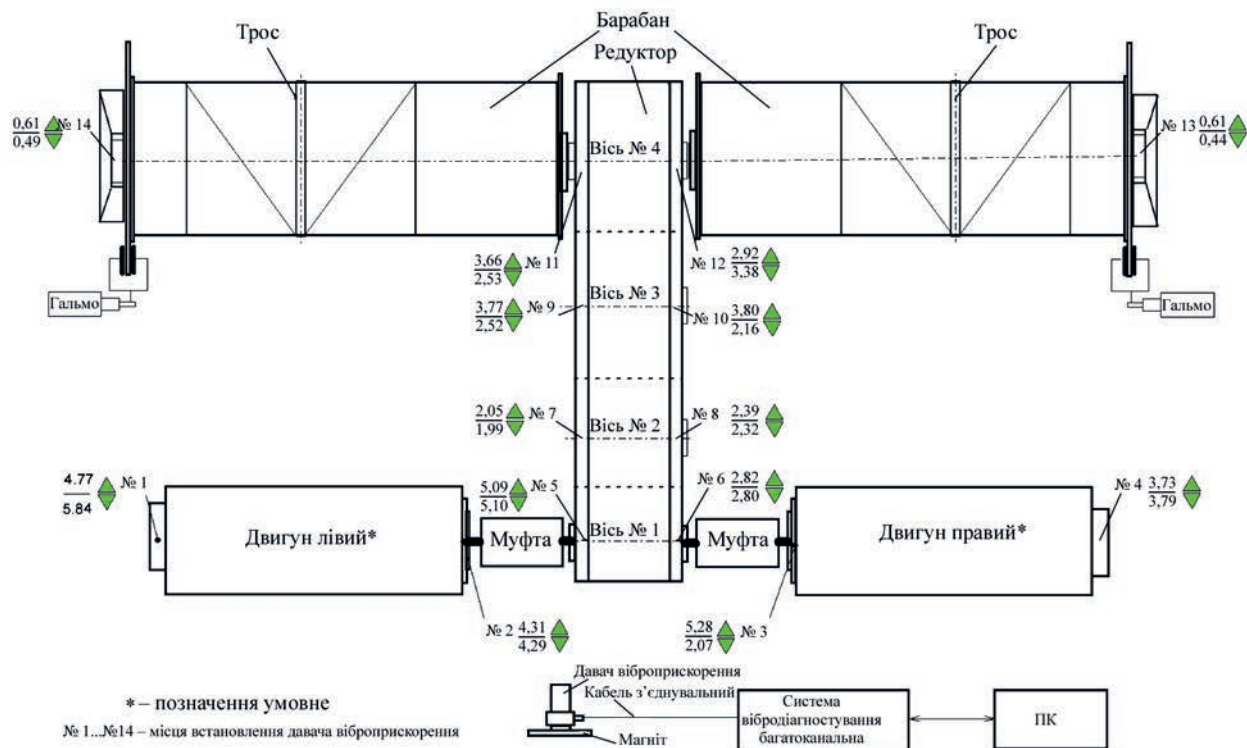


Рис. 2. Схема розташування точок контролю та виміряні значення СКЗ віброприскорення (на піднімання та опускання) для Крану 2

агностичною системою «КОМПАКТ-ВІБРО», яка роброблена у ФМІ [15, 16]. Відповідно ДСТУ ISO 10816-1:2007 досліджувані механізми відносяться до 3 класу (потужні первинні мотори і інші потужні механізми з обертовими масами, встановлені на масивних фундаментах відносно жорстких в напрямку вимірювання вібрації).

Нормативні величини СКЗ віброприскорення, значення яких дозволяє оцінити технічний стан механізму згідно з встановленими нормами інтенсивності вібрації, наведені в табл. 1.

Оцінювання стану вузлів механізмів виконано на основі визначення СКЗ віброприскорень (див. табл. 2, 3).

Як впливає з табл. 2, підвищеними та близькими до граничних виявилися середньоквадратичні значення вібрацій підшипникових вузлів Крану 1. Для встановлення причин такого стану отримані реалізації вібраційних сигналів були проаналізовані з використанням розробленої нами методології.

Аналіз структури вібрацій та визначення її параметрів. Відрізок реалізації одного з зареєстрованих сигналів віброприскорення показано на рис. 3. Як видно з рис. 3, вібрації мають вигляд чітко виражених груп, які слідує одна за одною з частотою приблизно 60 Гц. Для встановлення загальних властивостей сигналів, зокрема їх спектрального складу, були обчислені кореляцій-

Таблиця 1. Оцінка технічного стану механізму по інтенсивності вібрації (ISO 2372)

Рівні вібрації (СКЗ)		Класи механізмів			
За віброшвидкістю	За віброприскоренням	Малі механізми P < 15 кВт	Середні механізми 15 кВт< P < 75 кВт	Великі механізми на жорстких фундаментах P > 300 кВт	Великі механізми з нежорстким кріпленням P > 300 кВт
мм/с	м/с²	Клас 1	Клас 2	Клас 3	Клас 4
44,6	70,1	C	C	C	C
28,2	44,2				B
17,8	27,9			A	
11,2	17,6		B		
7,1	11,1		A		
4,5	7,2			B	
2,8	4,4			A	
1,8	2,8		B		
1,12	1,8	A			
0,71	1,1		A		
0,45	0,7				
A – задовільне значення вібрації, B – допустиме значення вібрації, C – аварійне значення вібрації					

Таблиця 2. Обчислені величини СКЗ віброприскорення елементів приводу механізму для Крану 1

Номер точки	Найменування вузла	Фактичне значення СКЗ, м/с ²		Граничне значення СКЗ, м/с ²
		при підйомі	при опусканні	
1	Двигун лівий	5,36	9,40	11,1
2	– // –	9,39	9,38	11,1
3	Двигун правий	9,80	9,40	11,1
4	– // –	7,69	7,75	11,1
5	Редуктор	7,49	6,87	11,1
6	– // –	7,08	7,76	11,1
7	– // –	3,36	3,43	11,1
8	– // –	4,15	4,16	11,1
9	– // –	3,39	3,34	11,1
10	– // –	2,94	2,07	11,1
11	– // –	3,43	2,64	11,1
12	– // –	5,74	4,77	11,1
13	Виносна опора правого барабану	0,63	0,53	11,1
14	Виносна опора лівого барабану	0,52	0,46	11,1

Таблиця 3. Обчислені величини СКЗ віброприскорення елементів приводу механізму для Крану 2

Номер точки	Найменування вузла	Фактичне значення СКЗ, м/с ²		Граничне значення СКЗ, м/с ²
		при підйомі	при опусканні	
1	Двигун лівий	4,77	5,84	11,1
2	– // –	4,31	4,29	11,1
3	Двигун правий	5,28	2,07	11,1
4	– // –	3,73	3,79	11,1
5	Редуктор	5,09	5,10	11,1
6	– // –	2,82	2,80	11,1
7	– // –	2,05	1,99	11,1
8	– // –	2,39	2,32	11,1
9	– // –	3,77	2,52	11,1
10	– // –	3,80	2,16	11,1
11	– // –	3,66	2,53	11,1
12	– // –	2,92	3,38	11,1
13	Виносна опора правого барабану	0,61	0,44	11,1
14	Виносна опора лівого барабану	0,61	0,49	11,1

ні функції та спектральні густини їх стаціонарних наближень. Для цього були використані наступні залежності:

$$\hat{R}(jh) = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} [\xi(nh) - \hat{m}] [\xi((n+j)h) - \hat{m}],$$

$$\hat{m} = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \xi(nh),$$

$$\hat{f}(\omega) = \frac{h}{2\pi} \sum_{n=-L}^L k(nh) \hat{R}(nh) \cos \omega nh,$$

де $h = T/K$ – крок дискретизації; T – тривалість часу реєстрації сигналу; j – ціле число; $L = \tau_m/h$ – натуральне число; τ_m – точка усічення корелограми; $k(nh)$ – кореляційне вікно. У даному випадку було вибрано вікно Хемінга:

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

Результати обчислень для одного з сигналів представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4. З даних рис. 4 випливає, що групова структу-

ра зберігається і в залежності кореляційної функції від зсуву. Її характерною рисою також є незаникаючий «хвіст», що свідчить про наявність у складі вібрації детермінованої складової. Залежність оцінки спектральної густини сигналу від частоти (рис. 4, б) показує, що основна частина потужності вібрацій зосереджена у високочастотній області, при цьому високочастотні коливання є у значній мірі вузькосмуговими. На фоні потужних піків в інтервалі [1,4 кГц; 1,6 кГц], значення спектральної густини у низькочастотній області ледве помітні. Тому для більш ймовірного аналізу низькочастотних вібрацій

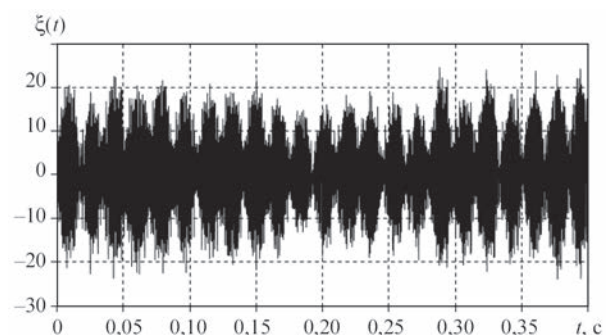


Рис. 3. Відрізок реалізації сигналу

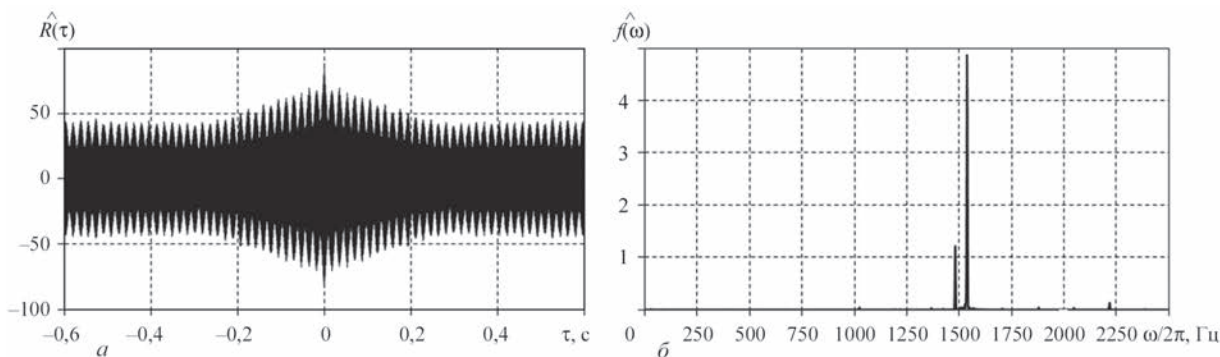


Рис. 4. Оцінка кореляційної функції (а) та спектральної густини (б)

розділили частотну область сигналів на два інтервали: $[0 \text{ кГц}; 1,0 \text{ кГц}]$ і $[1,0 \text{ кГц}; 2,5 \text{ кГц}]$. Графіки оцінок кореляційної функції та спектральної густини потужності низькочастотної складової сигналу наведені на рис. 5. Спектральна густина має гостровершинний характер, а незанимаючі коливання кореляційної функції свідчать про те, що цей спектр є змішаним і значна доля потужності сигналу належить до детермінованих коливань.

Для подальшої деталізації структури вібрацій потрібно, перш за все, розділити їх детерміновану і стохастичну складові. Першим кроком у такому розділенні є визначення періоду нестационарності (базової частоти) детермінованих коливань. Для цього доцільно використати як найбільш ефективний метод найменших квадратів [1, 17], який зводиться до пошуку координат максимальних значень функціоналу:

$$\hat{F}_1(\theta) = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \hat{m}^2(\theta, nh), \quad (9)$$

де

$$\hat{m}(\theta, nh) = \sum_{k=1}^{L_1} \left[\hat{m}_k^c(\theta) \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh + \hat{m}_k^s(\theta) \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \right],$$

$$\begin{cases} \hat{m}_k^c(\theta) \\ \hat{m}_k^s(\theta) \end{cases} = \frac{2}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \xi(nh) \begin{cases} \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh \\ \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \end{cases}, \quad (10)$$

а θ є так званим «пробним» періодом і L_1 – певним вибраним числом гармонік. Відмітимо, що максимальне значення функціоналу (9) є близьким до середньої потужності детермінованої складової коливань.

Графік залежності квадратичного функціоналу (9) від пробної частоти $f = 1/\theta$ для $L_1 = 30$ показаний на рис. 6. Значення частоти, при якому величина функціоналу досягає максимуму, було прийнято за оцінку базової частоти $\hat{f}_0 = 1/\hat{P}_1$. З точністю до трьох знаків знаходимо $\hat{f}_0 = 28,480$ Гц. Знайдене значення відповідає частоті обертання ротора двигуна. Сумарна потужність гармонік обертання, яка визначається величиною (9) в точці $\hat{f}_0$, дорівнює $\hat{F}_1(\frac{1}{\hat{f}_0}) = 0,24(\frac{M}{c^2})^2$.

Ця величина становить трохи менше половини загальної потужності низькочастотних коливань, яка визначається величиною оцінки кореляційної функції в точці $\tau = 0$, тобто $\hat{R}(\tau=0) = 0,62(\frac{M}{c^2})^2$ (див. рис. 5, а).

Підставляючи у формулу (10) замість $1/\theta$ значення $\hat{f}_0$, обчислимо косинусні та синусні коефіцієнти, а на їх основі амплітуди відповідних гармонік:

$$A(k\hat{f}_0) = \sqrt{(\hat{m}_k^c)^2 + (\hat{m}_k^s)^2}. \quad (11)$$

Амплітудний спектр (11) у вигляді діаграми представлений на рис. 7, б. Як бачимо, спектр є досить широким, однак переважна доля потужності детермінованих коливань належить першим трьом гармонікам.

На рис. 7, а представлена часова залежність періодичної функції:

$$\hat{m}(t) = \sum_{k=1}^{30} \left[\hat{m}_k^c(\theta) \cos 2\pi k \hat{f}_0 t + \hat{m}_k^s(\theta) \sin 2\pi k \hat{f}_0 t \right], \quad (12)$$

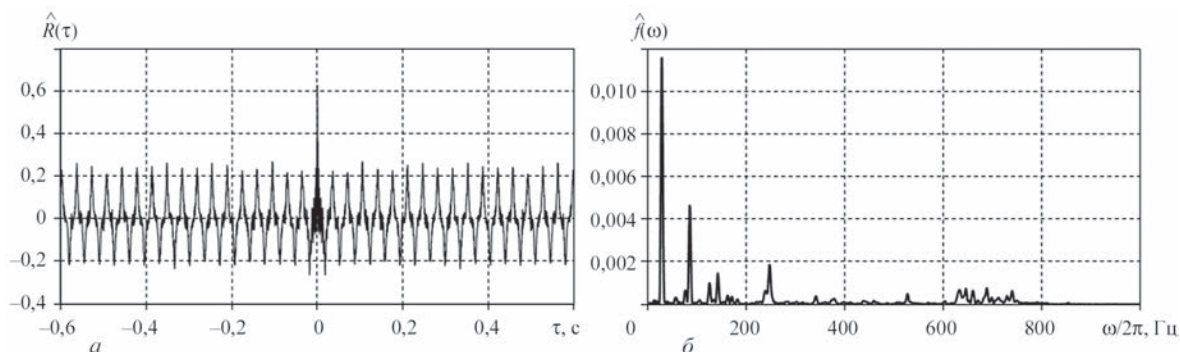


Рис. 5. Оцінка кореляційної функції (а) та спектральної густини (б) низькочастотного сигналу

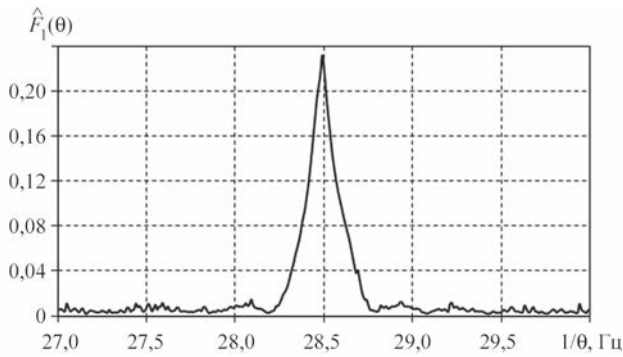


Рис. 6. Квадратичний функціонал (13) в залежності від пробної частоти

яка при виконанні умови

$$h \leq \frac{P_1}{2L_1 + 1}$$

є інтерполяційною формулою для детермінованих вібрацій, котрі збуджуються обертанням ротора.

Знаючи залежність (12) для всіх $t \in [0, P_1]$, виділимо залишкові вібрації $\xi(t) = \xi(t) - \hat{m}(t)$ і проведемо їх спектрально-кореляційний аналіз. Графіки кореляційної функції і спектральної густини, обчислені на основі часового ряду $\xi(nh)$, показані на рис. 8. Кореляційна функція тепер швидко зникає до рівня малопотужних коливань (рис. 8, а). Спектральна густина залишку, як і початковий сигнал, має гребінчасту структуру (рис. 8, б), яка зумовлена малопотужними гармоніками з характерними для підшипника частотами, їх комбінаціями, а також вузько-смужовою стохастичною модуляцією цих гармонік. Ці малопотужні залишкові коливання незначно впливають на роботу механізму, тому наразі у фор-

мулі (8) можемо виділити детерміновану періодичну функцію, яка представляється скінченим рядом (12).

Перейдемо тепер до аналізу вібрацій в інтервалі [1,0 кГц; 2,5 кГц] (рис. 9). Оцінка кореляційної функції при великих зсувах має вигляд незанимаючих високочастотних коливань (рис. 10, а, б), що можуть бути спричинені наявністю детермінованої складової. Щоб підтвердити таке припущення, обчислимо функціонал (9), змінюючи пробну частоту в інтервалах [1470 Гц, 1490 Гц] і [1525 Гц, 1545 Гц]. Отримані чітко виражені піки на графіках частотної залежності функціоналу (13) на частотах $f_0^1 = 1481,13$ Гц та $f_0^2 = 1538,11$ Гц (рис. 11, а, б) дають змогу ствердно відповісти на це. Обчисливши на основі виразів (10) амплітуди відповідних гармонік, маємо $A(\hat{f}_0^1) = 4,163$ м/с² і $A(\hat{f}_0^2) = 7,833$ м/с². Сумарна потужність гармонік дорівнює $39,35 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right)^2$, що становить приблизно

половину від загальної потужності високочастотних вібрацій.

Представимо високочастотні детерміновані коливання у вигляді:

$$s_2(t) = \sum_{k=1}^2 \left[\hat{a}_k(f_0^{(k)}) \cos 2\pi f_0^{(k)} t + \hat{b}_k(f_0^{(k)}) \sin 2\pi f_0^{(k)} t \right], \quad (12)$$

і виділимо стохастичну складову $\xi(nh) = \xi(nh) - s_2(t)$. Оцінка її кореляційної функції повільно осциляційно зникає до рівня малопотужних флуктуацій та має групову структуру (рис. 12, а). Тому оцінка спектральної густини, обчислена на основі її кореляційної функції, є гостровершинною.

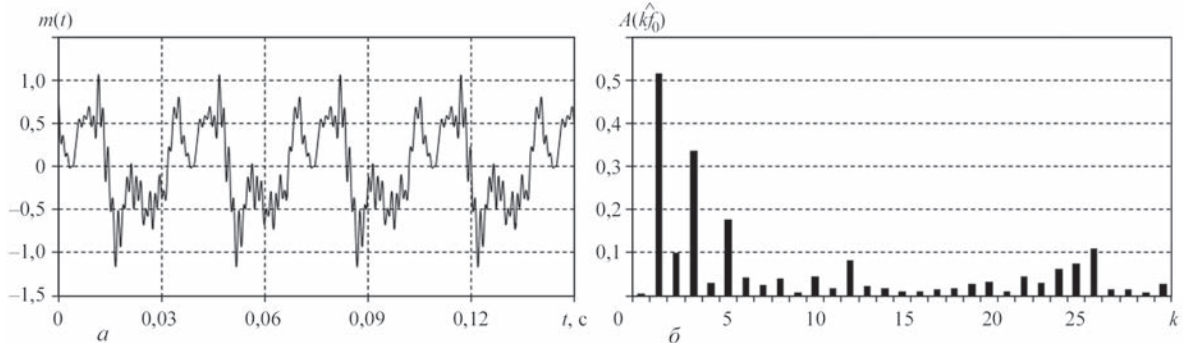


Рис. 7. Детерміновані коливання (а) та їх амплітудний спектр (б)

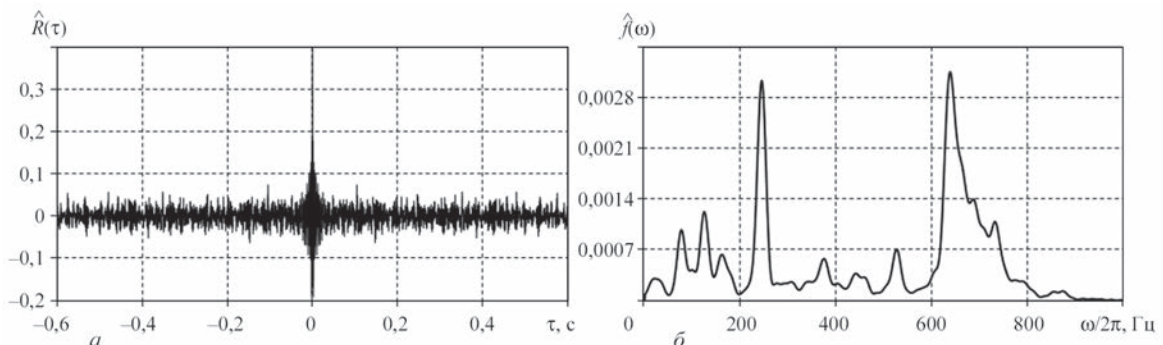


Рис. 8. Оцінки кореляційної функції (а) та спектральної густини (б) стохастичної складової низькочастотного сигналу

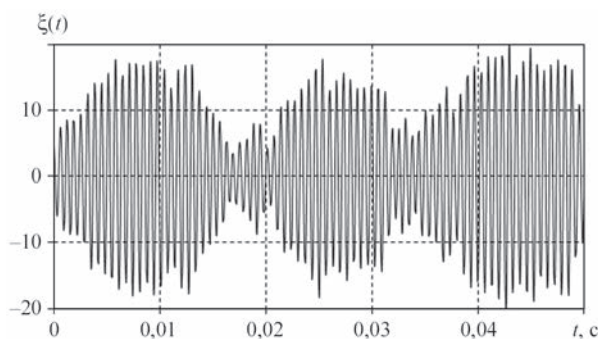


Рис. 9. Відрізок реалізації високочастотного сигналу

При цьому існують два піки, котрі значно переважають інші за величиною на частотах, які практично співпадають з частотами детермінованих гармонік (рис. 12, б). Додавання коливань з такими близькими частотами зумовлює явище биття, при якому коливання з різницевою частотою $f_1 - f_2$ є частотою, з якою групи основного коливання слідує одна за одною. Такі биття спостерігаються на графіках реалізації та оцінки кореляційної функції.

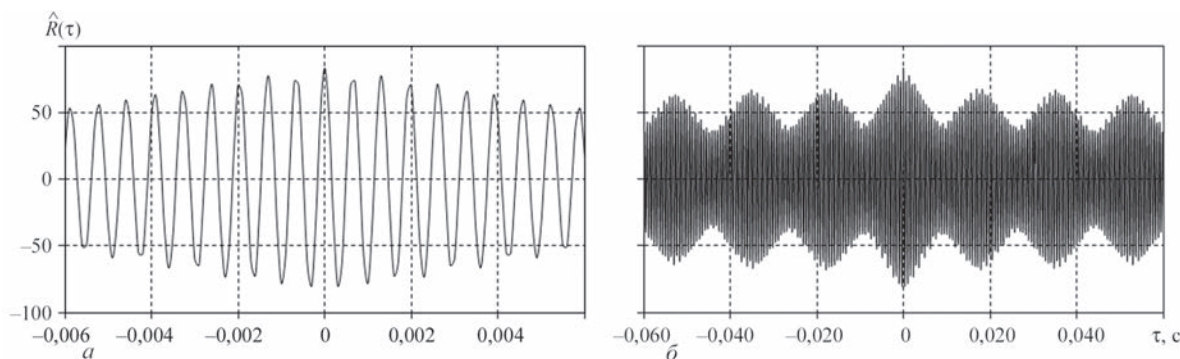


Рис. 10. Оцінка кореляційної функції високочастотного сигналу для початкових (а) та великих (б) зсувів

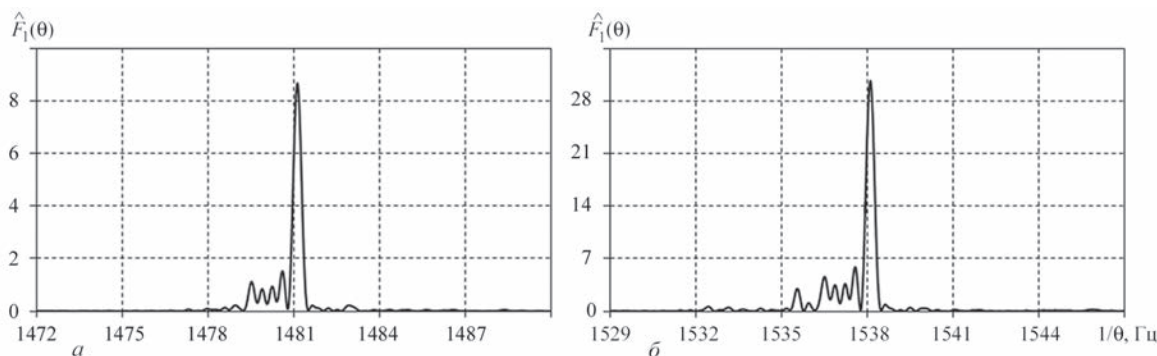


Рис. 11. Залежності функціоналу (9) від пробної частоти в різних частотних смугах (а) і (б)

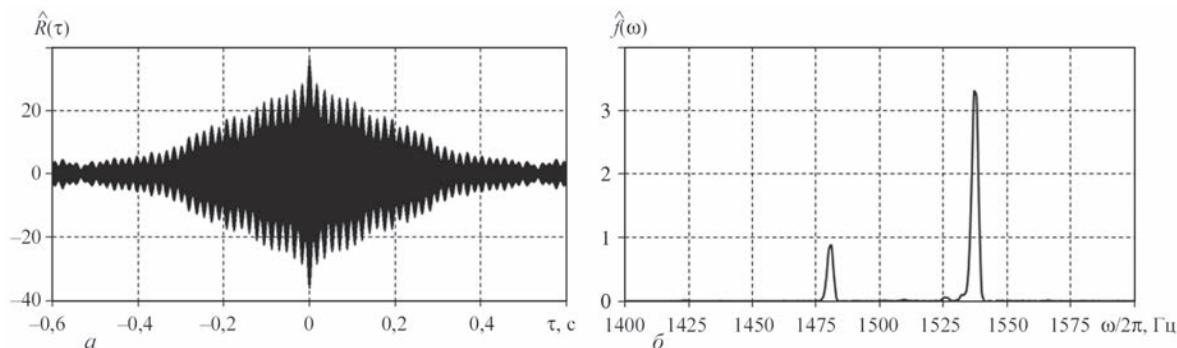


Рис. 12. Кореляційна функція (а) і спектральна густина (б) стохастичної складової високочастотного сигналу

Щоб з'ясувати, чи пов'язані ці високочастотні коливання з низькочастотними і яким саме чином, проведемо пошук прихованих періодичностей другого порядку в інтервалі, до якого належить частота обертання ротора. Для цього також використаємо метод найменших квадратів, який у даному випадку зводиться до аналізу частотної залежності функціоналу:

$$\hat{F}_2(\theta) = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=-K}^K R^2(nh, \theta), \quad (13)$$

де

$$\hat{R}(nh, \theta) = \sum_{k=1}^{L_2} \left[\hat{R}_k^c(\theta) \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh + \hat{R}_k^s(\theta) \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \right], \quad (14)$$

$$\begin{cases} \hat{R}_k^c(\theta) \\ \hat{R}_k^s(\theta) \end{cases} = \frac{2}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \xi^2(nh) \begin{cases} \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh \\ \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \end{cases}, \quad (15)$$

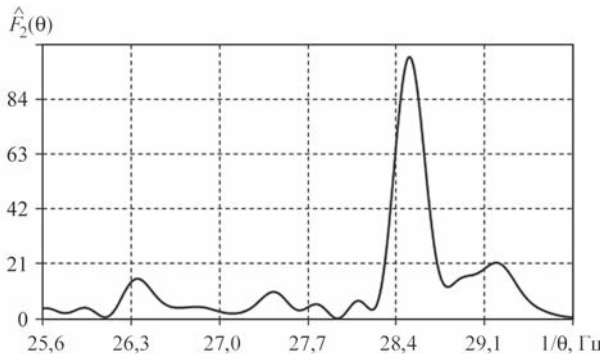


Рис. 13. Залежність квадратичного функціоналу (13) від пробної частоти

тут L_2 – вибране число складових у сумі (14). При проведенні обчислень було прийнято $L_2 = 5$. На рис. 13 представлено залежність функціоналу (13) від пробної частоти $f = 1/\theta$. Гострий пік на частоті $f_0 = 28,5$ Гц, яка є близькою до частоти обертання ротора, не залишає жодних сумнівів стосовно того, що дисперсія і кореляційна функція стохастичної складової вібрацій є періодичними функціями з періодом обертання ротора двигуна. Оскільки при аналізі не виявлено інших періодичностей, то представлення (8) у даному випадку можна вважати ПНВП з періодом $P = P_1$.

Прийнявши в (15) $\theta = \hat{P} = 1/\hat{f}_0$, обчислимо коефіцієнти Фур'є дисперсії та її середнє значення:

$$\hat{R}_0 = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \xi^2(nh).$$

На основі цих величин сформуємо вираз:

$$\hat{R}(t, \theta) = \hat{R}_0 + \sum_{k=1}^5 \left[\hat{R}_k^c(\theta) \cos k \frac{2\pi}{\hat{P}} t + \hat{R}_k^s(\theta) \sin k \frac{2\pi}{\hat{P}} t \right], \quad (16)$$

який за умови

$$h \leq \frac{\hat{P}}{2L_2 + 1}$$

є інтерполяційною формулою для дисперсії. Графік часової залежності дисперсії (16), а також її амплітудний спектр

$$\hat{V}(k\hat{f}_0) = \sqrt{[\hat{R}_k^c(\hat{P})]^2 + [\hat{R}_k^s(\hat{P})]^2}$$

показані на рис. 14. У спектрі суттєво виражені тільки нульова, перша і друга гармоніки.

Отже, виходячи з отриманих вище результатів можна припустити, що часова мінливість дисперсії є результатом модуляції гармонік низькочастотних детермінованих коливань стохастичним високочастотним смуговими коливаннями, котрі виникають внаслідок пошкодження. Кореляційна функція таких коливань може бути апроксимована повільно зникаючими осциляціями з резонансною частотою ν_0 . Результат такої модуляції в частотній області спостерігається як вузькосмугові піки на частотах $\nu_0 \pm k\hat{f}_0$ (рис. 11). Кожна високо-частотна вузькосмугова компонента є стаціонар-

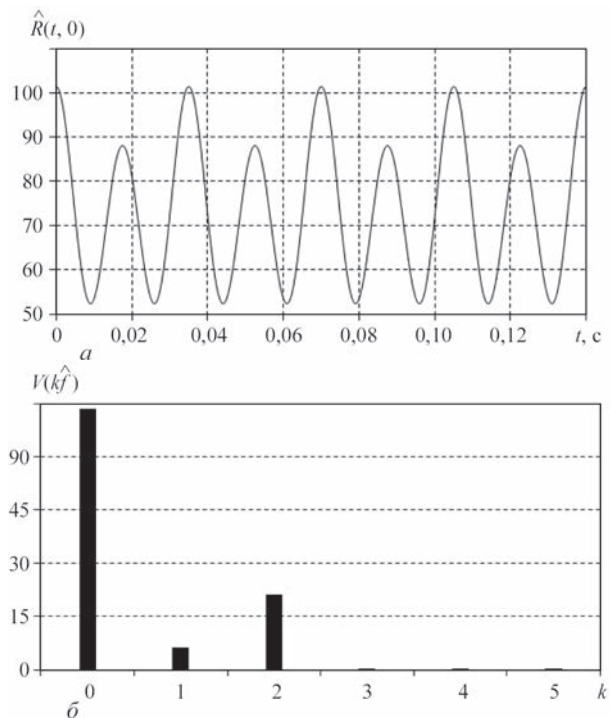


Рис. 14. Дисперсія (а) та її амплітудний спектр (б)

ним випадковим процесом, однак вони є взаємно корельованими між собою. При цьому взаємні кореляції компонент, частотна відстань між якими дорівнює $k\hat{f}_0$, визначають k -ту компоненту дисперсії. На основі таких міркувань можемо зробити висновок про те, що друга гармоніка дисперсії є результатом модуляції найпотужнішої першої гармоніки детермінованих коливань. Така модуляція спричиняє появу в частотній області пікових значень на частотах $\nu_0 - \hat{f}_0$ і $\nu_0 + \hat{f}_0$. Взаємнокореляційна функція цих двох стаціонарних вузько-смугових випадкових процесів, спектри яких рознесені на $2\hat{f}_0$, і визначають другу гармоніку дисперсії.

Виявлені модуляції в подальшому можуть бути досліджені з використанням перетворення Гільберта [18], однак вже встановлені вище факти про структуру сигналу дають змогу зробити висновок про характер пошкодження. Підвищений рівень вібрацій не пов'язаний з імовірними дефектами одного з елементів підшипника, а пояснюється зношенням посадочної поверхні корпусу підшипника внаслідок тривалої експлуатації механізму. «Розбитий» отвір в корпусі спричиняє проковзування зовнішнього кільця підшипника, яке в свою чергу збуджує потужні високочастотні коливання.

Висновки

З використанням розробленої у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України системи «КОМПАКТ-ВІБРО» проведено відбір і аналіз сигналів вібрації механізмів контейнерного перевантажувача.

На основі методів виявлення прихованих періодичностей, що ґрунтуються на моделях у вигляді ПНВП та їх узагальнень, проведено розділення детермінованої та стохастичної складових сигналів з підвищеним рівнем СКЗ та встановлено характерні особливості кожної з них. Визначено амплітудний спектр детермінованих складових вібрацій та виявлена детермінована і стохастична високочастотна модуляція їх гармонік. Показано, що така модуляція спричиняє періодичну нестационарність другого порядку з періодом обертання вала двигуна. Визначено амплітудний спектр часових змін дисперсії сигналу та показано його зв'язок з взаємкореляціями вузькосмугових високочастотних складових сигналу. Причиною підвищеного рівня вібрації, виходячи з вузької смуги спектру дисперсії і невисоких значень його перших гармонік, є розвиток пошкодження на початковому етапі втулки підшипника.

Обчислені величини СКЗ для Крану 1 і Крану 2 знаходяться в межах норми.

Список літератури/References

1. Яворський І.М. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів, ФМІ НАНУ.
2. Javorskyj, I., Mykhailishyn, V. (1996) Probabilistic models and statistical analysis of stochastic oscillations. *Pattern Recogn. Image. Anal.*, 6(4), 749–763.
3. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Kravets, I., Matsko, I. (2014) Methods of periodically correlated random processes and their generalizations. *Cyclostationarity: Theory and Methods. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. F. Chaari, J. Leskow, A. Sanches-Ramires. New York, Springer Int. Publish. Switzerland, 73–93.
4. Javorskyj, I., Dzeryn, O., Yuzefovych, R. (2019) Analysis of mean function discrete LSM-estimator for biperiodically nonstationary random signals. *Math. Model. Comput.*, 6(1), 44–57.
5. McCormick, A.C., Nandi, A.K. (1998) Cyclostationarity in rotating machine vibrations. *Mech. Syst. Signal Process.*, 12(2), 225–242.
6. Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary processes: Application in gear fault early diagnostics. *Ibid.*, 14(3), 371–385.
7. Antoni, J., Bonnardot, F., Raad, A., El Badaoui, M. (2004) Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. *Ibid.*, 18, 1285–1314.
8. Antoni, J. (2009) Cyclostationarity by examples. *Ibid.*, 23, 987–1036.
9. Randall, R.B., Antoni, J. (2011) Rolling element bearing diagnostics – A tutorial. *Ibid.*, 25(2), 485–520.
10. Zimroz, R., Bartelmus, W. (2009) Gearbox condition estimation using cyclostationary properties of vibration signal. *Key Engineering Mater.*, 413(1), 471–478.
11. Hurd, H.L., Mamee, A. (2007) *Periodically Correlated Random Sequences: Spectral Theory and Practice*. New York, Wiley.
12. Javorskyj, I., Kravets, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. (2017) Periodically correlated random processes: Application in early diagnostics of mechanical systems. *Mech. Syst. Signal Process.*, 83, 406–438.
13. Javorskyj, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. et al. (2021) Methods of Hidden Periodicity Discovering for Gearbox Fault Detection. *Sensors.*, 21, 6138.
14. Javorskyj, I., Leśkow, J., Kravets, I. et al. (2011) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes – Part II: Harmonic series representation. *Signal Process.*, 91, 2506–2519.
15. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Мацько І.Й. та ін. (2020) Пристрої для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх зародження при визначенні технічного стану механізмів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 8–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.04.02>.
16. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Личак О.В. та ін. (2021) Методи та засоби ранньої вібродіагностики підшипникових вузлів обертових механізмів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 30–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.04>.
17. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Lychak, O. et al. (2021) Methods and means of early vibrodiagnostics of bearing units of rotary mechanisms. *Tekh. Diahnos. and Neruiniv. Kontrol*, 2, 30–37. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.04>.
18. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Kurapov, P. (2021) Hilbert transform of a periodically non-stationary random signal: Low-frequency modulation. *Ibid.*, 116, 103113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103113>.

METHODS AND MEANS OF EARLY VIBRATION DIAGNOSTICS OF ROTATING COMPONENTS OF MECHANISMS OF QUAY CONTAINER HANDLERS

I.M. Javorskyj^{1,2}, R.M. Yuzefovych^{1,3}, O.V. Lychak¹, P.O. Semenov⁴

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

² Politechnika Bydgoska. 7 Prof. Sylwestra Kaliskiego, 85-796 Bydgoszcz, Poland

³Lviv Polytechnic National University. 12 S. Bandery str., 79013, Lviv, Ukraine

⁴Odesa National Maritime University. 34 I. Mechnikova Str., 65029, Odesa, Ukraine

The paper describes the properties of a model of vibration of interconnected rotating mechanisms in the form of biperiodically nonstationary random processes (BPNRP). Individual cases of such a model are considered, which enable performing data analysis by the methods of periodically nonstationary random processes (PNRP). These methods are used to analyze the condition of mechanisms at increased vibration level. Separation of deterministic and stochastic vibrations was performed and parameters describing the structure of hidden periodicities of the first and second order, were determined. The causes for increased vibration level were established. 18 Ref., 3 Tabl, 14 Fig.

Keywords: hoisting mechanism, vibration, periodical nonstationarity, deterministic oscillations, amplitude spectrum, stochastic high-frequency modulation, dispersion

Надійшла до редакції 07.12.2021

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ГОЛОВНИХ ПРОГОНОВИХ БАЛОК МОСТУ ім. Є.О. ПАТОНА ЧЕРЕЗ р. ДНІПРО У м. КИЄВІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

О.О. Махненко, О.В. Махненко

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

У статті розглянуто особливості конструкції і параметри навантаженості головних поздовжніх балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро. Вказано, що за результатами обстежень зварні з'єднання знаходяться в задовільному стані, недопустимих дефектів та тріщин втомі в них не виявлено, але в результаті протікання води в конструкції балок утворилися досить значні локальні корозійні пошкодження. На основі побудованої скінченно-елементної моделі головної прогонової балки проведено розрахункову оцінку її навантаженості та зміни несучої здатності при наявності локальних корозійних дефектів в зоні з'єднання стінки та нижньої полиці. Результати чисельного моделювання показали, що наявність цих дефектів не викликає суттєвого підвищення напружень в прогоновій балці. Аналіз несучої здатності показав, що хоча зварна конструкція головних прогонових балок мосту має досить значний коефіцієнт запасу статичної міцності від дії нормативного розподіленого навантаження, наявність локальних корозійних дефектів несучильності матеріалу достатньо великого розміру суттєво знижує опір втомі зварних з'єднань з виявленими дефектами, що є небезпечним з точки зору надійності прогонової споруди і тому потребує негайного проведення ремонтних робіт. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 11.

Ключові слова: мостова зварна конструкція, головна прогонова балка, несуча здатність, корозійний дефект, нормативне навантаження, напружений стан, чисельні методи

Київський міський міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро, побудований і прийнятий в експлуатацію в 1953 р., є унікальною інженерною спорудою [1]. Під час його будівництва були використані передові на той час зварювальні технології, зокрема технології механізованого зварювання під шаром флюсу. Міст складається з 24-х прогонових споруд довжиною у заправній частині 58 м, а у судноплавній – 87 м, та має загальну довжину 1543 м. У поперечному перерізі кожна споруда мосту має чотири головні поздовжні двотаврові балки. Балка складається з вертикальної стінки, висотою 3600 мм і товщиною 14 мм і поясів різної товщини від 30 до 80 мм при ширині до 1000 мм (рис. 1, а). Стійкість стінки балки додатково забезпечується поздовжніми та вертикальними ребрами. У 6-ти-прогонових спорудах у судноплавній частині мосту висота стінки над проміжними опорами збільшена до 6200 мм за рахунок пристрою вутів (рис. 1, б). Балки виконані з вуглецевої сталі М16С, що за своїм характеристиками відповідає сталі ВСтЗсп.

При проведенні в 2020 р. обстеження головних поздовжніх балок мосту було визначено [2], що зварні з'єднання головних балок знаходяться в задовільному стані, в процесі тривалої експлуатації недопустимі дефекти та тріщини втомі в них не утворилися. Але в результаті протікання води від дощів та танення снігу в конструкції балок утво-

рилися досить значні локальні корозійні пошкодження, особливо в нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах та в нижній частині стінок, що обумовлено також накопиченням в цих місцях сміття, яке затримує вологу. В деяких фермах головних балок виявлені корозійні наскрізні ушкодження (рис. 2).

З метою проведення розрахункової оцінки навантаженості, а також зміни несучої здатності прогонової балки мосту при наявності локальних корозійних дефектів побудовані геометрична та скінченно-елементна моделі головної 6-ти-прогонової балки згідно з конструкторською документацією. Модель довжиною 43,5 м складається з одного прогону, від середини вута до середини прогонної частини, з умовою симетрії на обох кінцях (рис. 3). На опорній площі вута призначені граничні умови за переміщеннями, вертикальна компонента яких дорівнює нулю, що відповідає умовам спирання прогонової балки на опорах мосту.

Несучі конструкції мостів розраховуються на дію постійних навантажень і несприятливих комбінацій тимчасових навантажень, зазначених у розділі 2 ДБН В.1.2-15 [3]. Розрахунки виконуються за граничними станами відповідно до вимог 4.3 ДБН В.2.3-22:2009 [4]. Згідно з пунктом 8.3.1 [4] навантаження від автотранспортних засобів на кожну смугу приймається у вигляді рівномірно розподіле-

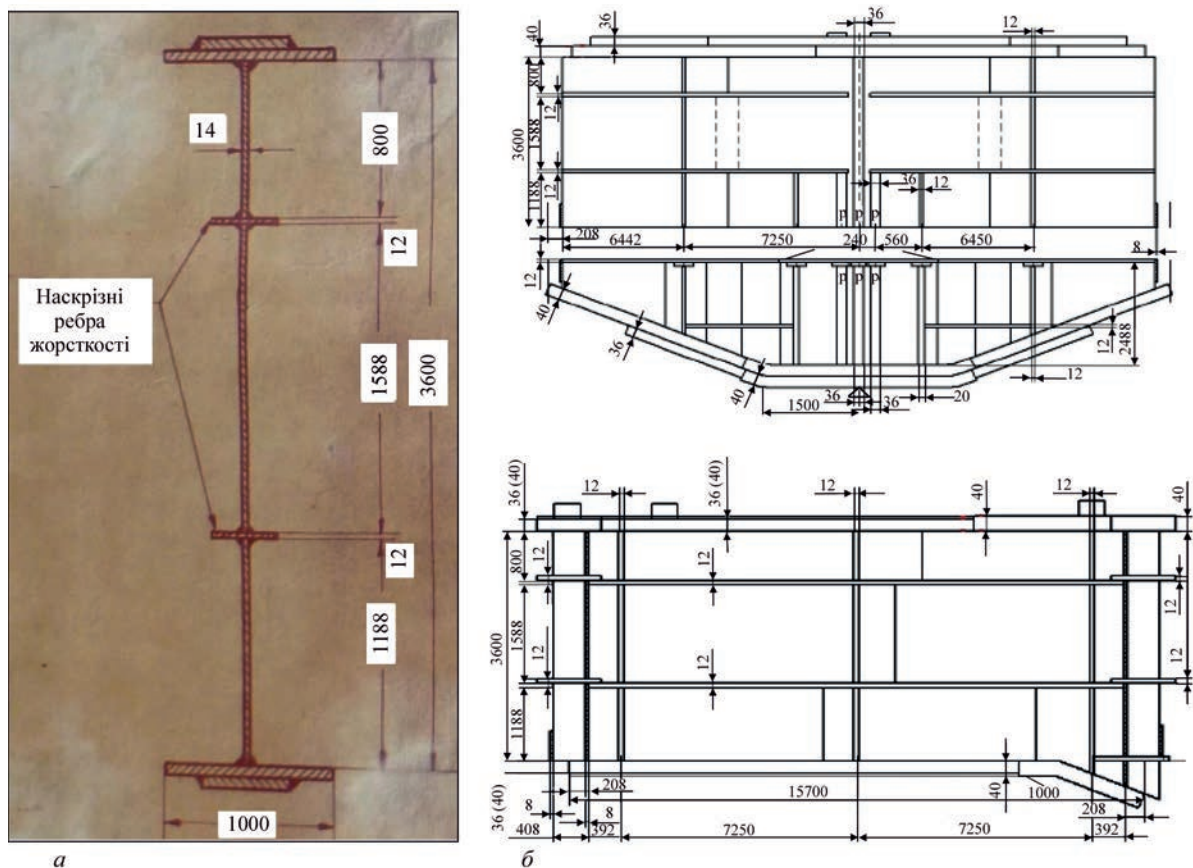


Рис.1 Поперечний переріз головної поздовжньої балки двотаврового перетину (*a*) і креслення фрагментів головної поздовжньої двотаврової балки (*б*)

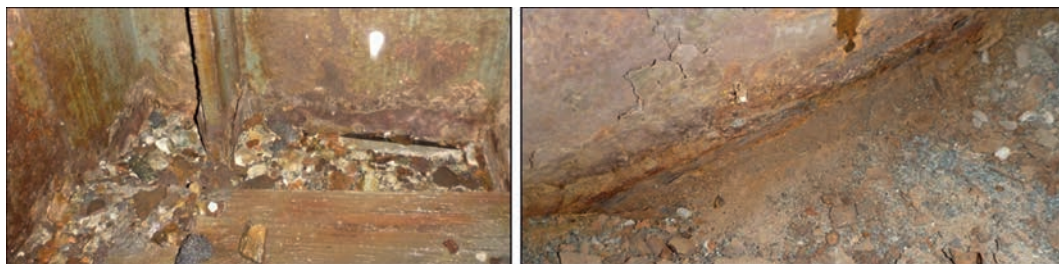


Рис. 2. Виразкова корозія нижньої полиці та стінки у прогоновій споруді

ного навантаження з інтенсивністю $v = 0,98 \cdot K \text{ кН/м}$ ($0,1 \cdot K \text{ тс/м}$), де K – клас навантаження, що приймається згідно з 8.3.2 [3]. На автомобільних дорогах I, II і III категорій, на міських автомагістралях і магістральних вулицях загальноміського значення, а також на мостах завдовжки понад 200 м на дорогах IV і V категорій $K = 15$. Міст ім. Є.О. Патона має 6 смуг для проїзду автотранспортних засобів, тому інтенсивність рівномірно розподіленого наванта-

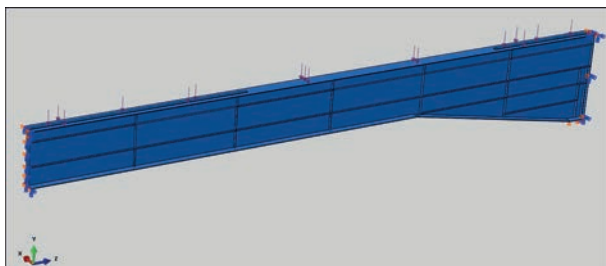


Рис. 3. Тривимірна модель головної 6-и-прогонової балки

ження на міст складає $v = 0,98 \cdot 15 \cdot 6 = 88,2$ кН/м. З урахуванням того, що у поперечному перерізі мосту мають місце чотири головні поздовжні балки, в розробленій моделі 6-и-прогонової балки до верхнього поясу шириною 1 м прикладено розподілене навантаження величиною $P = 88,2 \text{ кН/м} / (4 \cdot 1 \text{ м}) = 22,05 \text{ кН/м}^2 = 0,022 \text{ МПа}$. Також в моделі враховується сила ваги конструкції прогонової балки як постійне навантаження.

Для визначення впливу типових корозійних пошкоджень балки в зоні зварного з'єднання нижнього поясу та стінки в скінченно-елементну модель були введені наскрізні несучільності металу довжиною 500 мм в різних місцях по довжині нижнього поясу (рис. 4) і стінки (рис. 5).

Результати чисельного визначення НДС 6-ти-прогонової балки показали, що в результаті дії розподіленої сили (0,022 МПа), прикладеної до

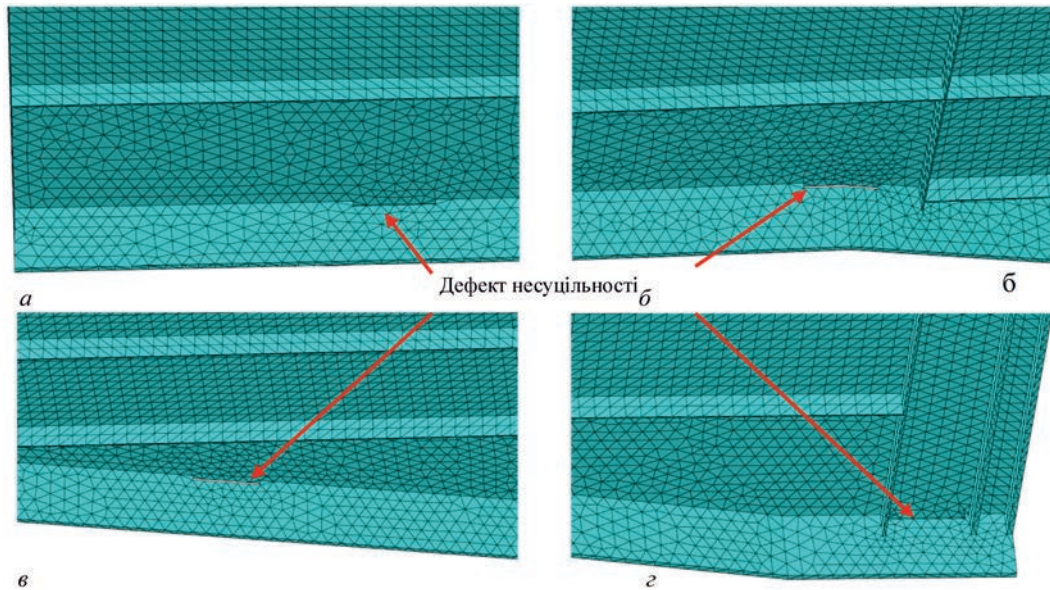


Рис. 4. Дефекти несущієності в полиці (локальний корозійний дефект довжиною 500 мм та глибиною 40 мм) в зоні з'єднання стінки з нижньою полицею головної 6-и-прогонової балки: в центральній частині прогону (а); в місці переходу балки постійної висоти у вут (наскрізь) (б); у похилій частині вута (наскрізь) (в); в центральній частині вута (г)

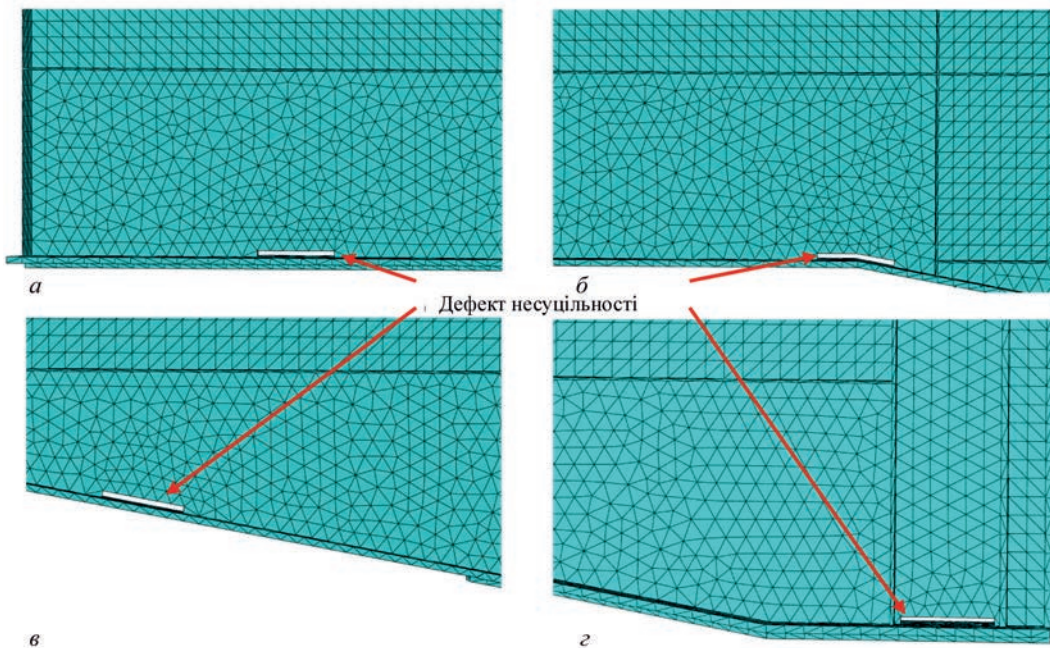


Рис. 5. Дефекти несущієності в стінці наскрізь (локальний корозійний дефект довжиною 500 мм та глибиною 14 мм) в зоні з'єднання стінки з нижньою полкою головної 6-и-прогонової балки: в центральній частині прогону (а); в місці переходу балки постійної висоти у вут (б); у похилій частині вута (в); в центральній частині вута (г)

верхньої полиці, превалюючою є повздовжня компонента напружень. Максимум повздовжніх напружень, розташований у верхньому поясі над вутом, не перевищує 65 МПа, а в зоні нижньої полиці в центральній частині прогону досягає 47 МПа (рис. 6). Наявність локального корозійного дефекту в цій зоні не викликає суттєвого підвищення повздовжніх напружень (максимум до 50 МПа) (рис. 7).

Аналогічні результати впливу корозійних дефектів представлені і для інших характерних зон по довжині 6-и-прогонової балки, а саме в місці розташування вута і спирання балки, де в зоні

нижнього поясу повздовжні напруження розтягу переходять у напруження стиску (рис. 8–10). В зоні переходу балки постійної висоти у вут (рис. 8) рівень максимальних повздовжніх напружень в бездефектній балці в зоні нижнього поясу не перевищує 50 МПа, наявність розглянутих дефектів несущієності викликає підвищення стискаючих напружень в стінці до 65 МПа (рис. 8, а), а в полиці зоні переходу балки постійної висоти у вут повздовжні стискаючі напруження знижуються і стають розтягуючими на рівні 20...37 МПа (рис. 8, б).

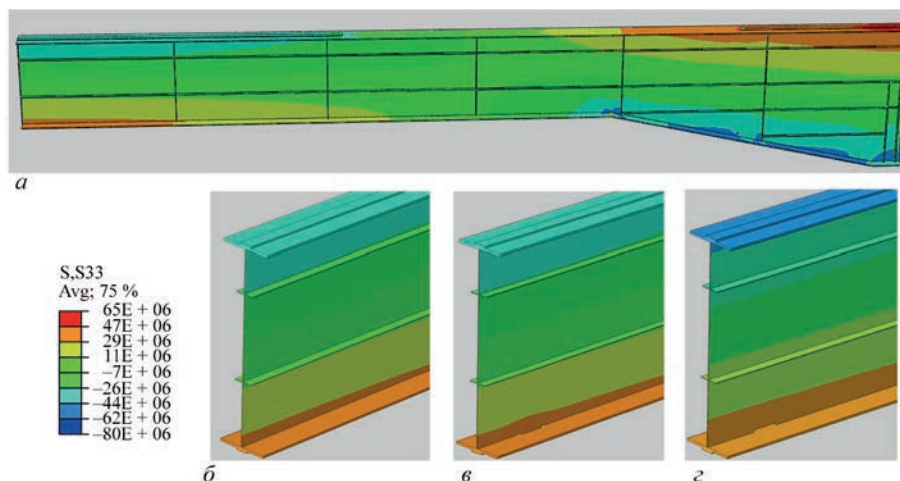


Рис. 6. Розподіл повздовжніх напружень по прогону від розподіленої сили ($P = 0,022$ МПа), прикладеної до верхньої полиці: по всій балці (а); в центральній частині без дефекту (до 34 МПа) (б); з дефектом в полиці (до 37 МПа) (в); з дефектом в стінці (до 35 МПа) (г)

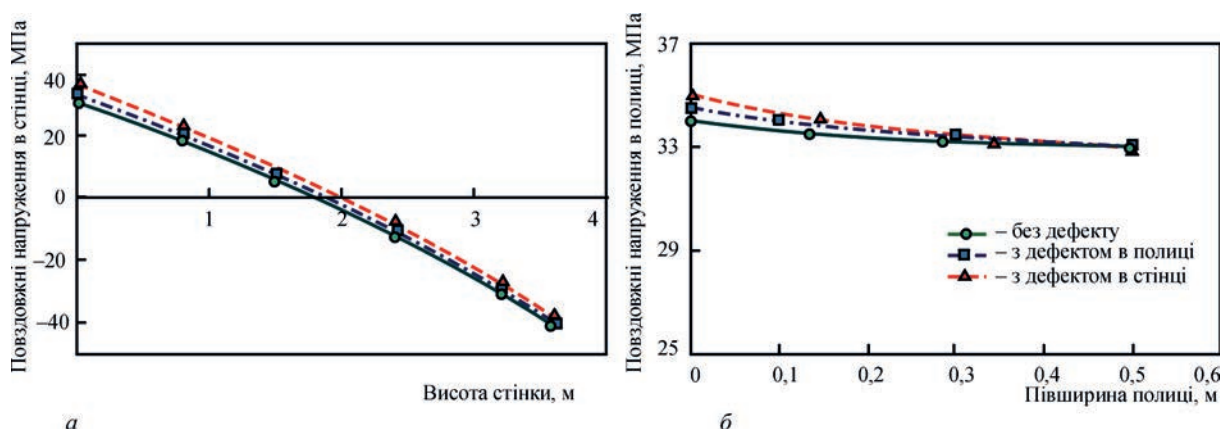


Рис. 7. Розподіл повздовжніх напружень в центральній частині прогону від розподіленої сили ($P = 0,022$ МПа), прикладеної до верхньої полиці, у бездефектній балці та балці з локальним наскрізним корозійним дефектом довжиною 500 мм в нижній полиці і стінці: по висоті стінки балки (а); по ширині нижньої полиці (б)

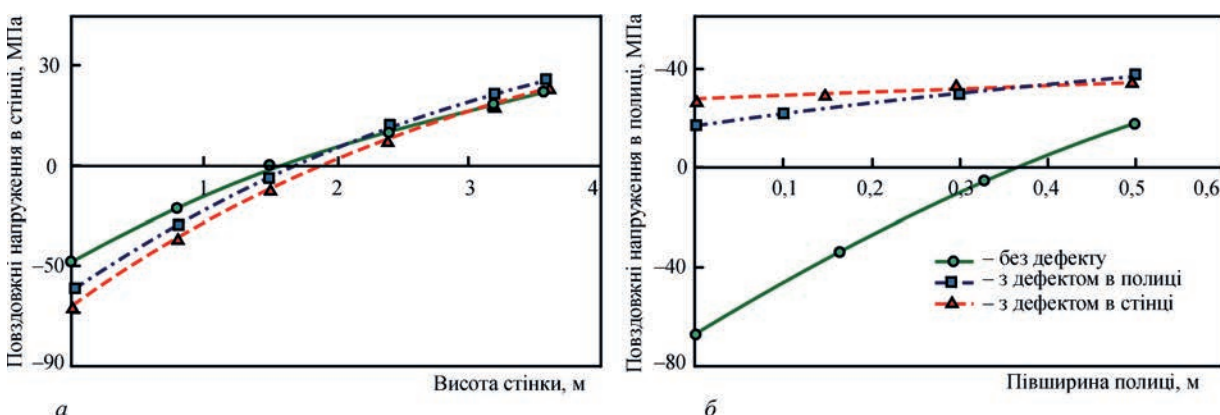


Рис. 8. Розподіл повздовжніх напружень в зоні переходу балки постійної висоти у вут від розподіленої сили ($P = 0,022$ МПа), прикладеної до верхньої полиці, у бездефектній балці та балці з локальним наскрізним корозійним дефектом довжиною 500 мм в нижній полиці і стінці: по висоті стінки балки (а); по ширині нижньої полиці (б)

Вертикальна компонента напружень значно нижче за рівнем, чим повздовжня компонента, і не перевищує в більшій частині 5 МПа, а локально в зоні переходу у вут та в зоні спирання вертикальні стискаючі напруження досягають 20 МПа.

У похилій частині вута (рис. 9) і в центральній частині вута (рис. 10) в бездефектній балці в зоні нижнього поясу повздовжні стискаючі напружен-

ня не перевищують 50 МПа. Наявність розглянутих дефектів несучільності може викликати незначне підвищення напружень в стінці і полиці до 55 МПа.

Таким чином, зварна конструкція головних прогонових балок мосту ім. Є.О. Патона має досить значний коефіцієнт запасу статичної міцності (не нижче 3) у випадку дії нормативного розподіленого навантаження, прикладеного до верхньої

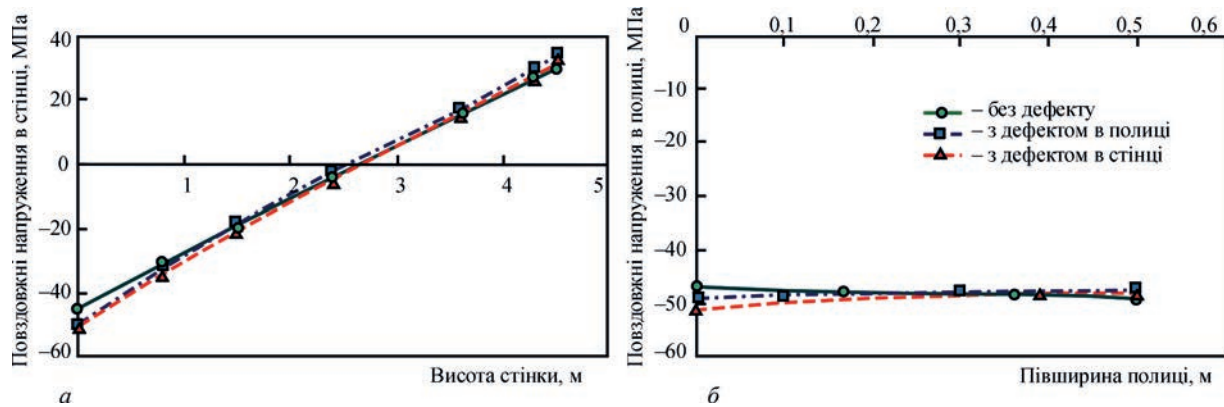


Рис. 9. Розподіл повздовжніх напружень у похилій частині вута від розподіленої сили ($P = 0,022$ МПа), прикладеної до верхньої полиці, у бездефектній балці та балці з локальним наскрізним корозійним дефектом довжиною 500 мм в нижній полиці і стінці: по висоті стінки балки (а); по ширині нижньої полиці (б)

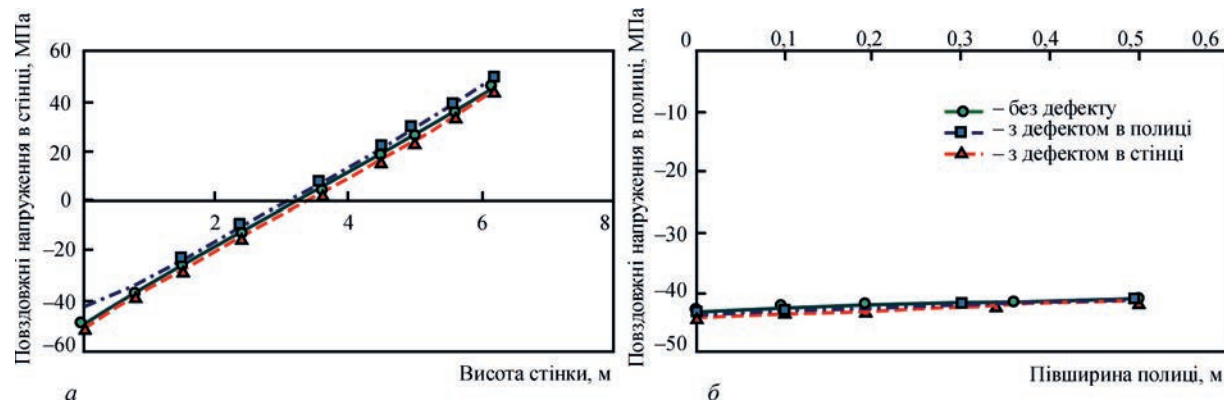


Рис. 10. Розподіли повздовжніх напружень у центральній частині вута від розподіленої сили ($P = 0,022$ МПа), прикладеної до верхньої полиці, у бездефектній балці та балці з локальним корозійним дефектом довжиною 500 мм в нижній полиці і стінці: по висоті стінки балки (а); по ширині нижньої полиці (б)

полиці двотаврової балки. Наявність локальних корозійних дефектів несучільності матеріалу достатньо великого розміру в зоні з’єднання стінки і нижньої полки (довжиною 500 мм та наскрізні) викликає незначну зміну напруженого стану.

Міцність мостових конструкцій треба розглядати під дією циклічних навантажень в процесі тривалої експлуатації. Згідно з рекомендаціями Міжнародного інституту зварювання стосовно оцінки опору втомі зварних конструкцій [5], повздовжнє суцільне зварне з’єднання нижнього поясу балки до стінки з К-образною розділкою, виконане автоматичним зварюванням без зупинок, з проведенням неруйнівного контролю може бути віднесено до класу $FAT = 125$ МПа (№ 321 у таблиці), де FAT – мінімальний розмах номінальних напружень. Тобто для забезпечення опору втомі проти утворення макротріщини на базі $2 \cdot 10^6$ циклів максимально допустимий розмах повздовжніх напружень в полиці не повинен перевищувати 125 МПа. У випадку утворення в зварному з’єднанні полиці та стінки наскрізних корозійних дефектів таке зварне з’єднання можливо розглядати як переривчасте (№ 324 у таблиці), для якого допустимий розмах повздовжніх напружень

Таблиця Класифікація типових елементів зварних з’єднань на основі граничного розмаху нормальних напружень [5]

№	Ескіз деталі	Опис	FAT, МПа	
			Сталь	Алюміній
321		Повздовжні суцільні шви з К-подібним обробленням, автоматичне зварювання. Без зупинок, NDT (напруження в полиці)	125	50
324		Повздовжні переривчасті кутові шви (нормальні напруження в полиці та зрізуючі напруження в шві у кінцях з’єднання)		
		$\tau/\sigma = 0$	80	32
		0...0,2	71	28
		0,2...0,3	63	25
		0,3...0,4	56	22
		0,4...0,5	50	20
		0,5...0,6	45	18
		0,6...0,7	40	16
		$> 0,7$	36	14

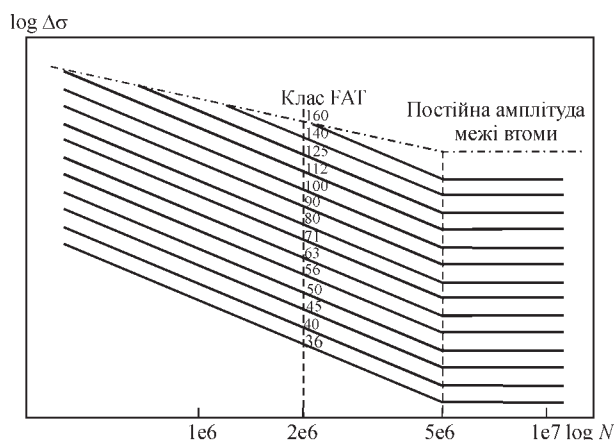


Рис. 11. Криві σ - N опору втоми для різних класів зварних з'єднань (сталь) для нормальних напружень [5]

знижується до 80 МПа і нижче при наявності перерізуючих напружень.

Враховуючи досить тривалі строки експлуатації мостових конструкцій доцільним є забезпечення умови, щоби діючі розмахи напружень в зварних з'єднаннях були нижче межі витривалості σ_{-1} , тоді конструкція може експлуатуватись необмежено довго. Згідно з кривими σ - N (рис. 11) опору втоми для різних класів зварних з'єднань для нормальних напружень [5] межа витривалості σ_{-1} для розглянутих зварних з'єднань складає:

- без дефектів (№321, FAT = 125 МПа) $\sigma_{-1} = 92$ МПа;
- при наявності дефектів (№324, FAT $\leq$ 80 МПа) $\sigma_{-1} \leq 57$ МПа.

Таким чином, в бездефектній балці максимальні розмахи діючих повздовжніх напружень (до 50...65 МПа) значно нижчі за межі витривалості зварного з'єднання полиці та стінки. При наявності корозійних дефектів межа витривалості зварного з'єднання полиці та стінки прогонової балки стає вже на рівні або навіть нижче діючих розмахів повздовжніх напружень від нормативного навантаження.

Висновки

CALCULATED ESTIMATION OF LOAD-CARRYING CAPACITY OF THE MAIN SPAN BEAMS OF THE E.O.PATON BRIDGE ACROSS THE DNIPRO IN KYIV BY NONDESTRUCTIVE TESTING RESULTS

O.O. Makhnenko, O.V. Makhnenko

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

The paper deals with of the features of the design and loading parameters of the main longitudinal beams of the E.O. Paton Bridge across the Dnipro. It is shown that by the results of examinations, the welded joints are in a satisfactory condition, no inadmissible defects or fatigue cracks were detected in them, but rather considerable local corrosion damage appeared as a result of water flowing through the beam structures. The constructed finite element model of the main span beam was used to perform a calculated estimate of its loading and of the change of load-carrying capacity in the presence of local corrosion defects in the zone of the web and lower flange joint. Results of numerical modeling showed that the presence of these defects does not cause any significant increase of stresses in the span beam. Analysis of load-carrying capacity showed that although the welded structure of the main span beams of the bridge has a rather high static strength margin under the action of normative distributed loading, presence of local corrosion defects of material discontinuity of rather large size considerably lowers the fatigue resistance of welded joints with detected defects that is dangerous in terms of span structure reliability and, therefore, requires immediate performance of repair operations. 5 Ref., 12 Fig.

Keywords: bridge welded structure, main span beam, load-carrying capacity, corrosion defect, normative load, stressed state, numerical methods

Хоча зварна конструкція головних прогонових балок мосту ім. Є.О. Патона має досить значний коефіцієнт запасу статичної міцності від дії нормативного розподіленого навантаження, прикладеного до верхньої полиці двотаврової балки, але наявність локальних корозійних дефектів несущільності матеріалу достатньо великого розміру в зоні з'єднання стінки та нижньої полиці суттєво знижує опір втоми зварних з'єднань з виявленими дефектами, що є небезпечним з точки зору надійності прогонової споруди і тому потребує негайного проведення ремонтних робіт.

Список літератури

1. Лобанов Л.М., Кир'ян В.И. (2013) Шестидесять лет цельносварному мосту им. Е.О. Патона. *Автоматическая сварка*, 12, 33–40.
2. Позняков В.Д., Дядін В.П., Давидов Э.О., Дмитрієнко Р.І. (2021) Оцінка пошкодженості суцільнозварних повздовжніх головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро. *Автоматичне зварювання*, 7, 33–41. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.07.06>
3. (2009) ДБН В.2.3-22:201X. *Мости та труби. Основні вимоги проектування*. Київ, Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України.
4. (2009) ДБН В.1.2-15:2009 *Мости та труби. Навантаження і впливи*. Київ, Мінрегіонбуд України.
5. (1996) *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. IIW Doc. XIII-1539-96/XV-845-96.

References

1. Lobanov, L.M., Kyrian, V.I. (2013) The E.O.Paton all-welded bridge is sixty years old. *The Paton Welding J.*, 12, 33–38.
2. Poznyakov, V.D., Dyadin, V.P., Davydov, Ye.O., Dmytrienko, R.I. (2021) Evaluation of damage of all-welded longitudinal main beams of the E.O. Paton bridge across the Dnipro river. *Ibid.*, 7, 33–41.
3. (2009) DBN V. 2.3-22:201Kh: *Bridges and pipes. Basic design requirements*. Kyiv, Ministry of Regional Development of Construction, Housing and Communal Services of Ukraine [in Ukrainian].
4. (2009) DBN V.1.2-15:2009: *Bridges and pipes. Loading and effects*. Kyiv, Minregionbud Ukrainy [in Ukrainian].
5. (1996) *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. IIW Doc. XIII-1539-96/XV-845-96.

Надійшла до редакції 11.10.2021

LASER-INDUCED THERMOELASTIC WAVE TECHNIQUE TO EVALUATE HYGROTHERMAL AGING IN CFRP COMPOSITES

МЕТОД ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНИХ ТЕРМОПРУЖНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ГІГРОТЕРМІЧНОГО СТАРІННЯ КОМПОЗИТІВ ІЗ ВУГЛЕПЛАСТИКУ

by Nilesh C. Bagale* and M.R. Bhat†

* Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Science, Bengaluru, 560 012, India

† Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Science, Bengaluru, 560 012, India; mrb@iisc.ac.in

The interaction of heat and moisture with fiberreinforced polymer composites over a long duration is known to cause physical and mechanical degradation. In this paper, an attempt was made to evaluate physical and mechanical changes in carbon fiber–reinforced polymer (CFRP) by an unconventional nondestructive approach before and after varied duration of exposures to hygrothermal (HT) treatment at an elevated temperature (80 °C/353 K) up to 800 h. As a novel approach, laser-induced thermoelastic waves were utilized for characterization of the material. Wave characteristics, such as wave amplitude and velocity of propagation, were studied over different duration exposures of HT treatment to detect and quantify HT-induced property changes in the material. Results show that the aging effect attenuated the wave to a factor of 2.75 and significantly reduced the velocity of wave propagation by 20% compared to that of the pristine material, revealing the degradation in the material caused by HT exposure. The proposed methodology has the potential to monitor the health of fiber-reinforced polymer composite structures that have undergone hygrothermal aging.

Відомо, що взаємодія тепла та вологи з полімерними композитами, армованими волокном протягом тривалого часу, викликає фізичну та механічну деградацію. У цій статті було зроблено спробу оцінити фізичні та механічні зміни в полімері, армованому вуглецевим волокном (CFRP), за допомогою нетрадиційного неруйнівного підходу до та після різної тривалості впливу гігротермічної (ГТ) обробки при підвищеній температурі (80 °C / 353 K) до 800 год. В якості нового підходу термопружні хвилі, індуковані лазером, були використані для визначення характеристик матеріалу. Характеристики хвиль, такі, як амплітуда та швидкість поширення хвилі, були вивчені протягом різних тривалостей впливу гігротермічної (ГТ) обробки для визначення та кількісної оцінки змін властивостей матеріалу, викликаних ГТ. Результати показують, що ефект старіння послабив хвилю в 2,75 рази і значно знизив швидкість поширення хвилі на 20 % порівняно з вихідним матеріалом, виявивши деградацію матеріалу, спричинену впливом ГТ обробки. Запропонована методологія має потенціал для моніторингу стану армованих волокном полімерних композитних конструкцій, що зазнали гігротермічного старіння.

KEYWORDS: *hygrothermal aging, thermoelastic waves, carbon polymer composite, CFRP*

Ключові слова: *гігротермічне старіння, термопружні хвилі, вуглецево-полімерний композит, вуглепластик*

Introduction

Advanced composites are increasingly being used for structural applications of aerospace components. Carbon fiber–reinforced polymer (CFRP), an ultra-lightweight structural material, is widely used in the aircraft industry for its excellent engineering properties, mechanical durability, low density, and temperature and chemical resistivity. During flight, aircraft undergo rigorous fluctuations in temperature and moisture exposure, which lead to a gradual degradation of the components over a long period. This gradual degradation is known as hygrothermal (HT) aging. It induces gradual and permanent changes in composites. It can lead to water-polymer interaction, which results in swelling, subsequently altering the molecular structure along with the plasticization of polymer resin (Nogueira et al. 2001; Moy et al. 1980; Zhou and Lucas 1999; Xiao et al. 1997; Xiao and Shanahan 1998). This, in turn, deteriorates the material in terms of its engi-

neering properties. The literature also shows that the glass-transition temperature of the material is altered by HT aging, limiting the working temperature of the material. Researchers have observed that the water absorption behavior of carbon-epoxy composite follows a Fickian law, and the rate to saturation increases with the relative humidity and temperature (Korkees et al. 2018). Consequently, a drop in mechanical properties occurs due to HT aging (Cysne Barbosa et al. 2017; Sun et al. 2011).

In the aviation industries, a periodic maintenance check of aircraft structural components is performed after a certain number of flying hours. This consumes enormous amounts of time, money, and effort. Nondestructive testing (NDT) techniques in this regard can be an effective tool to detect and track the health of aged structural components. In this regard, the acoustic wave propagation parameters of the material are capable of real-time health monitoring over the whole

structure. Wave propagation characteristics are strongly related to the elastic and microstructural properties of a material (Choi et al. 2018; Angulo et al. 2017; Gagar et al. 2014). Thus, slight variations in material properties caused by the aging process lead to an alteration in the wave propagation characteristics (Katunin et al. 2015; Park et al. 2014; Mouritz et al. 2000; Park et al. 2008). It was shown that the ultrasound technique shows effectiveness in evaluating aging in composite material (El Guerjouma et al. 2001). Hong and others showed the effectiveness of ultrasound wave propagation to evaluate HT aging (Hong et al. 1995). Also, the literature shows the potential ability of guided waves for successful detection and evaluation of defects/damage and progressive damages in composite structures. The symbolic time series analysis has shown a great potential in detecting barely visible indentation damages (Mustapha et al. 2016; Fakih et al. 2017).

Unconventional Thermoelastic Wave Generation in Polymer Composites. In this study, a novel approach was adopted for the generation of acoustic waves in CFRP material. Acoustic waves can be generated in composite material using a focused high-power laser beam of constant energy, which induces thermoelastic waves, which propagate in the material. The thermoelastic phenomenon is the result of the absorption of laser energy into the surface layer of the material, which results in a localized temperature increase. By setting suitable pulse energy parameters, the surface layer can be excited. This excitation of the layer results in the generation of acoustic waves. These waves are basically stress waves that are born due to the coupling between temperature and strain rate in a material. Due to the material's thermal conductivity, this heat travels through the media, generating heat waves. These heat waves create compression and rarefaction, which result in thermoelastic waves (Wang and Xu 2001; Lyamshev 1981).

Experimental Details

Fabrication of CFRP. A CFRP laminate was fabricated using bidirectional carbon fabric as the reinforcement and thermoset epoxy resin Araldite

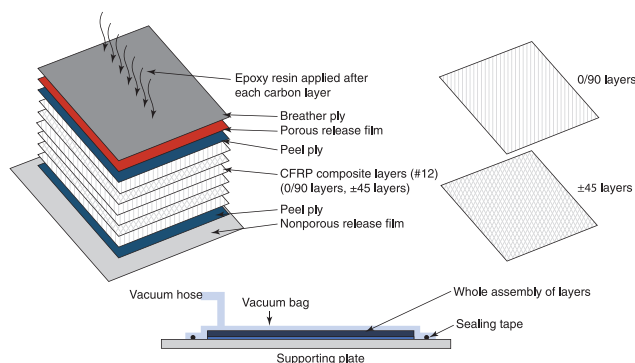


Figure 1. A schematic of composite laminate fabrication using the vacuum bagging technique.

Рис. 1. Схема виготовлення композитного ламінату з використанням методу вакуумного пакування

LY5052 as the matrix with a lay-up sequence of $[(0/90)_2(45)_2(0/90)_2]_s$. The schematic for laminate fabrication is shown in Figure 1. The laminate was cured at room temperature using the vacuum bagging fabrication process.

A plate thickness of 2.718 mm with a standard deviation of 0.042 mm was obtained. The laminate was cut to a size of 280×280 mm to fit in the hot water bath tank. The sensor positions were marked with circles. The schematic of the specimen is shown in Figure 4.

Accelerated Hygrothermal Aging To induce and accelerate the aging in CFRP, the laminate was kept in a hot water bath for HT treatment at the elevated temperature of 80°C (353 K) for different durations up to 800 h.

The acoustic parameters were measured before HT and at time intervals of 24, 48, 72, 144, and finally at 792 h of HT treatment. A uniform temperature was maintained for the entire duration of the treatment. Moisture absorption was measured by the increase in the mass of the laminate. Mass measurements were taken nearest to the 0.0001 g. Figure 2 shows the plot of moisture absorption (m_t) against the duration of HT treatment. Initially, a rapid gain in moisture absorption was observed, and it tended to saturate as the treatment was prolonged.

Flexural Strength Tests. To evaluate the mechanical degradation occurring in the CFRP, three-point bending tests were performed at the end of each stage of HT treatment. A schematic of the setup is shown in Figure 3. Tests were performed as per ASTM D2344 M (ASTM 2016) using a universal testing machine of 25 kN capacity. The standard span-to-thickness ratio of 32:1 was adopted. The specimen length and width adopted were 120 mm and 13 mm, respectively.

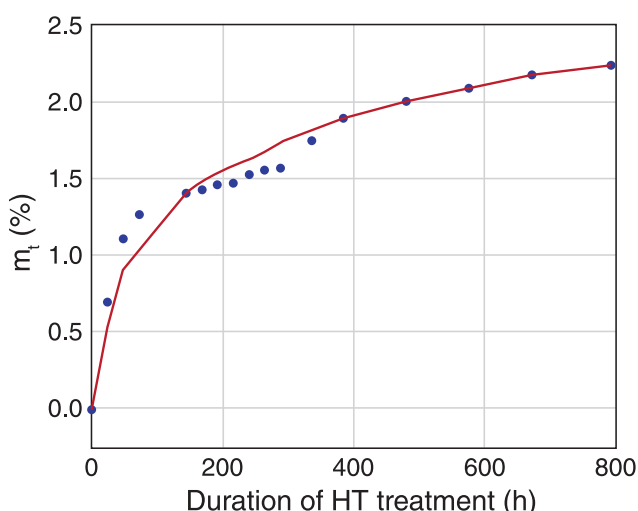


Figure 2. The moisture absorption (m_t) in the CFRP specimen for different durations of hygrothermal (HT) treatment.

Рис. 2. Поглинання води (m_t) у зразку вуглепластику для різної тривалості гідротермічної (ГТ) обробки

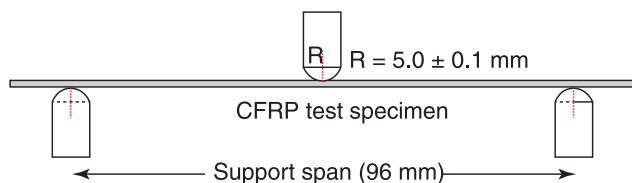


Figure 3. A schematic of the three-point-bending test.
Рис. 3. Схема випробування на триточковий вигин

The test results show the effect of HT aging on the flexural properties of CFRP (Figure 4). Overall changes in flexural modulus (E) and ultimate strength (σ_u) as a function of the duration of HT treatment were obtained and presented. It can be observed that both of these properties of composite specimens degraded considerably due to the HT treatment. The loss of ultimate strength of the specimens. The modulus was reduced by 7%, whereas the reduction in strength was found to be 26%. Also, the stiffness degradation in composite specimens was further correlated with the acoustic wave parameters obtained nondestructively.

Thermoelastic Wave Technique. In this study, the thermoelastic generation of acoustic waves by focused high-energy short-pulsed laser radiation on a composite laminate was experimentally demonstrated and its potential in evaluating the aged health of composite ma-

terials was investigated. External laser pulses ($\lambda = 1064$ nm) were irradiated over the laminate surface at a normal angle. The laser energy interacted with the laminate surface, which induced rapid localized heating, and thermoelastic expansion (that is, a high strain rate and thus emission of acoustic waves). The laser energy delivered per shot was 150 mJ with a pulse duration of 10 ns and over 8 mm of beam diameter with a wavelength of 1064 nm. The resulting parameters of the waves were studied by the acoustic emission transducers.

Those were plugged over the laser irradiated side of the laminate surface using vacuum grease. The schematic of the acoustic wave propagation and positioning of the sensors is shown in Figure 5. As for the acoustic waves, attenuation is governed by the following equation: reduction in stiffness was relatively lower as compared to the

$$A_1 = A_2 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

where A_1 is the amplitude of the wave signal at the location of sensor 1, A_2 is the amplitude of the wave signal at the location of sensor 2, x is the distance between the sensors, and α is the acoustic attenuation coefficient for the composite material.

Two acoustic emission transducers (sensor 1 and sensor 2) were placed diagonally with 148 mm be-

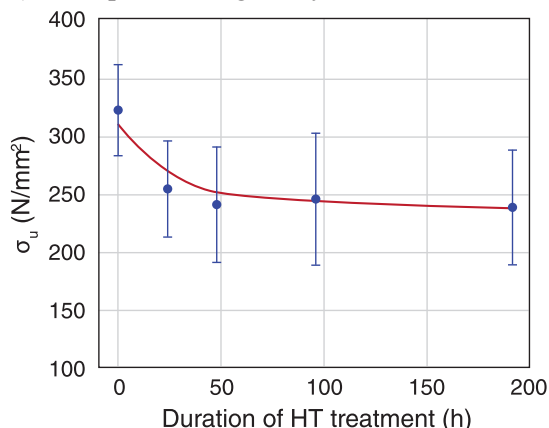
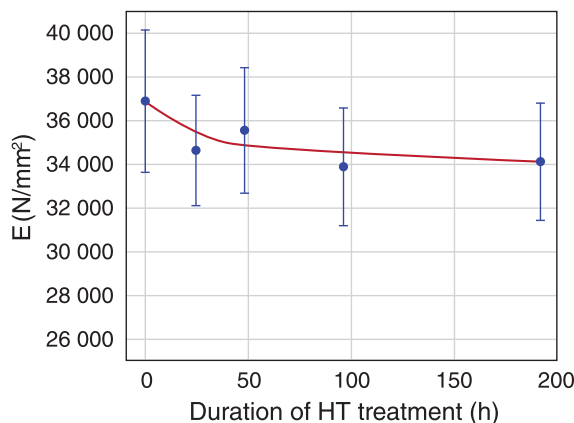


Figure 4. Plots showing mechanical degradation in CFRP with respect to the duration of HT treatment: (a) elastic modulus (E); (b) ultimate strength (σ_u).

Рис. 4. Графіки, що показують механічне руйнування у залежності від тривалості ГТ обробки: (а) модуль пружності (E); (б) межа міцності (σ_u)

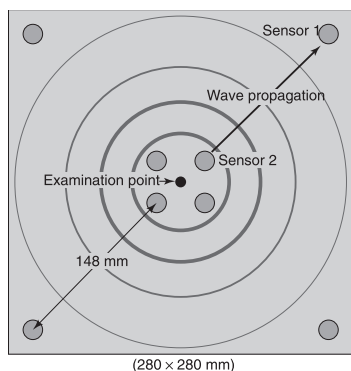


Figure 5. A schematic of wave propagation in the CFRP specimen along with the positions of the sensors.

Рис. 5. Схема поширення хвилі у зразку вуглепластику разом із положеннями датчиків

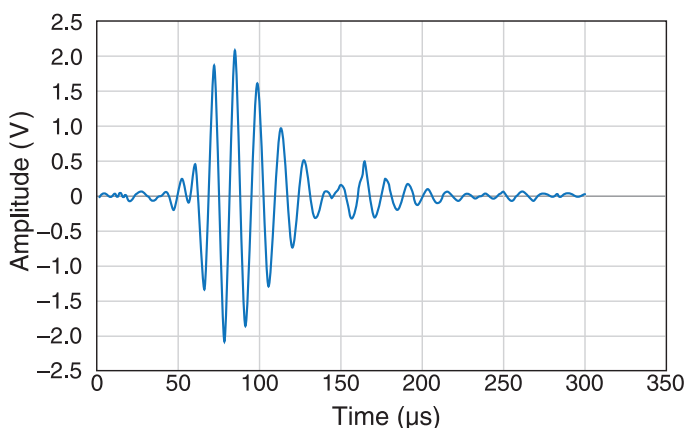


Figure 6. A typical ultrasound signal.

Рис. 6. Типовий ультразвуковий сигнал

tween them to receive the generated thermoelastic waves as shown in Figure 5. A typical ultrasound signal is shown in Figure 6. The signal amplitudes (A_1 and A_2) detected at sensor 1 and sensor 2 and the time taken by the signal to travel from sensor 1 to sensor 2 (dT) were recorded. Knowing the amplitudes measured by these sensors at their respective diagonals and the distance between them, the acoustic attenuation coefficient (α) was evaluated at each stage of HT treatment using Equation 1. Also, knowing the dT values and distance between the sensors, the wave velocity (V) was obtained using Equation 2, where x is 148 mm (distance between the sensors):

$$V = \frac{x}{dT} \tag{2}$$

through the material, its elastic and kinetic energies were absorbed and converted into heat. The HT aging in the specimen

Evaluation of Hygrothermal Aging using Wave Attenuation. The effect of HT treatment on the ther-

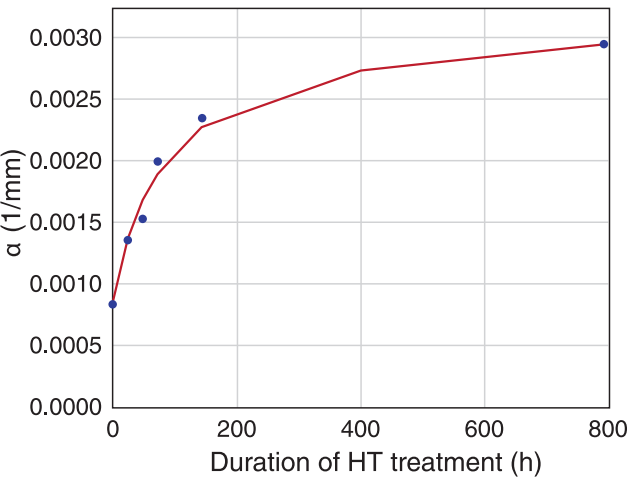


Figure 7. The effect of hygrothermal (HT) treatment on wave attenuation coefficient (α) in the CFRP specimen.
Рис. 7. Вплив гідротермічної (ГТ) обробки на коефіцієнт згасання хвилі (α) у зразку вуглепластику

moelastic acoustic wave attenuation coefficient was found. Figure 7 presents a plot of the attenuation coefficient against the duration of the HT treatment in the CFRP specimens. This coefficient was calculated by the attenuation law using Equation 1 between the positions of sensor 1 and sensor 2. The coefficient has shown a considerable increase in the coefficient as the HT treatment was prolonged. This trend approximately follows a parabolic variation with respect to the extent of aging.

A gain in the attenuation coefficient indicated an increase in the damping properties of the CFRP composite material due to the HT treatment. While the thermoelastic wave passed resulted in altering the damping and impedance properties of the CFRP composite material, which resulted in more attenuation.

To predict the mechanical degradation in CFRP using nondestructive parameters, a correlation between elastic modulus and ultimate strength with the attenuation coefficient was established. The correlation is shown in Figure 8. Both of the mechanical properties of the material show a decreasing trend with respect to the attenuation coefficient obtained. Further, by generating a rigorous database, a strong relationship can be obtained. As this coefficient was evaluated using a nondestructive approach, this methodology can be an effective tool in estimating the mechanical degradation in CFRP composite materials.

Evaluation of Hygrothermal Aging Using Wave Velocity. An attempt was made to evaluate the effect of HT aging on the velocity of acoustic wave propagation through this nondestructive approach. The time taken (dT) by the waves to travel from the position of sensor 1 to sensor 2 (averaged over four diagonals) was recorded at each stage of HT treatment. An increase in the time taken by the wave to travel the distance of 148 mm was observed. Using Equation 2, the wave velocity was determined, and its trend with the duration of HT treatment is demonstrated in Figure 9. A consistent decrease in the trend was observed. Overall, an approximate 20% decrease

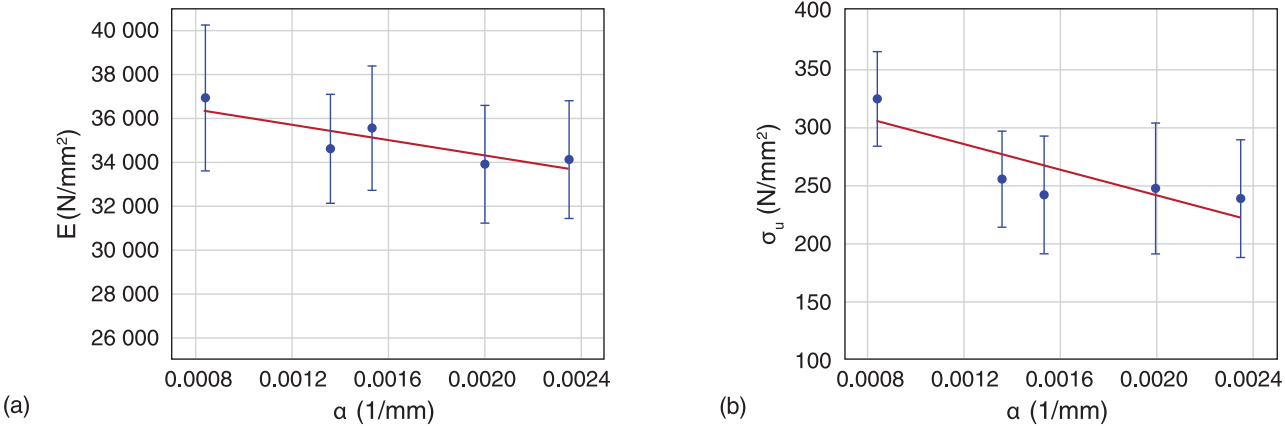


Figure 8. The correlation between mechanical parameters and attenuation coefficient (α) of CFRP: (a) elastic modulus (E); (b) ultimate strength (σ_u).
Рис. 8. Кореляція між механічними параметрами та коефіцієнтом згасання (α) вуглепластику: (а) модуль пружності (E); (б) межа міцності (σ_u)

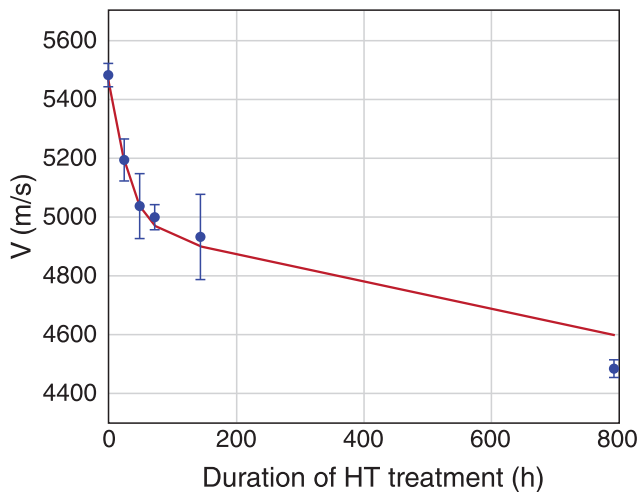


Figure 9. The effect of hygrothermal (HT) treatment on the velocity of thermoelastic wave propagation (V).

Рис. 9. Вплив гігротермічної (ГТ) обробки на швидкість поширення термопружних хвиль (V)

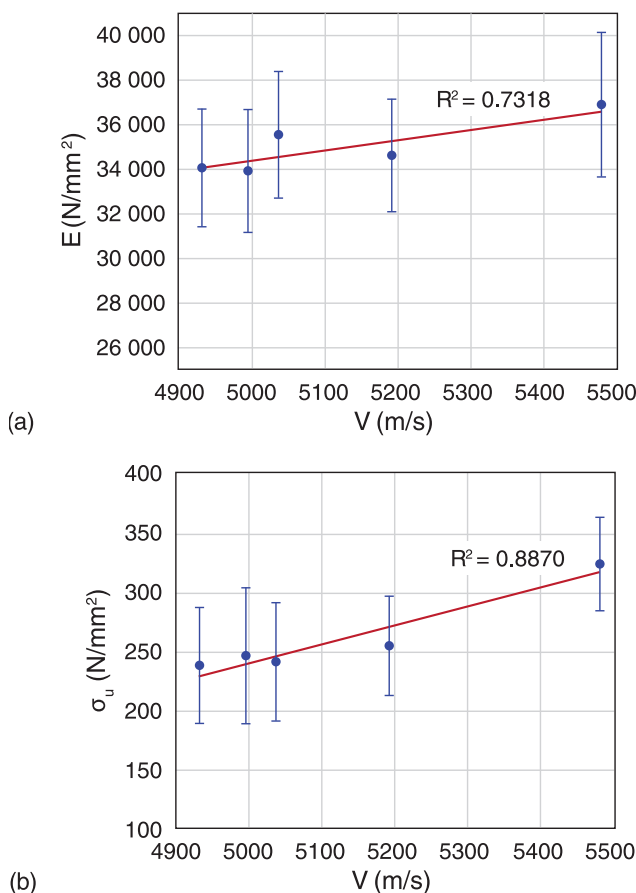


Figure 10. The correlation between mechanical parameters of CFRP and thermoelastic wave velocity (V): (a) elastic modulus (E); (b) ultimate strength (σ_u).

Рис. 10. Кореляція між механічними параметрами вуглепластику та швидкістю термопружної хвилі (V): (а) модуль пружності (E); (б) межа міцності (σ_u)

in the velocity of wave propagation was found over 800 h of the treatment. The rate of velocity decrement was found to decrease as the aging prolonged. As the aging resulted in lowering the elastic properties of

CFRP, a decrease in the wave velocity was expected and the same is observed in Figure 9.

Further, a correlation of the elastic modulus and ultimate strength of CFRP with acoustic wave velocity was obtained. Figure 10 presents the trend of the mechanical properties with the velocity of wave propagation. Both of the properties show an increasing trend with respect to the wave velocity obtained. This indicates that the reduction in the velocity of propagation signifies a decrease in the health of the material. A straight-line fit goes fairly well with the data. With a rigorous database, a strong correlation can be made to evaluate the aged health of CFRP just by analyzing the wave parameters through this nondestructive approach.

Conclusion

An unconventional and unique NDT approach was presented through this study. Through the experiments, HT aging has shown a significant effect on the thermoelastic wave propagation characteristics in CFRP laminates. The aging was characterized on the basis of two thermoelastic wave parameters: wave amplitude and wave velocity. The attenuation, evaluated through wave amplitude, and wave velocity have shown significant changes as a result of aging. Thus, a gain in the attenuation coefficient and a decrease in the wave velocity can be effective parameters for monitoring the aging of this type of structure, as these have been correlated with mechanical properties of CFRP. This technique has the advantage of being a noncontact simulation of waves, which can be further developed into an effective health monitoring tool to form a strong relationship between the thermoelastic properties of CFRP and the extent of degradation due to HT aging. Hence, by listening to the sound, the aged health of CFRP composite material can be effectively evaluated through this novel and unconventional NDT technique.

References

- Angulo, A., J. Allwright, C. Mares, T.-H. Gan, and S. Souza, 2017, "Finite Element Analysis of Crack Growth for Structural Health Monitoring of Mooring Chains Using Ultrasonic Guided Waves and Acoustic Emission," *Procedia Structural Integrity*, **Vol. 5**, pp. 217–224, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.119>.
- ASTM, 2016, ASTM D2344/D2344M-16: Standard Test Method for Short Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Choi, Y., S. Haider Abbas, and J.-R. Lee, 2018, "Aircraft Integrated Structural Health Monitoring using Lasers, Piezoelectricity, and Fiber Optics," *Measurement*, **Vol. 125**, pp. 294–302, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.067>.
- Cysne Barbosa, A.P., A.P.P. Fulco, E.S.S. Guerra, F.K. Arakaki, M. Tosatto, M.C.B. Costa, and J.D.D. Melo, 2017, "Accelerated Aging Effects on Carbon Fiber/Epoxy Composites," *Composites Part B: Engineering*, **Vol. 110**, pp. 298–306, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.004>.
- El Guerjouma, R., J.-C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, and T. Monnier, 2001, "Non-Destructive Evaluation of Damage and Failure of Fibre Reinforced Polymer Composites Using Ultrasonic Waves and Acoustic Emission," *Advanced Engineering Materials*, **Vol. 3**, No.

- 8, p. 601–608, [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200108\)3:8%3C601::AID-ADEM601%3E3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200108)3:8%3C601::AID-ADEM601%3E3.0.CO;2-9).
6. Fakh, M. A., S. Mustapha, M.M. Alamdari, and L. Ye, 2017, “Symbolic Dynamics Time Series Analysis for Assessment of Barely Visible Indentation Damage in Composite Sandwich Structures Based on Guided Waves,” *Journal of Composite Materials*, **Vol. 5**, No. 29, pp. 4129–4143, <https://doi.org/10.1177/0021998317696138>.
7. Gagar, D., M. Martinez, and P. Foote, 2014, “Development of Generic Methodology for Designing a Structural Health Monitoring Installation Based on the Acoustic Emission Technique,” *Procedia CIRP*, **Vol. 22**, pp. 103–108, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.122>.
8. Hong, G., A. Yalozis, and G.N. Frantziskonis, 1995, “Hygrothermal Degradation in Glass/Epoxy – Evaluation via Stress Wave Factors,” *Composite Structures*, **Vol. 30**, No. 4, pp. 407–417, [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(94\)00063-8](https://doi.org/10.1016/0263-8223(94)00063-8).
9. Katunin, A., K. Dragan, and M. Dziendzikowski, 2015, “Damage Identification in Aircraft Composite Structures: A Case Study Using Various Nondestructive Testing Techniques,” *Composite Structures*, **Vol. 127**, pp. 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.080>.
10. Korkees, F., C. Arnold, and S. Alston, 2018, “An Investigation of the LongTerm Water Uptake Behavior and Mechanisms of Carbon Fiber/977-2 Epoxy Composites,” *Polymer Engineering and Science*, **Vol. 58**, No. 12, pp. 2175–2184, <https://doi.org/10.1002/pen.24830>.
11. Lyamshev, L.M., 1981, “Optoacoustic Sources of Sound,” *Soviet Physics Uspekhi*, **Vol. 24**, pp. 977–995, <https://doi.org/10.1070/PU1981v024n12ABEH004757>.
12. Mouritz, A.P., C. Townsend, and M.Z. Shah Khan, 2000, “Non-Destructive Detection of Fatigue Damage in Thick Composites by Pulse-Echo Ultrasonics,” *Composites Science and Technology*, **Vol. 60**, No. 1, pp. 23–32, [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00094-9).
13. Moy, P., and F. E. Karasz, 1980, “Epoxy-Water Interactions,” *Polymer Engineering and Science*, **Vol. 20**, No. 4, pp. 315–319, <https://doi.org/10.1002/pen.760200417>.
14. Mustapha, S., L. Ye, X. Dong, and M.M. Alamdari, 2016, “Evaluation of Barely Visible Indentation Damage (BVID) in CF/EP Sandwich Composites using Guided Wave Signals,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, **Vols. 76–77**, pp. 497–517, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.01.023>.
15. Nogueira, P., C. Ramirez, A. Torres, M.J. Abad, J. Cano, J. Lopez, I. LopezBueno, and L. Barral, 2001, “Effect of Water Sorption on the Structure and Mechanical Properties of an Epoxy Resin System,” *Journal of Applied Polymer Science*, **Vol. 80**, No. 1, pp. 71–80, [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010404\)80:1<71::AID-APP1077>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010404)80:1<71::AID-APP1077>3.0.CO;2-H).
16. Park, B., Y.-K. An, and H. Sohn, 2014, “Visualization of Hidden Delamination and Debonding in Composites through Noncontact Laser Ultrasonic Scanning,” *Composites Science and Technology*, **Vol. 100**, pp. 10–18, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.05.029>.
17. Park, J.-W., D.-J. Kim, K.-H. Im, S.-K. Park, D.K. Hsu, A.H. Kite, S.-K. Kim, K.-S. Lee, and I.-Y. Yang, 2008, “Ultrasonic Influence of Porosity Level on CFRP Composite Laminates Using Rayleigh Probe Waves,” *Acta Mechanica Solida Sinica*, **Vol. 21**, No. 4, pp. 298–307, <https://doi.org/10.1007/s10338-008-0834-1>.
18. Sun, P., Y. Zhao, Y. Luo, and L. Sun, 2011, “Effect of Temperature and Cyclic Hygrothermal Aging on the Interlaminar Shear Strength of Carbon Fiber/Bismaleimide (BMI) Composite,” *Materials and Design*, **Vol. 32**, No. 8–9, pp. 4341–4347, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.007>.
19. Wang, X., and X. Xu, 2001, “Thermoelastic Wave Induced by Pulsed Laser Heating,” *Applied Physics A*, **Vol. 73**, pp. 107–114, <https://doi.org/10.1007/s003390000593>.
20. Xiao, G.Z., and M. E. R. Shanahan, 1998, “Irreversible Effects of Hygrothermal Aging on DGEBA/DDA Epoxy Resin,” *Journal of Applied Polymer Science*, **Vol. 69**, No. 2, pp. 363–369, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19980711\)69:2%3C363::AID-APP18%3E3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19980711)69:2%3C363::AID-APP18%3E3.0.CO;2-X).
21. Xiao, G.Z., M. Delamar, and M.E.R. Shanahan, 1997, “Irreversible Interactions between Water and DGEBA/DDA Epoxy Resin during Hygrothermal Aging,” *Journal of Applied Polymer Science*, **Vol. 65**, No. 3, pp. 449–458, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970718\)65:3%3C449::AID-APP4%3E3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970718)65:3%3C449::AID-APP4%3E3.0.CO;2-H).
22. Zhou, J., and J.P. Lucas, 1999, “Hygrothermal Effects of Epoxy Resin, Part I: The Nature of Water in Epoxy,” *Polymer*, **Vol. 40**, No. 20, pp. 5505–5512, [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00790-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00790-3).

Permission to Reprint, 23.09.2021:

The American Society for Nondestructive Testing, Inc.

CITATION

Materials Evaluation 79 (1): 55–60

<https://doi.org/10.32548/2021.me-04130>

©2021 American Society for Nondestructive Testing

Календар міжнародних конференцій та виставок 2022

08.02 – 11.02 Wels, Austria	iCT - 11 th Conference on Industrial Computed Tomography 2022	FHOÖ
15.03 – 17.03 Erfurt, Germany	Fachtagung ZfP im Eisenbahnwesen	DGZfP
05.04 – 07.04 Київ, Україна	XIV Міжнародна спеціалізована виставка «Київський технічний ярмарок»	Міжнародний виставковий центр
24.04 – 27.04 Florence, Italy	Analysing Art 2022: New Technologies – New Applications	BINDT
03.05 – 06.05 Stuttgart, Germany	Control 2022	Schall Messen
11.05 – 12.05 Київ, Україна	Конференція і виставка «Неруйнівний Контроль-2022»	Асоціація «ОКО»
30.05 – 01.06 Київ, Україна	VI Міжнародна конференція «Титан 2022: Виробництво та застосування»	ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, МАС
30.05 – 03.06 Incheon, Korea – postponed	20 th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2020)	KSNT
04.07 – 07.07 Palermo, Italy	10 th European Workshop on Structural Health Monitoring	
10.07 – 15.07 Berlin, Germany	26 th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology	iASMiRT, DGZfP, TÜV NORD, swissnuclear, TU Kaiserslautern

Початок. Продовження дивись на стор. 57

ВИБІР НЕРУЙНІВНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЩОДО ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ГОЛОВНИХ БАЛОК МОСТУ ім. Є.О. ПАТОНА ЧЕРЕЗ р. ДНІПРО У м. КИЄВІ

Л.М. Лобанов, В.П. Дядін, Є.О. Давидов, В.А. Литвиненко

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

Розглянуто питання вибору методів контролю для оцінки технічного стану головних поздовжніх балок мосту ім. Є.О. Патона. Коротко описані особливості об'єкта контролю і результати обстеження. Запропоновано якісний алгоритм обстеження великогабаритних будівельних металокопункцій. Бібліогр. 7, рис. 10.

Ключові слова: міст ім. Є. О. Патона, головні балки, зварне з'єднання, корозія, неруйнівний контроль, технічна діагностика, обстеження металокопункцій, автоматичне та напівавтоматичне зварювання, пошкодження зварних з'єднань

Автодорожній міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро є першим в світі суцільнозварним автодорожнім мостом, який отримав визнання Американської асоціації зварювання як видатна зварна споруда ХХ століття. На час його будівництва це був революційний прорив щодо використання розроблених технологій зварювання елементів мостових конструкцій замість клепаних з'єднань. До того часу всі спроби будівництва зварних мостів закінчувались невдачами. Основною причиною цих невдач були використання матеріалів, що застосовувались у клепаних конструкціях, та виникнення тріщин в зварних з'єднаннях як під час заводського та монтажного зварювання, так і під час експлуатації мостів [1]. Проведені в Інституті електрозварювання під керівництвом Є. О. Патона дослідження дозволили переглянути існуючі на той час підходи до зварних конструкцій в цілому та застосувати передові технології механізованого зварювання під шаром флюсу, які добре себе зарекомендували під час Другої світової війни на підприємствах, що виробляли корпуси броньових машин. Саме ці технології зварювання [1–3] були взяті за основу та застосовані під час виготовлення металевих конструкцій мосту ім. Є.О. Патона в заводських умовах, а також під час їх монтажу на будівельному майданчику, що дозволило отримати суттєві переваги перед існуючими на той час підходами до будівництва сталевих мостів (рис. 1, 2).

Міст складається з 24-х прогонових споруд та має загальну довжину 1542,2 м. Правобережна частина мосту має десять прогонів, які перекриті двома суцільнозварними 5-и прогоновими нерозрізними спорудами $5 \times 58 + 5 \times 58$ (м). Середня частина мосту, яка розташована над судноплавною

ділянкою річки, має шість прогонів, які перекриті трьома нерозрізними суцільнозварними спорудами $58 + 4 \times 87 + 58$ (м).

Лівобережна частина мосту складається з 8-ми прогонів по 58 м, яка перекрита двома 4-х прогоновими суцільнозварними нерозрізними спорудами $4 \times 58 + 4 \times 58$ (м).

У поперечному перерізі кожна споруда має чотири головні поздовжні балки двотаврового перетину, що складаються з вертикальної стінки висотою 3600 мм і товщиною 14 мм, і поясів різної товщини, яка змінюється від 30 до 80 мм, при ширині до 1000 мм. Стійкість стінки балки додатково забезпечується вертикальними ребрами, встановленими з кроком 7,25 м. У 6-ти прогонових спо-

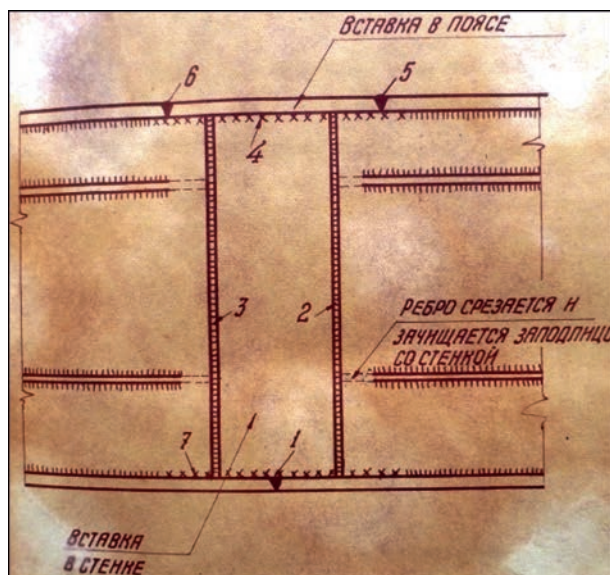


Рис. 1. Порядок монтажного складання та зварювання типових ферм мосту [2]



Рис. 2. Приклад збирання ферм головних балок з використанням автоматичного та напівавтоматичного зварювання [1]

рудах висота стінки над проміжними опорами за рахунок пристрою вутів збільшена до 6200 мм.

Головні поздовжні балки складаються з ферм, які під час монтажу металевих конструкцій зварені між собою в стик з використанням автоматичного зварювання під флюсом. Ферми виготовлені з низьковуглецевої сталі марки М16С.

Міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві було запроєктовано виходячи з умов, що проектна інтенсивність руху має складати 10 тис. автомобілів на добу. Наразі інтенсивність руху зросла практично в 10 разів разом із збільшенням ваги автомобілів. Збільшилися також і постійні навантаження на міст внаслідок прокладання труб теплотраси та укладки нового асфальтобетонного покриття. У зв'язку з цим у 1994–1998 рр., було виконано посилення поперечних балок мосту, які розташовані біля деформаційних швів, та встановлено додаткові ребра жорсткості на окремих ділянках вертикальних стінок ферм головних балок [4].

До 2018 р. головна увага при обстеженні технічного стану мосту приділялась дорожньому полотну, тротуарам, деформаційним швам, поперечним елементам і зв'язкам між головними балками [4, 5]. Що стосується основних несучих елементів мосту – головних поздовжніх балок, то їх обстеження виконувалось лише візуально без використання інструментальних та фізичних методів контролю, що не дозволяло отримати більш детальну інформацію фактичного технічного стану цих конструкцій. Лише у 2018 р. звернули увагу на те, що на стінках головних балок споруди в місцях розташування деформаційних швів відбулася значна корозія металу. За результатами досліджень, проведених ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» (м. Київ), було зроблено висновок, що міст ім. Є.О. Патона знаходиться в аварійно-

му стані та невідкладно потребує капітального ремонту з частковою заміною його конструктивних елементів. Зокрема, була акцентована увага на необхідності перевірки технічного стану головних поздовжніх металевих зварних балок з використанням сучасних неруйнівних методів контролю. Основну частину цієї роботи було покладено на фахівців Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за виключенням візуального огляду, який проводили фахівці ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського».

Враховуючі великий обсяг робіт, який потрібно було виконати при проведенні інструментального обстеження головних балок мосту, в першу чергу основна увага приділялась відбору необхідних методів неруйнівного контролю, які б дозволили більш оперативно провести оцінку технічного стану конструкцій.

Для вирішення цієї задачі на першому етапі робіт було виконано ретельний аналіз технічної документації, що стосується заводського виготовлення та з'єднання великогабаритних конструкцій з використанням автоматичного зварювання на монтажному майданчику. Необхідність цієї роботи в першу чергу була пов'язана з тим, що під час як заводського виготовлення конструкцій, так і їх монтажного з'єднання додатково вносилися зміни до вдосконалення технології зварювання, що було обумовлено особливостями збирання елементів в різних просторових положеннях та типами зварних з'єднань. Крім того, під час виготовлення та монтажу ферм було прийнято рішення не проводити усунення деяких дефектів в зварних з'єднаннях та в основному металі у зв'язку з їх незначними розмірами та мінімальним впливом на міцність конструкції. Обстеження зазначених конструкцій в процесі експлуатації не виконувалося.

На другому етапі було виконано аналіз результатів попередніх звітів обстеження мосту, зроблених фахівцями ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського». Проведення цієї роботи пов'язано з тим, щоби звести позначення елементів конструкцій до загального виду та виявити можливі закономірності пошкодження мосту.

Враховуючи особливості виготовлення та додаткові навантаження на головні балки мосту, при обстеженні їх технічного стану робота виконувалася за наступними напрямками: вибірковий ультразвуковий контроль стикових заводських і монтажних зварних з'єднань балок; вибірковий ультразвуковий контроль основного металу елементів балок на наявність розшарувань; вибіркова товщинометрія основних елементів головних балок; вибірковий магнітний контроль кутових і

стикових зварних з'єднань. Вказані методи контролю застосовувалися в місцях, визначених за результатами візуального огляду.

Необхідність і достатність саме таких методів контролю було визначено за результатами попереднього обстеження головних поздовжніх балок моста, розташованих між 2-ю і 3-ю опорами, яке було виконано фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в липні 2019 р. На цьому етапі робіт було апробовано різні методи інструментального неруйнівного контролю. За основний критерій вибору методів контролю було визначено відносну простоту та оперативність їх застосування в місцях обмеженого доступу до елементів конструкції. Основною задачею застосованих методів було виявлення можливого корозійного та втомного пошкодження елементів поздовжніх балок за час експлуатації. Безпосередньо зазначені роботи було виконано у 2020 р.

Враховуючі загальну довжину заводських та монтажних зварних з'єднань (більше 110 км), вибіркового ультразвукового контролю стикових швів виконувався в місцях, визначених за результатами додаткового візуального огляду головних балок. Особлива увага приділялася місцям, в яких під час монтажу та виготовлення елементів ферм були виявлені дефекти [1, 2] в зварних з'єднаннях. Вибірковому обстеженню також підлягали зварні з'єднання, які розташовані в місцях максимальних напружень. На наш погляд, дослідження таких зварних з'єднань дозволяло відстежити динаміку можливого росту дефектів. В першу чергу це було пов'язано з тим, що у зв'язку з обмеженим фінансуванням такі роботи неможливо було виконати в повному обсязі. Всього було проконтрольовано 150 м зварних стикових з'єднань, 50 % з яких складали монтажні шви, якими через вставки з'єднувалися між собою ферми (рис. 3, 4).

Результати ультразвукового контролю монтажних і заводських зварних швів прогонових споруд свідчать про те, що зварні з'єднання головних балок знаходяться у задовільному стані. Навіть ті дефекти, що були виявлені ще на етапі будівництва мосту, в процесі тривалої експлуатації не мали подальшого розвитку (рис. 5).

З використанням ультразвукового контролю вибірково було також перевірено суцільність основного металу головних балок. Необхідність проведення такого методу неруйнівного контролю пов'язана з тим, що, як свідчать результати звіту з будівництва мосту, при виготовленні ферм головних поздовжніх балок у ряді випадків фіксувалися локальні місця з розшаруванням в металі горизонтальних ребер жорсткості. Якщо розшарування не доходили до зварних з'єднань, такі ділянки не ремонтувалися. Для оцінки розшарування металу

в місцях розташування Т- та Х-подібних зварних з'єднань було вибірково проконтрольовано 7 м² поверхні елементів. Контролювали ділянки основного металу різної товщини, які безпосередньо примикають до зварних з'єднань та в яких під



Рис. 3. Контроль стикових вертикальних швів з'єднувальної вставки



Рис. 4. Контроль стикового шва у верхньому поясі з'єднувальної вставки



Рис. 5. Приклад дефекту, який було залишено при монтажі біля 12-ї опори (в подальшому кінці тріщини було засвердлено) [2]

час монтажу було виявлено розшарування. Крім того, на ділянках проведення УЗК поверхні введення ультразвуку піддавалися контролю на наявність внутрішніх розшарувань.

Результати такого контролю показали, що в жодній з проконтрольованих ділянок поширення розшарування на інші ділянки та його вихід на зовнішні поверхні не виявлено. Слід зазначити, що при проектуванні горизонтальних ребер жорсткості було передбачено їх приварювання до вертикальної стінки ферми без повного проплавлення. Це дозволило значно зменшити залишкові напруження у напрямку товщини металу та за рахунок цього суттєво знизити ризик розвитку даного дефекту металу.

Необхідність достовірної оцінки стану і можливості безпечної експлуатації мостових конструкцій і в цілому моста визначило вибір магнітного контролю (МК). Відомо, що магнітний контроль дозволяє виявляти поверхневі та підповерхневі тріщиноподібні дефекти, що, власне, і є основною метою обстеження – виявлення втомних тріщин. Всі мостові конструкції працюють динамічно або в умовах циклічних навантажень. Наявність циклічних навантажень з часом неминуче призводить до утворення втомних тріщин в найбільш навантажених місцях. Систематична поява втомних тріщин (в схожих за конструкцією і експлуатаційним навантаженням вузлах) свідчить про вичерпання ресурсу циклічної міцності та необхідності спеціального розгляду цієї проблеми. Тому дані магнітного контролю мають велике значення для правильної оцінки поточного стану мостових конструкцій. Також важливі і експлуатаційні можливості магнітного контролю – помірні вимоги до підготовки поверхні і прийнятна вартість робіт. В різних місцях прогонових споруд МК було проконтрольовано 124 ділянки зварних з'єднань загальною площею 40,0 м². Результати контролю вносились в робочі карти контролю, які були прив'язані до номерів ферм, з яких виготовлена повздовжня балка, та номерів опор, між якими вона знаходиться. За результатами цих досліджень було встановлено, що в процесі тривалої експлуатації тріщини втоми в зварних з'єднаннях металевих конструкцій головних балок не утворилися і вони знаходяться в задовільному стані.

Враховуючи велике скупчення сміття на головних балках, значна увага при їх обстеженні приділялась оцінці ступеня корозійного ураження (пояс, стінка, горизонтальні та вертикальні ребра жорсткості, які посилюють накладки поясів, опорні ребра та ін.) та виявити основні чинники, які сприяли розвитку корозії. Беручи до уваги значну довжину головних балок, товщинометрія зазначених елементів конструкції виконувалася шляхом

вибіркового вимірювання з урахуванням стану конструкцій за даними візуального огляду.

Для виявлення найбільш характерних ушкоджень елементів головних балок і супутніх їм факторів при обстеженні прогонових споруд інструментальними методами контролю кількість вимірювань на крайніх балках (№№ 1, 4) була більш щільною, ніж на балках №№ 2 та 3, що було викликано великим скупченням сміття на крайніх балках споруди та обмеженим доступом до елементів контролю зі зворотного боку конструкції (рис. 6, 7), а також необхідністю розуміння характеру ураження, виявлення ділянок з системними проблемами від тривалої експлуатації. Отриманий досвід і знання особливостей руйнування зазначених конструкцій дозволили більш раціонально скоригувати план подальшого обстеження.

Під час вимірювання товщини додатково відстежувалася наявність можливих розшарувань основного металу в вузлових з'єднаннях в області при-



Рис. 6. Приклад скупчення сміття на крайній балці № 4 першої п'ятипрогонної споруди мосту



Рис. 7. Приклад скупчення сміття на кінцях прогонових споруд у зоні деформаційного шва

варювання горизонтальних і вертикальних ребер жорсткості до стінок балки. Місця, де були виявлені розшарування в металі та неметалічні включення, фіксувалися на робочих картах контролю. Надалі за результатами загального аналізу вибиралися

ділянки, де виконувався більш детальний контроль з метою визначення характеру виявлених несутцільностей: металургійне походження або внаслідок розриву через зварювальні напруги та циклічні навантаження від роботи мосту. При вибіркового контролю товщини елементів ферм в місцях скупчення сміття було виконано більше 12,6 тис. вимірювань. Всього під час контролю товщини елементів головних повздовжніх балок прогонових споруд було виконано більше 17 тис. вимірювань. За результатами контролю товщини були побудовані робочі карти контролю (168 карт ферм). Найбільш типові приклади корозійних ушкоджень зварних вузлів головних балок мосту наведено на рис. 8.

Типові пошкодження головних балок прогонових споруд надані у вигляді фрагмента робочої карти контролю на рис. 9. На карті контролю застосовано наступні умовні позначення: Ф – ферма; ділянки, на яких втрата металу від корозії знаходиться в межах 2...4 мм – жовтий колір, а у разі більше за 4 мм – червоний. Цифра зверху над кольором означає приблизну довжину відповідної зони вздовж ферми. Окремий квадрат жовтий або червоний відповідає довжині приблизно 100 мм. Якщо зона відокремлюється конструктивними елементами, наприклад, вертикальними ребрами або зварними з'єднаннями листів, тоді цифра над кольором не позначена. Неметалеві включення – зелений колір. Границі ферм позначені синім кольором. Рухома та нерухома опори відповідно – $\circ$ 22 Δ 23. У квадратних дужках надані номери фо-

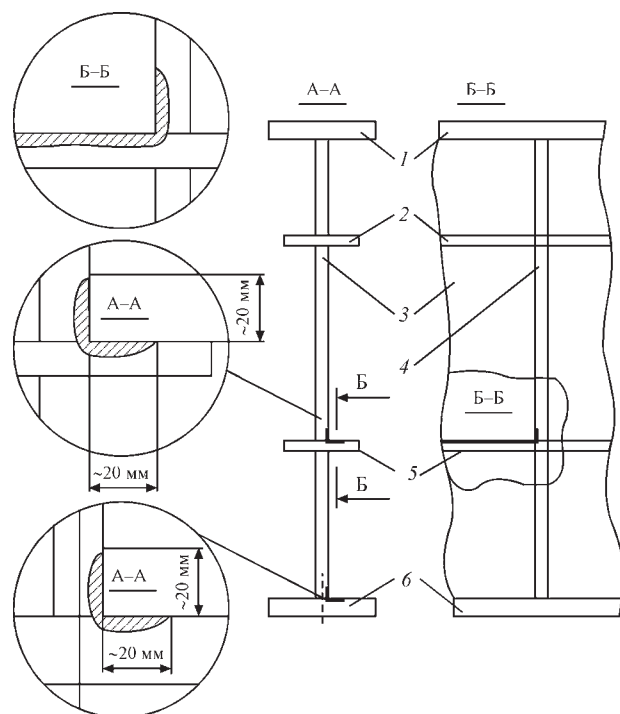


Рис. 8. Типове корозійне пошкодження зварних з'єднань елементів ферм головних балок: 1 – верхня полка; 2 – верхнє горизонтальне ребро; 3 – стінка; 4 – вертикальне ребро; 5 – нижнє вертикальне ребро; 6 – нижня полка

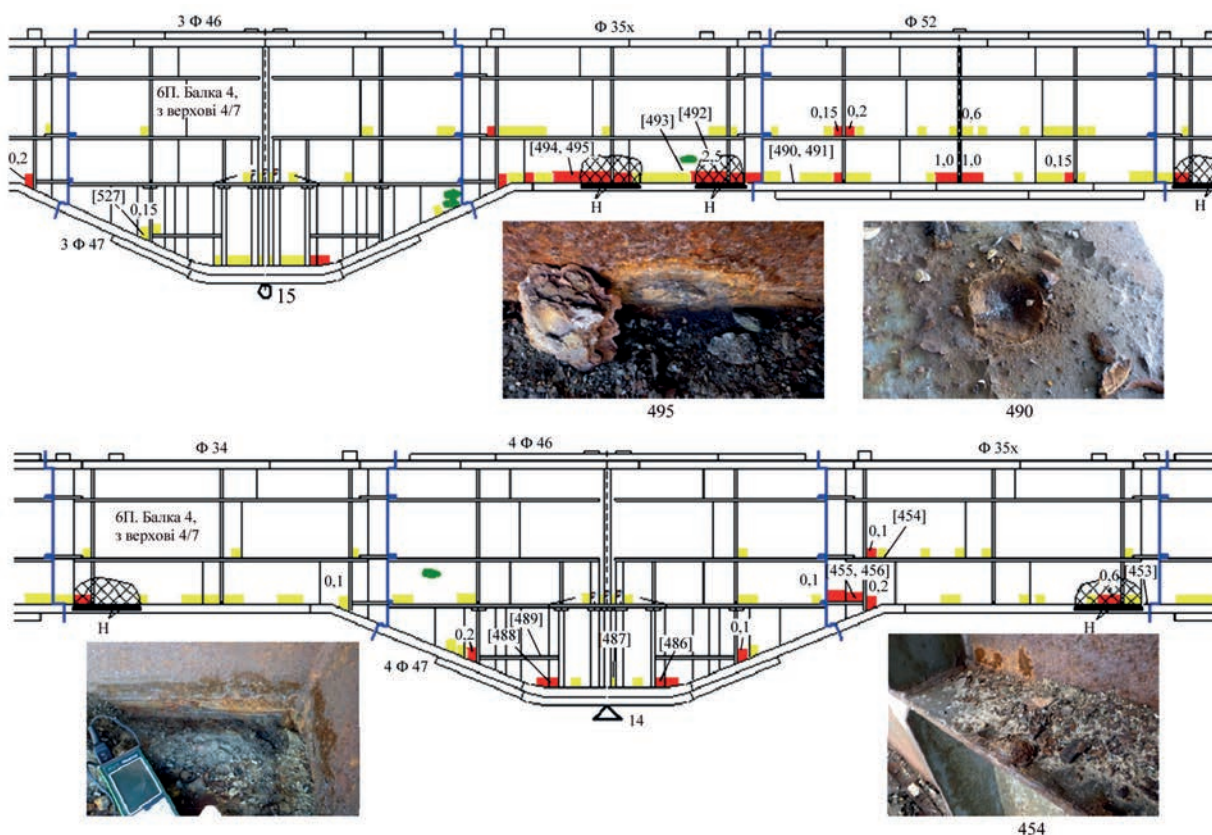


Рис. 9. Фрагмент зведених результатів контролю елементів балки № 4, розташованої між 13 та 15 опорою



Рис. 10. Рухомі оптико-електронні пристрої запису інформації

тографій деяких ділянок. Місця, де не проводився вибірковий контроль, позначені пунктирним перехрестям. Чорним кольором нанесені дефекти згідно з даними ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського», які були наведені в звіті, складеному за результатами обстеження мосту в 2018 р.

За результатами виконаних вимірювань товщини та проведеного аналізу було визначено, що металеві конструкції головних балок зазнали значних корозійних ушкоджень. За рахунок корозії товщина металу в елементах конструкції, а саме в нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах та в нижній частині стінок головних балок суттєво зменшилася. Найбільші ураження спостерігаються в фермах Ф10 та Ф15 головної балки № 1 та фермах Ф1 і Ф3 головної балки № 4. В цих фермах значні корозійні ураження потребують невідкладного ремонту. Більш детальну інформацію стосовно проведеного обстеження наведено в [6, 7].

Що стосується візуально-вимірювального огляду повздовжніх головних балок мосту, то крім традиційного способу, фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України було додатково апробовано автоматизовану систему та апаратуру для візуального контролю зварних швів. Основна мета застосування розробленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України рухомого оптико-електронного пристрою, обладнаного засобами запису інформації, полягала в зменшенні залежності від людського фактору і об'єктивізації результатів контролю (рис. 10). Всі дані, що записуються під час сканування, зберігаються в пам'яті пристрою та доступні для подальшого додаткового аналізу та архівування.

Підсумовуючи результати обстеження головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві, слід зробити ряд узагальнень. Обстеження великогабаритних металевих конструкцій, які перебувають в експлуатації, з точки зору проведення технічного обстеження, мають ряд схожих особливостей:

- великий обсяг вузлів, кожен з яких вимагає достовірної оцінки;
- відсутність безпосереднього доступу до ряду вузлів;
- необхідність мінімізації плану обстеження через практичну обмеженість ресурсів.

Висновки

Достовірна оцінка таких конструкцій, як міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві, є нетривіальною технічною проблемою. Коротко сформулюємо основні принципи, на яких базувалася стратегія даного обстеження, і яка, на наш погляд, може бути корисна для оцінки подібних конструкцій:

1. Ретельний попередній аналіз конструкції та умов її роботи. Бажано створення кількісної моделі для виконання розрахункового аналізу з метою визначення найбільш навантажених елементів і силового впливу на конструкцію в цілому, виходячи з конструкційних і експлуатаційних особливостей виявлення ділянок, схильних до корозійного ураження (застійні зони, вплив агресивних середовищ та ін.).

2. На основі висновків за пунктом 1 визначають критичні вузли або елементи конструкції, які піддаються найбільшим впливам, наприклад, механічним напруженням, і особливо вузли з циклічним характером навантаження.

3. Попередній вибір методів контролю. Вирішується питання, чи включаються ті методи контролю, які за своїми характеристиками і особливостями застосування придатні для виявлення передбачуваних експлуатаційних дефектів. Вибір методів контролю має бути пов'язаний з особливостями експлуатації конструкції, її станом та характерним пошкодженням. У нашому випадку найбільш ймовірні експлуатаційні дефекти – це тріщина втоми та виразкова корозія. Виявлення виразкової корозії зазвичай не представляє труднощів на відміну від тріщини втоми.

4. Ретельне обстеження відносно невеликої частини від загального обсягу типових вузлів конструкції. Основний наголос при проведенні обстеження роблять на критичні вузли. Обстеження виконується з метою адаптації обраних методів контролю та оцінки їх ефективності по відношенню до конкретних умов та особливостей обстежуваної металоконструкції.

5. Аналіз результатів обстеження за пунктом 4 і відбір найбільш раціональних методів контролю та обсягів контролю будь-яким способом. Тріщина втоми може бути виявлена різними методами (як правило, найбільше для цього придатні ультразвуковий, магнітний, капілярний методи контролю і в меншій мірі рентгенівський, вихрострумний методи). Вибір найбільш раціональних методів і розподіл обсягів обстеження між ними розумно виконати після проведення адаптації цих методів і аналізу їх результатів на відносно невеликій частині від загального обсягу контролю металоконструкції. При цьому вкрай корисно мати в арсеналі якомога більше робочих методів контролю. У деяких принципових випадках така можливість дозволяє робити більш достовірні судження щодо етимології походження дефектів і їх геометричних розмірів.

6. Проведення обстеження. Слід проводити перманентний аналіз виявлення несутільностей та поточного стану конструкцій, а у разі виявлення несподіваних експлуатаційних дефектів бути готовим коригувати план обстеження.

7. Якщо в результаті обстеження будуть виявлені небезпечні експлуатаційні дефекти, то

з'явиться об'єктивна вимога щодо проведення більш об'ємного обстеження.

Список літератури

1. (1953) *Отчет о заводском изготовлении элементов пролетных строений Киевского городского моста на заводе им. Молотова в г. Днепропетровске*. Киев, Библиотека ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ.
2. (1953) *Отчет по теме «Монтажная сварка пролетных строений Киевского городского моста им. Е.О. Патона НАН УССР через р. Днепр»*. Киев.
3. Лобанов Л.М., Кирьян В.И., Шумицкий О.И. (2003). Пятьдесят лет мосту им. Е.О. Патона. *Автоматическая сварка*, **10–11**, 14–22.
4. Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В. (2018) Міст ім. Є.О. Патона – нинішній стан та перспективи. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, **1**, 2–9.
5. Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В. (2018) Аварійна ситуація на мосту ім. Є.О. Патона та заходи щодо її вирішення. *Там само*, **4**, 30–33.
6. Позняков В.Д., Дядін В.П., Давидов Є.О., Дмитрієнко Р.І. (2021) Технічний стан металевих конструкцій головних балок моста ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві. *Там само*, **1**, 9–17.
7. Позняков В.Д., Дядін В.П., Давидов Є.О., Дмитрієнко Р.І. (2021) Оцінка пошкодженості суцільнозварних поздовжніх головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро. *Автоматичне зварювання*, **7**, 33–41. <https://doi.org/10.37434/as2021.07.06>

References

1. (1953) *Report on prefabrication of span structure elements of Kiev city bridge in Dnepropetrovsk on Molotov plant*. Kiev, PWI library [in Russian].
2. (1953) *Report on subject: Welding in site of span structures of Kiev city E.O.Paton bridge of AS Ukr.SSR across the Dniepr river*. Kiev [in Russian].
3. Lobanov, L.M., Kirian, V.I., Shumitsky, O.I. (2003) Fifty years of the E.O.Paton bridge. *The Paton Welding J.*, **10–11**, 12–20.
4. Shimanovskiy, O.V., Kotlubei, D.O., Shalinskyi, V.V. (2018) E.O. Paton bridge – state-of-the art and prospects. *Promyslove Budivnytstvo ta Inzhenerni Sporudy*, **1**, 2–9 [in Ukrainian].
5. Shimanovskiy, O.V., Kotlubei, D.O., Shalinskyi, V.V. (2018) Emergency situation on E.O.Paton bridge and measures for its solution. *Ibid.*, **4**, 30–33 [in Ukrainian].
6. Poznyakov, V.D., Dyadin, V.P., Davydov, Ye.O., Dmytrienko, R.I. (2021) Technical state of metal structures of main beams of the E.O. Paton bridge across the Dnipro river in Kiev. *Ibid.*, **1**, 9–17 [in Ukrainian].
7. Poznyakov, V.D., Dyadin, V.P., Davydov, Ye.O., Dmytrienko, R.I. (2021) Evaluation of damage of all-welded longitudinal main beams of the E.O. Paton bridge across the Dnipro river. *The Paton Welding J.*, **7**, 30–38. <https://doi.org/10.37434/as2021.07.06>

SELECTION OF NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS FOR EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF METAL STRUCTURES OF THE MAIN BEAMS OF E.O. PATON BRIDGE ACROSS THE DNIPRO IN KYIV

L.M. Lobanov, V.P. Dyadin, E.O. Davydov, V.A. Lytvynenko

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

The problem of selection of testing methods for assessment of the technical condition of the main longitudinal beams of the E.O. Paton Bridge was considered. Special features of the object of control and examination results are briefly described. A qualitative algorithm is proposed for examination of large-sized building metal structures. 7 Ref., 10 Fig.

Keywords: E.O. Paton Bridge, main beams, welded joint, corrosion, nondestructive testing, technical diagnostics, examination of metal structures, automatic and semiautomatic welding, welded joint damage

Надійшла до редакції 20.10.2021

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОНАННЯ ТА ПЕРЕВІРКИ ЯКОСТІ ГРАВІЮВАННЯ ПОВЕРХОНЬ МАТЕРІАЛІВ З ОСОБЛИВИМИ ОРГАНОЛЕПТИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОНТРАСТНИХ БАРВНИКІВ

В.В. Несін, О.С. Франков

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України.
03113, м. Київ, вул. Миколи Василенка, 3. E-mail: witnes@ukr.net

Розглянуто застосування трьох методів досліджень оптичної густини матеріалів: спостереження, денситометричний та спектрометричний. За допомогою метода спостереження досліджено органолептичні властивості матеріалів, що впливають на їх сприйняття спостерігачами та виконавцями механічної обробки. Проаналізовано особливості виконання обробки гравіюванням, процесу перевірки якості такої обробки та втирання контрастної фарби. Визначено, що технологічна розмітка, неглибоке гравіювання, шорсткість поверхні, афінний простір з точок, сформованих на поверхні механічною обробкою, дефекти типу полос, рисок, заглиблень та виступів розміром близько 0,1 мм в матеріалах з особливими органолептичними властивостями не сприймаються спостерігачами внаслідок прояву психофізіологічного закону Вебера-Фехтнера щодо зорового відчуття оптичної густини матеріалу в межах сприйняття видимого діапазону електромагнітних хвиль довжиною від 380 до 750 нм. Рекомендовано загальний вигляд та геометричні характеристики гравіюваних написів та символів, що виконуються на матеріалах з особливими органолептичними властивостями. Бібліогр. 17, рис. 4.

Ключові слова: органолептичні властивості матеріалів, вплив на оптичне сприйняття задіяного персоналу, гравіювання, поверхневі методи контролю, оптична густина, втирання контрастної фарби, технологічний маршрут обробки

Вступ. Гравіювання активно використовується в приладобудуванні. Воно дозволяє наносити на поверхні панелей виробів різноманітні написи та символи для заміни написів [1–4]. Таке гравіювання здійснюється спеціальним різцем, заточеним під певним кутом, найчастіше 60°. Висока кутова швидкість шпинделя на рівні 7000...11000 об/хв дозволяє здійснювати вибірку матеріалу на глибину 0,1...0,3 мм, а іноді й на більшу глибину, що залежить від висоти шрифту напису чи величини символу. Гравіювання застосовується до більшості конструкційних матеріалів, що використовуються в приладобудуванні.

Проблемним є застосування поверхневої механічної обробки, яким є гравіювання, та наступної перевірки якості виконаної операції в матеріалах з особливими органолептичними властивостями [5]. Такими матеріалами є різноманітні пластики, зокрема поліаміди.

В приладобудуванні поліамід знаходить все більшого застосування, замінюючи там, де це доцільно, металеві сплави, зменшуючи загальну вагу виробів. Актуальність такої заміни впливає з достатніх механічних характеристик, стійкості до дії вологого середовища, меншої, ніж у металевих сплавів, густини, гарних антифрикційних та електроізоляційних властивостей пластмас [6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Спостереження з використанням властивостей

людського зору є обов'язковим процесом контролю якості матеріалів та виробів. Воно застосовується в усіх методах руйнівного та неруйнівного контролю. Вимоги до стану зору кандидатів на атестацію та сертифікації в якості фахівців з контролю якості пред'являються в більшості відомих систем сертифікації персоналу [7–9].

Денситометричний метод дослідження прозорості матеріалів активно застосовується в рентгівському методі неруйнівного контролю якості. Оптична густина є властивістю матеріалу плівки та впливає на інтерпретацію результатів огляду внутрішньої структури досліджуваної деталі чи виробу. Застосовувалося таке дослідження як в системах сталої практики контролю, наприклад, по відміненому для обов'язкового застосування в Україні ГОСТ 7512-82 [10], так і по ДСТУ EN ISO 5579:2014 [11].

Застосування спектрометра із подвійним монохроматором і кремнієвим детектором при вивченні структури та оптичних властивості прозорих електропровідних плівок описано в [12].

Метою роботи є дослідження шляхів упередження впливу особливих органолептичних характеристик деяких полімерних матеріалів, зокрема поліамідів, на здатність основного виробничого та контрольного персоналу виконувати свої професійні функції та розробка науково обґрунтованих технологічних рекомендацій

для корекції маршрутів малосерійної механічної обробки та перевірки якості виготовленої з таких матеріалів продукції.

Виклад основного матеріалу. Особливими органолептичними характеристиками, про які йде мова, є ефект неправильного сприйняття поверхневого рельєфу предметів з певних матеріалів спостерігачами [5, 13]. Через прозорість таких матеріалів в межах малих товщин поверхневі виступи та впадини сприймаються оком спостерігача непевно (рис. 1). Поліамід блочний білий, як приклад матеріалу з особливими органолептичними характеристиками, в тонких шарах є прозорим для електромагнітного випромінювання видимого діапазону.

У дослідженні використовувався метод спостереження, що здійснювався в умовах, рекомендованих для візуального контролю. Рівень освітленості не менше 500 люкс створювався комбінацією природного та штучного освітлення загальними та місцевими джерелами світлового випромінювання в діапазоні 380...750 нм.

Певне збільшення товщини матеріалу викликає розсіювання світла. Прозорість поступово замінюється помутнінням. Зі збільшенням товщини додається молочний відтінок. Наявність молочного відтінку залежить від партії матеріалу та тривалості його зберігання після виготовлення. Зрештою, білий блочний поліамід товщиною від 0,3 мм стабільно сприймається спостерігачем шматком матеріалу білого кольору з можливим молочним жовтуватим відтінком.

Прозорість тонких шарів призводить до унеможливлення сприйняття персоналом, задіяним в технологічних операціях, таких поверхневих дефектів, як подряпини, тріщини, інші незначні нерівності рельєфу поверхні та афінний простір з точок, сформованих на поверхні механічною обробкою, що виходять за межі шорсткості. Розмітка на поверхні матеріалу з описаними властивостями не сприймається зором. Гравіювання глибиною 0,1 мм також не сприймається оком людини в зазначених матеріалах за нормальних умов спостереження внаслідок прояву психофізіологічного закону Вебера–Фехтнера щодо зорового відчуття оптичної густини матеріалу в межах сприйняття видимого діапазону електромагнітних хвиль довжиною 380...750 нм.

Момент врізання гравіювального різця в поверхню матеріалу важко помітити внаслідок

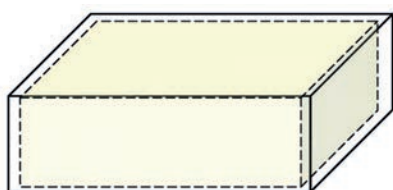


Рис. 1. Схема умовної заготовки з поліаміду ПА6 марки Б з виділеною штрихом зоною непрозорості матеріалу для видимого світла

прозорості тонких поверхневих шарів білого блочного поліаміду. Досягання потрібної глибини обробки та виконання напису можуть бути порушеними. На схемі, представленій на рис. 2, виділяються ділянки: 0-I – прозорий прошарок; 0-II – мало прозорий прошарок білого (іноді жовтуватого молочного) кольору; 0-III – прошарок з розсіяним світлом та набутим стабільним розсіяним білим кольором.

Виконані механічним гравіюванням поверхневі елементи з цієї ж причини мало помітні виконавцям (рис. 3, ліворуч). Важко роздивитись та оцінити якість такого маркування без внесеної фарби. Натомість всі характерні елементи гравіюваних символів і написів з контрастним барвником доступні для одночасної перевірки якості та процедур гравіювання і втирання фарби (рис. 3, праворуч).

Поліамід інших кольорів має схожі органолептичні характеристики [6]. Відмінність полягає лише в наявності основного тону кольору замість білого з молочним відтінком, який дозволяє віднести його до того чи іншого кольору спектру видимого випромінювання.

Аналогічна ситуація до білого блочного поліаміду спостерігається зі сприйняттям органолептичних характеристик поверхні виробів з білого фторопласта.

Гравіювання символів та написів виконується конічними заглибленнями на поверхнях виробів з метою втирання контрастної фарби (рис. 4). Фарба, як правило алкідна пентафталієва емаль, в рідкому стані капілярною силою розташовується в гравіюваних заглибленнях і утримуються там до висихання [14–16]. Висушені емалі в гравіюванні тримаються, відповідно до характеристик фарби, не менше 1 року.

Послідовність технологічних операцій передбачає виконання візуального огляду заготовок і після механічного гравіювання, і після втирання фарби. Чіткість, доступність та зрозуміла видима

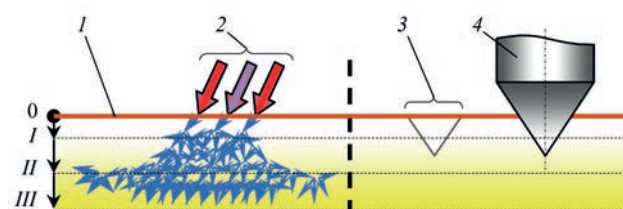


Рис. 2 – Схема розповсюдження видимого світла в поліаміді блочному та формування напису гравіюванням: 1 – поверхня виробу; 2 – видиме світло та його розповсюдження в матеріалі; 3 – переріз символу в матеріалі; 4 – гравіювальний різець



Рис. 3. Загальний вигляд гравіювання (ліворуч) та символу з емаллю (праворуч)

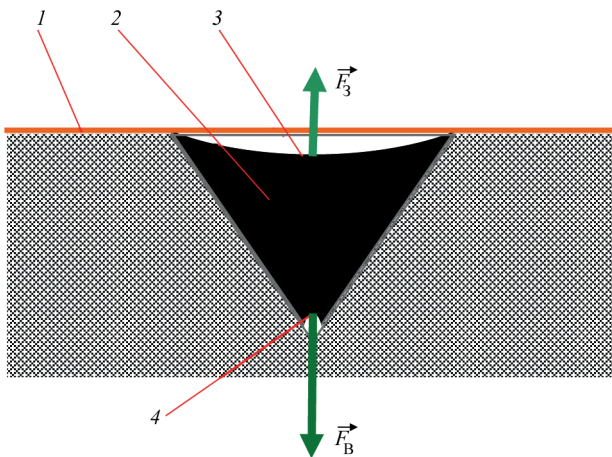


Рис. 4. Схема дії капілярних сил на фарбу в гравійованих заглибленнях: 1 – поверхня виробу з матеріалу з особливими органолептичними властивостями; 2 – гравійоване заглиблення із внесеною контрастною фарбою; 3 – зовнішній меніск фарби та сила F_3 , що витягує фарбу за межі заглиблення; 4 – внутрішній меніск фарби та сила $F_в$, що утримує фарбу

ідентифікація символів користувачами виробів є основними вимогами, які висуваються до гравійованих символів і написів. Виконати огляд після гравійовання та перевірити якість виконаної роботи за характерними ознаками через описані органолептичні властивості зазначених матеріалів неможливо.

Контрастна фарба, внесена в поверхневі заглиблення, дозволяє чітко побачити, сприйняти, зрозуміти спостерігачами інформацію, що подається на панелях виробів символами та написами. Втерта фарба дозволяє також перевірити геометрію механічного гравійовання поверхні заготовки [17].

Фактично операція втирання контрастної емалі чи іншого виду фарби, будучи окремою операцією, стає складовою контрольною операцією гравійовання. Візуальний контроль доповнюється елементарними діями капілярного контролю. Функцію проникаючої рідини виконує контрастна фарба. Якість втирання фарби перевіряється за стандартною процедурою.

Висновки

Подальші дослідження матеріалів з особливими органолептичними характеристиками потребують розробки моделей плоских зразків. Візуальне спостереження таких матеріалів можна доповнити дослідженнями прозорості із застосуванням денситометра.

Враховуючи наведенні в роботі припущення та обґрунтування, для досягнення практичного ефекту пропонується наступна послідовність операцій гравійовання та втирання фарби: стандартний маршрут технологічних операцій «гравійовання–контроль–втирання–контроль» замінити послідовністю «гравійовання–втирання–контроль».

Список літератури

1. ISO 7000. *Graphical symbols for use on equipment – Index and synopsis*.
2. ДСТУ ГОСТ 25874:2008. *Аппаратура радиоэлектронная, электронная и электротехническая. Условные функциональные обозначения*.
3. ОСТ 4.270.001-84. *Приборы электронные измерительные. Условные графические обозначения для замены надписей*.
4. Несін В.В. (2016) Нестандартні символи для заміни написів в приладобудуванні: розробка, виконання гравіруванням та контроль якості. *Збірка тез доповідей IX науково-практичної конференції «Погляд у майбутнє приладобудування», 17–18 квітня 2016 р.*, Київ. ПФФ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 64.
5. Підпригора Ю.А., Франков О.С., Несін В.В. (2019) Особливості неруйнівного контролю гравірованих символів на деталях з білого блочного поліаміду. *Збірка тез доповідей XVIII міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 15–16 травня 2019 р. м. Київ*. ПФФ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 155–156.
6. Полиамид. <https://aplast.com.ua/poliamid>.
7. ДСТУ EN ISO 9712:2014 (UA ISO 9712:2012, IDT; ISO 9712:2012, IDT). *Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу з неруйнівного контролю*.
8. НПАОП 0.00-1.63-13. *Правила сертифікації фахівців з неруйнівного контролю*. Затверджені наказом МНС України 10.12.2012 р. № 1387, зареєстровані в Мін'юсті України 02.01.2013 р. за № 10/22542, введені в дію з 05.02.2013 р.
9. СТТУ УТНКТД 01-2000. *Система сертифікації персоналу з неруйнівного контролю. Основні положення*. Чинний з 12.10.2000 р. Київ, УТНКТД.
10. ГОСТ 7512. *Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод*.
11. ДСТУ EN ISO 5579:2014. *Неруйнівний контроль. Радіографічний контроль металевих матеріалів із застосуванням плівки та рентген та гамма випромінювання. Основні правила*.
12. Готра З.Ю., Тейт Дж., Кікінеші Р. та ін. (2007) Структура та оптичні властивості прозорих електропровідних плівок на основі ВаCuTeF. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка: Електроніка», 592*, 13–17.
13. Франков О.С., Несін В.В., Шабетя С.А. та ін. (2019) Органолептичні властивості поліаміду блочного та спосіб зменшення їх впливу на суб'єктивні можливості оператора при механічній обробці деталей. *Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»*. Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 207–208.
14. Яковлев А.Д., Яковлев С.А. (2016) *Лакокрасочные покрытия функционального назначения*. СПб, Химиздат.
15. Каміньський Ю. (2020) *Емалева фарба ПФ-115 – технічні характеристики, склад, застосування*. <https://isu.org.ua>.
16. Емаль алкідна ПФ-115. <https://farbex.ua>.
17. Несін В.В., Підпригора Ю.А., Франков О.С. (2021) Зміна технології маркування полюсів на неконтрастних бокових поверхнях колодок блоку живлення виробу «Радіус-Е» з білого блочного поліаміду. *Рационалізаторська пропозиція 91 ІСТЕ СБУ, подана 08.02.2021 р., визнана 02.03.2021 р., свідоцтво від 12.04.2021 р.*

References

1. ISO 7000. *Graphical symbols for use on equipment – Index and synopsis*.
2. DSTU GOST 25874:2008: *Radioelectronic, electronic and electrotechnical equipment. Conventional functional designations* [in Russian].
3. OST 4.270.001-84: *Electronic instruments. Reference graphic symbols for legend replacement* [in Russian].
4. Nesin, V.V. (2016) Nonstandard symbols for legend replacement in instrument engineering: Development, engraving and quality control. In: *Abstr. of Papers of 9th Sci.-Pract. Conf. on Future Outlook of Instrument Engineering* (Kyiv, 17-18 April, 2016), NTUU Igor Sikorsky KPI, 64 [in Ukrainian].
5. Pidoprygora, Yu.A., Frankov, O.S., Nesin, V.V. (2019) Features of non-destructive control of engraved symbols on parts from white block polyamide In: *Abstr. of Papers of 9th Sci.-Pract. Conf. on Instrument Engineering: State-of-the-art*

- and Prospects (15-16 May, 2019), NTUU Igor Sikorsky KPI, 155–156 [in Ukrainian].
6. Polyamide. <https://aplast.com.ua/poliamid> [in Russian].
 7. DSTU EN ISO 9712:2014 (UA ISO 9712:2012, IDT; ISO 9712:2012, IDT). *Non-destructive testing. Qualification and certification of NDT* [in Ukrainian].
 8. NPAOP 0.00-1.63-13. *Rules of certification of personnel of non-destructive testing. Approved by the order of the Ministry of Emergencies of Ukraine on 10.12.2012 No.1387, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 02.01.2013 on No. 10/22542, entered into force on 05.02.2013* [in Ukrainian].
 9. STTU USNDT 01-2000. *System of certification of non-destructive testing personnel. Basic provisions*. Valid from 12.10.2000. Kyiv, USNDT [in Ukrainian].
 10. GOST 7512. *Non-destructive testing. Welded joints. Radiographic method*. [in Russian].
 11. DSTU EN ISO 5579:2014. *Non-destructive testing. Radiographic testing of metallic materials using film and X- or gamma rays. Basic rules* [in Ukrainian].
 12. Gotra, Z.Yu., Teit, J., Kikineshi, R. et al. (2007) Structure and optical properties of transparent conducting films based on BaCuTeF. *Visnyk NU Lvivska Politehnika: Elektronika*, **592**, 13–17 [in Ukrainian].
 13. Frankov, O.S., Nesin, V.V., Shabetia, S.A. (2019) Organoleptic properties of block polyamide and decrease of their influence on subjective possibilities of operator in mechanical treatment of parts. In: *Proc. of Int. Sci.-Tech. Conf. on New Materials and Technologies in Mechanical Engineering*. Kyiv, NTUU Igor Sikorsky KPI, 207–208.
 14. Yakovlev, A.D., Yakovlev, S.A. (2016) *Paint-and-lacquer coatings of functional purpose*. St.-Petersburg, KhIMIZDAT [in Russian].
 15. Kaminskyi, Yu. (2020) *Enamel paint PF-115: Technical characteristics, composition, application* [in Ukrainian]. <https://isu.org.ua>
 16. *Alkyd enamel PF-115* [in Ukrainian]. <https://farbex.ua>.
 17. Nesin, V.V., Pidoprygora, Yu.A., Frankov, O.S. (2021) *Change of technology of pole marking on low-contrast side surfaces of block power supply sockets of “Radius-E” product from white polyamide*. Innovative proposal 91 ISTE SBU, submitted on 08.02.2021, recognized on 02.03.2021, certificate dated 12.04.2021 [in Ukrainian].

INVESTIGATIONS OF ENGRAVING TECHNOLOGY AND CHECKING THE QUALITY OF ENGRAVING THE SURFACES OF MATERIALS WITH SPECIAL ORGANOLEPTIC PROPERTIES WITH APPLICATION OF CONTRASTING DYES

V.V. Nesin, O.S. Frankov

Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine.

3 Mikoly Vasylenska, 03113, Kyiv. E-mail: witnes@ukr.net

Application of three methods of investigation of optical density of materials, namely observation, densitometric and spectrometric is considered. Observation method was used to study the organoleptic properties of characteristic materials, which influence their perception by observers and machining operators. Features of engraving performance, procedure of checking the quality of such processing, and rubbing in contrast paint, were analyzed. It is determined that the technological marking, shallow engraving, surface roughness, affine space made up by points, formed on the surface by machining, defects of the type of bands, lines, depressions and protrusions of approximately 0.1 mm size in materials with special organoleptic properties are not perceived by observers, as a result of manifestation of psychophysiological Weber – Fechner law as to visual perception of optical density of the material within the visible range of perception of electromagnetic waves of 380 – 750 nm length. The general appearance and geometrical characteristics of engraved inscriptions and symbols, made on materials with special organoleptic properties, are recommended. 17 Ref., 4 Fig.

Keywords: organoleptic properties of materials, influence on optical perception of involved personnel, engraving, surface control methods, optical density rubbing in contrasting paint, technological processing route

Надійшла до редакції 07.12.2021

Календар міжнародних конференцій та виставок 2022

16.08 – 17.08 Subang Jaya, Malaysia – postponed	The 6 th Malaysia International NDT Conference and Exhibition	Malaysian Society for Non-Destructive Testing (MSNT)
16.08 – 18.08 Zurich, Switzerland	NDT-CE 2022 - International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering	SVTI
12.09 – 16.09 Одеса, Україна	XI Міжнародна конференція «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах»	ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, MAC
12.09 – 16.09 Одеса, Україна	III Міжнародна конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану»	ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, MAC
13.09 – 16.09 Ljubljana, Slovenia	35 th European Conference on Acoustic Emission Testing & 10 th International Conference on Acoustic Emission Testing	University of Ljubljana
20.09 – 21.09 Dortmund, Germany	Fachseminar Dichtheitsprüfung und Lecksuche	DGZfP
26.09 – 26.09 Berlin, Germany	Seminar NDT in Railway	DGZfP
24.10 – 26.10 Berlin, Germany – postponed	International Conference on NDE 4.0	DGZfP
07.11 – 08.11 Singapore	Singapore International NDT Conference & Exhibition	NDTSS
15.11 – 18.11 Київ, Україна	XXI Міжнародний Промисловий Форум	Міжнародний виставковий центр

Продовження. Початок дивись на стор. 46

ГЕНЕРАЛЬНА АСАМБЛЕЯ МІЖНАРОДНОЇ АКАДЕМІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

23-24 жовтня 2021 р. у м. Бреція (Італія) відбулася Генеральна асамблея Міжнародної академії неруйнівного контролю (ACADEMIA NDT International), в якій взяли участь 33 учасники з 18 країн світу. Засідання проходили в Центрі Павла VI (Centro Paolo VI) у гібридній формі, коли частина учасників використовувала послуги віддаленого конференц-зв'язку.

Крім діючих членів Академії були запрошені кандидати, які на цій сесії були затверджені в якості нових членів, а саме: Девід Аллейн (David Alleyne) з Імперіал Коледж Лондон (Imperial College London), Олена Ясунієне (Elena Jasiuniene) з Каунаського Університету технологій (Kaunas University of Technology, Литва), Трібікрам Кунду (Tribikram Kundu) з університету Арізони (University of Arizona, USA), Анне-Франсуаза Обатон (Anne-Françoise Obaton) з Французького національного метрологічного інституту (French National Metrology Institute, Paris), Пол Панетта (Paul Panetta) з державного університету Айови (Iowa State University, USA), Роберт Рукер (Robert Rucker) з Мічиганського університету (University of Michigan, USA), Норітака Юза (Noritaka Yusa) з Японії, який представляє університет Тохоку



Учасники конференції у віддаленому конференц-зв'язку



Президент Міжнародної академії НК Д. Нардоні та А.-Ф. Обатон під час вручення їй диплому діючого члена Академії



Новообрані президент Петер Трампс і віце-президент Серж Дос-Сантос біля Центру Павла VI (Бреція)

(Tohoku University) і Реза Зоугі (Reza Zoughi). Від України брали участь Михайло Казакевич і Валентин Учанін (ФМІ ім. Г.В. Карпенка, Львів).

Згідно з традицією нові члени Академії виступили з науковими доповідями, серед яких найцікавішими були наступні (мовою оригіналу):

- Microwave and Millimeter Wave NDE – Tale of A Journey (Reza Zoughi);
- Hybrid NDT for Complex Aerospace Structures (E. Jasiuniene);
- LNE activities on additive manufacturing and non-destructive testing methods (A.-F. Obaton);
- Probabilistic analysis of NDT signals for modeling the uncertainty of NDT&E (N. Yusa).

Під час Генеральної асамблеї згідно з демократичними традиціями та за ініціативи її засновника і першого президента Джузеппе Нардоні (Giuseppe Nardoni) пройшла ротація керівного складу. Новим президентом Академії обрано Петера Трампуса (Peter Trampus), який відомий як колишній президент Європейської федерації НК. Петер відвідував Україну під час 6-ї Міжнародної конференції «Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity», яка пройшла в 2019 р. у Львові під егідою Європейського товариства з цілісності конструкцій (ESIS), де він є головою комітету № 17 з неруйнівного контролю. Він також пов'язаний з Україною як член редакційної колегії журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів», який видається Фізико-механічним інститутом НАН України.

Віце-президентами Академії стали Шант Кендеріан (Shant Kenderian) з The Aerospace Corporation (США) та Серж Дос Сантос (Serge Dos Santos) з Institut National des Sciences Appliquées Centre Val de Loire (Франція). Генеральним секретарем обрано Адріану Савін (Adriana Savin) з університету м. Ясси (Румунія). Членами Ради обрано також Зденека Преворовскі (Zdenek Prevorsevsky) з Праги, Девіда Гілберта (David Gilbert) – головного редактора журналу «INSIGHT» (Великобританія) і Уве Еверта (Uwe Ewert) з Німеччини.

Приємно зазначити, що Адріана Савін нещодавно стала членом редакційної колегії нашого журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Під час Генеральної асамблеї було також затверджено основні напрямки роботи Академії на наступні роки, організацію спеціальних наукових сесій Академії на Світовій і Європейській конференціях з НК, координацію зусиль з затвердження нових навчальних програм та термін проведення наступної Генеральної асамблеї, яку заплановано провести в жовтні наступного року в Будапешті.

Валентин Учанін
ФМІ ім. Г.В. Карпенка, Львів

XX МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

Мета Промислового Форуму – підтримка та розвиток промисловості України!

З 16 по 19 листопада 2021 р. у Києві в Міжнародному виставковому центрі в умовах ковід-пандемії та пов'язаних з цим обмежень був успішно проведений ювілейний XX Міжнародний Промисловий Форум, який вкотре продемонстрував свій високий статус, підтверджений масштабом та популярністю серед учасників та відвідувачів. Число учасників, у тому числі дебютантів виставок, акцент на українському виробнику, різноманітність представленого обладнання, нові технологічні рішення, унікальні розробки, тематичні конференції зробили форум ефектним, наповненим, цікавим та результативним. В роботі Форуму взяли участь 232 компанії та організації з України та 30 – з-за кордону на площі 15000 м². За чотири дні роботи біля 9000 відвідувачів змогли ознайомитись з останніми досягненнями, розгорнутими на виставках Форуму: Металообробка, Гідравліка, Пневматика, УкрЗварювання, Автоматизація та робототехніка, Підйомно-транспортне та складське обладнання, УкрЛиття, Безпека виробництва.

МЕТАЛООБРОБКА. 110 компаній учасників розділу «Металообробка» знайомили відвідувачів Форуму з найновішим та універсальним металообробним обладнанням, інструментами та технологіями. Стенди зі Швейцарії, Туреччини та Чехії цього року містили значну кількість зразків обладнання. Лідери з продажу промислових лазерних комплексів АРАМІС, АЛІСТА, СТАН-КОМПЛЕКТ, ЕЛЬ-СЕЛ, ЮА-СТАЛЬ, МАШИНТЕХ представили на Форумі новітні лазерні технології для різання металу та зварювання. На своїх стендах компанії продемонстрували роботу цього обладнання у дії. Листозгинальні преси, ножиці, гільйотини та машину лазерного розкрою металу всесвітньо відомого бренду BAYKAL демонстрував офіційний представник в Україні – Галсофт Сервіс. Лідер нанотехнологій в електроіскровій обробці металу ТМ SODICK (Японія) був представлений на Форумі компанією СОДИКОМ-ДНІПРО.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТОТЕХНІКА.

Впровадження роботизованих систем у виробничий процес – показник високого рівня розвитку компанії, її готовності відкривати для себе нові напрями та вступати в епоху Індустрії 4.0. Кооперація з такою компанією – це завжди прибутково та перспективно. На експозиції було представлено сучасні рішення для автоматизації підприємств, систем управління технологічними процесами та об'єктів промисловості загалом. Гості спостерігали за маніпуляціями роботів ТМ: ABB, CROBOT, KAWASAKI ROBOTICS, ROVICOR, FANUC, KUKA, PANASONIC, MOTOMAN, знайомилися з найсучаснішими технологіями та матеріалами, інноваційними рішеннями для зварювання, плазмового розкрою металу, обробки поверхні та суміжних технологій. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ САПР, ІНВЕСТИЦІЇ та ЗРОСТАННЯ, АППАУ, СОФТПРОМ СОЛЮШНЗ не лише презентували свої напрацювання на стендах, а й ділилися ними на відкритих конференц-майданчиках. Близько 20 доповідей було присвячено темі «Індустрія 4.0».

ЗВАРЮВАННЯ. Виставка «УкрЗварювання» продемонструвала сучасну продукцію цього напрямку з широким спектром обладнання та технологій для зварювання, різання, обробки поверхні, нанесення захисних покриттів. На стендах учасників – компаній MAGMAWELD, БІНЦЕЛЬ УКРАЇНА ГМБХ, ДЖЕЙСІК УКРАЇНА, ІДЕЛЬ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, КОРСАЛ, ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ, САММІТ, TESLA WELD, TRIADA-WELDING відвідувачі знайомилися з новинками в лінійці продукції. Вперше участь у виставці взяла компанія WELDMAN OÜ (Естонія). Відвідувачам пропонували товари та послуги для диджиталізації зварювального виробництва у рамках Індустрії 4.0. На стенді ІЕЗ ім. Є.О. Патона було представлено обладнання для зварювання труб різного сортаменту дугою, що обертається в





Демонстрація технології зварювання труб дугою, що обертається у магнітному полі, на стенді ІЕЗ ім. С.О. Патона

магнітному полі, яке зацікавило багатьох відвідувачів виставки, та фахові науково-технічні журнали «Автоматичне зварювання», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», «Сучасна електрометалургія».

Вітчизняні виробники представили такі напрямки:

- ВІТАПОЛІС, ДНІПРОМЕТИЗ, ТМ.ВЕЛТЕК – матеріали власного виробництва для зварювання, наплавлення та напилення;
- АНДІС-ТЕХНО, ДОНМЕТ, ТЕСЛА, ПРОМ-ТЕХГРУП, ФАВОРИТ-АМ – порталні машини для термічного розкрою металу;
- АТОН СЕРВІС, ФАБРИКА РУКАВНИХ ФІЛЬТРІВ – комплексні вирішення питань аспірації та промислової вентиляції.

Всі дні проведення Форуму відвідувачі спостерігали за зварювальними роботами від провідних світових виробників: ABB, CROBOTR, FANUC, KUKA, OTC DAIHEN, PANASONIC, YASKAWA MOTOMAN.

ЛИТТЯ. Цьогорічна виставка «УкрЛиття» була значно розширена. Провідні компанії в галузі ливарного виробництва презентували повний пакет послуг у своїй сфері. Яскраво заявив про себе дебютант виставки – УКРФАВОРИТ, ексклюзивний



Стенд компанії «ВІТАПОЛІС»



Стенд компанії «ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ»

представник EUROTEK FOUNDRY PRODUCTS LTD в Україні (компанія-лідер серед постачальників високоефективних матеріалів та інженерних рішень для організації та функціонування ливарного виробництва в Україні). INDEMAK презентувала свою компанію з виробництва плавильних індукційних печей та супутнього обладнання до них.

ДІЛОВА ПРОГРАМА. Ділову програму виставок склали 29 різнопланових заходів. Відмітимо деяких з них.

Конференція керівників та спеціалістів ливарної галузі України «Ливарне виробництво – основна заготівельна галузь базових галузей промисловості».

Товариство зварників України провело XV відкритий конкурс зварників «Золотий кубок Бенардоса–2021». Ця яскрава, жива, динамічна подія покликана підвищити престиж професії зварювальника з особливим духом змагання та почесними кубками переможцям. Учасники здобули емоції, нагороди, мотивацію рухатися далі до наступних перемог!

Конкурс проходив за трьома номінаціями:

- ручне дугове зварювання покритим електродом;
- дугове зварювання плавким електродом в активних газах;
- дугове зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах.

У конкурсі взяли участь 25 зварювальників з десяти підприємств та двох навчальних закладів з



Переможці XV відкритого конкурсу зварників «Золотий кубок Бенардоса–2021»



Доповідь О.В. Павлія, ТОВ «НВФ Діагностичні прилади» восьми областей України. У їх числі: Полтавський ГЗК та Єристовський ГЗК (м. Горишні Плавні, Полтавська обл.), УМБР «Укргазспецбудмонтаж» (м. Красноград, Харківська обл.), «МК «АЗОВСТАЛЬ» (м. Маріуполь, Донецька обл.), «Хансавест Юкрейн» (м. Львів), ДП «МТП «Южний» (м. Южне, Одеська обл.), «Лемтранс» і КВПУ (м. Кам'янське, Дніпропетровська обл.), «Хансавокер» (Київська обл.), ВПУ (м. Кременчук, Полтавська обл.), Попаснянський ВРЗ (м. Попасна, Луганська обл.).

Конкурс традиційно проводився в два тури.

Тур I – теоретичний. Конкурсантам було запропоновано відповісти на 30 тестових питань. Ці питання наведені на сайті Одеського ТЗУ (tzu.od.ua/test/) і зварювальники завжди мають можливість перевірити свої знання та відповідно підготуватися до конкурсу W01. Положення зварних швів у всіх номінаціях визначалось шляхом жеребкування з усіх можливих положень.

Тур II – практичний. Для кожної номінації оргкомітетом були підготовлені окремі завдання зі зварювання зразків із матеріалів групи сталей.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України на відкритому майданчику провів конференцію з актуальних проблем зварювання та неруйнівного контролю:

- «Метод акустичної емісії для моніторингу відповідальних конструкцій» (М.А. Яременко, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ);
- «Гібридні технології зварювання» (В.Ю. Хаскін, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ);
- «Актуальні методи неруйнівного контролю зварних з'єднань» (О.В. Павлій, ТОВ «НВФ Діагностичні прилади», Київ);
- «Адитивне виготовлення та зварювання виробів з пластмас» (М.В. Юрженко, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ);



Стенд Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики



Стенд компанії «Новотест»

• «Оптичні методи діагностики відповідальних конструкцій та виробів» (В.В. Савицький, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ).

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ. Традиційно Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики проводить в рамках Форуму науково-технічний семінар з питань неруйнівного контролю в промисловості, але цього разу, з огляду на чергову хвилю коронавірусної хвороби і турботу про здоров'я потенційних учасників, ця традиція була порушена і семінар було перенесено.

В той же час Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики було представлене окремим стендом у виставковій залі, на якій також працювали стенди компаній НВФ «Ультракон», НВФ «Діагностичні прилади» і «Новотест».

ВДЯЧНІСТЬ. Окрему подяку висловлюємо всім медіа-партнерам Міжнародного Промислового Форуму – ключовим провідникам між виробником та споживачем! Рухаємось далі до нових перемог та чекаємо всіх на Міжнародному Промисловому Форумі-2022!

За матеріалами пост-релізу ТОВ «МВЦ»



Міжгалузовий учбово-атестаційний центр
Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України



Програми професійної підготовки на 2022 р.

Шифр курсу	Найменування програми		Тривалість	Строки проведення	
1. Підвищення кваліфікації інженерно-технічних працівників					
101	Підтвердження професійної компетентності координаторів (керівників) зварювальних робіт згідно ДСТУ ISO 14731 «Координація зварювальних робіт. Завдання і функції»		сертифікація	3 тижня (112 г)	березень, жовтень
102			ресертифікація	24 г	травень, липень, листопад
103	Розширення області сертифікації координаторів (керівників) зварювальних робіт		6 г	жовтень	
106	Технічне керівництво зварювальними роботами при ремонті діючих трубопроводів (під тиском)		підготовка і атестація	2 тижня (72 г)	за узгодженням з замовником
107			переатестація	22 г	
109	Технічне керівництво роботами по контактному стиковому зварюванню залізничних рейок.		72 г	лютий-грудень	
111	Підготовка і атестація голів комісій з атестації зварників - експертів Українського атестаційного комітету зварників (УАКЗ)		3 тижня (112 г)	квітень, грудень	
112	Розширення області атестації голів комісій з атестації зварників – експертів УАКЗ (згідно НПАОП 0.00-1.16-96)		8 г	травень, грудень	
1121	Розширення повноважень експертів УАКЗ на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г	червень	
1122	Розширення повноважень експертів УАКЗ на право атестації зварників пластмас згідно ДСТУ EN 13067		72 г	травень	
113	Підготовка і атестація членів комісій по атестації зварників:	фахівців технологічних служб, відповідальних за організацію атестації зварників	2 тижня (72 г)	по мірі комплектування груп	
114		фахівців служб технічного контролю, відповідальних за контроль зварних з'єднань (включаючи спеціальну підготовку до атестації по візуально-оптичному методу контролю)	2 тижня (74 г)		
115		фахівців служб охорони праці підприємств	2 тижня (74 г)		
116	Розширення області атестації членів комісій по атестації зварників – фахівців технологічних служб по зварюванню (згідно НПАОП 0.00-1.16-96)		6 г	травень	
117	Розширення повноважень членів комісій по атестації зварників – фахівців технологічних служб по зварюванню на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г	по мірі комплектування груп	
118	Розширення повноважень членів комісій по атестації зварників – фахівців з технічного контролю на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		24 г		
119	Підтвердження повноважень (переатестація) голів комісій з атестації зварників - експертів УАКЗ з розширенням повноважень на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г	січень, березень, травень, жовтень, листопад	
120	Підтвердження повноважень (переатестація) членів комісій по атестації зварників:	фахівців технологічних служб по зварюванню з розширенням повноважень на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1	32 г	січень, березень, травень, жовтень	
121		фахівців з технічного контролю	16 г	лютий, травень, липень, жовтень	
122		фахівців з технічного контролю (включаючи спец. підготовку до атестації по візуально-оптичному методу контролю)	36 г		
123		фахівців з охорони праці	16 г		
130	Перепідготовка фахівців зварювального виробництва по програмах Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) із присвоєнням кваліфікації:	Міжнародний інженер із зварювання	453/ 128 г ¹	квітень, листопад	
132		Міжнародний технолог із зварювання	372/91 г ¹		
134		Міжнародний спеціаліст із зварювання	248/60 г ¹		
135		Міжнародний практик із зварювання	114 г		
136		Міжнародний дизайнер (конструктор) із зварювання	40 г	за узгодженням з МІЗ	
137		Міжнародний інспектор із зварювання	повного рівня		230 г
140			стандартного рівня		170 г
139			базового рівня		115 г
149			фахівців, які мають кваліфікацію «Міжнародний інженер / технолог із зварювання»		76/78 г
141	Металографічні дослідження металів і зварних з'єднань		спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (72 г)	липень
142			переатестація	22 г	квітень, липень, вересень
143	Фізико-механічні випробування матеріалів і зварних з'єднань		спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (72 г)	по мірі комплектування груп
144			переатестація	20 г	
145	Емісійний спектральний аналіз (стилоскопіювання) металів і сплавів		спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (74 г)	
146			переатестація	22 г	
151	Виробництво зварювальних матеріалів: організація, технології і системи управління якістю		2 тижня (72 г)	за узгодженням з замовником	

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

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

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

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

Курсова підготовка ЗВАРНИКІВ:

301	ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	9 тижнів (356 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
302	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	5 тижнів (192 г)	
304	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	7 тижнів (276 г)	
306	автоматичного дугового зварювання під флюсом / в захисних газах	3 тижня (112 г)	
308	контактного (пресового) зварювання рейок з атестацією відповідно ДСТУ EN 14732	3 тижня (112 г)	
309	пластмас (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб) з атестацією відповідно до ДСТУ EN 13067	5 тижнів (196 г)	

Підготовка зварників по програмах Міжнародного інституту зварювання із присвоєнням кваліфікації:

310	Міжнародний зварник кутових швів (IFW) з атестацією по EN ISO 9606-1	130 – 210 г ²	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
312	Міжнародний зварник плоских з'єднань (IPW) з атестацією по EN ISO 9606-1	250 – 380 г ²	
315	Міжнародний зварник труб (ITW) з атестацією по EN ISO 9606-1	360 - 510 г ²	
318	Міжнародний практик-зварник (IWP) з атестацією по EN ISO 9606-1	35 - 153 г ²	

Перепідготовка ЗВАРНИКІВ із присвоєнням кваліфікації «Міжнародний зварник»: (IFW, IPW, ITW)

321	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г ²	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
322	перепідготовка зварників механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г ²	
323	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г ²	

Підвищення кваліфікації ЗВАРНИКІВ:

330	ручного дугового зварювання покритими електродами	2 тижня (72 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
331	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах	2 тижня (72 г)	
333	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG)	2 тижня (72 г)	
334	механізованого дугового зварювання порошковим дротом	2 тижня (72 г)	

Курсова підготовка контролерів неруйнівного контролю:

343	Спеціалізація – візуально-оптичний контроль	72/196 г ³	індивідуальна підготовка за узгодженням з замовником
344	Спеціалізація – радіографічний контроль	72/196 г ³	
345	Спеціалізація – ультразвуковий контроль	72/196 г ³	
346	Спеціалізація – магнітопорошковий контроль	72/196 г ³	
347	Спеціалізація – капілярний контроль	72/196 г ³	

4. Атестація персоналу зварювального виробництва

400	Атестація координаторів (керівників) зварювальних робіт відповідно до ДСТУ ISO 14731	8 г	проводиться по закінченні курсів 101-109
401	Спеціальна підготовка і атестація зварників відповідно до НПАОП 0.00-1.16-96 і стандартів ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5, ДСТУ ISO14732	72 г	постійно
402	Додаткова і позачергова атестація зварників згідно з НПАОП 0.00-1.16-96	24 г	
403	Періодична атестація зварників відповідно до НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5	32 г	
405	Спеціальна підготовка і атестація зварників авіаційної промисловості відповідно до ДСТУ ISO 9606-1,2,3,4,5	72 г	

406	Періодична атестація зварників відповідно до міжнародного (європейського) стандарту EN ISO 9606-1		24 г	постійно
407	Спеціальна підготовка і атестація операторів автоматичного зварювання плавленням відповідно до стандарту ДСТУ ISO 14732		72 г	
411	Спеціальна підготовка і атестація зварників на допуск до виконання зварювальних робіт при ремонті діючих магістральних трубопроводів (під тиском)		3 тижня (112 г)	за узгодженням з замовником
412	Періодична атестація зварників на допуск до виконання зварювальних робіт при ремонті діючих магістральних трубопроводів (під тиском)		32 г	
413	Періодична атестація операторів-зварників контактної-стикового зварювання рейок відповідно до ДСТУ ISO 14732 і СОУ 35.2-00017584-030-1:2009 (проводиться по закінченню курсу 308)		32 г	
414	Атестація зварників пластмас відповідно до ДСТУ EN 13067 (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб)			проводиться по закінченню курсу 309
415	Періодична атестація зварників пластмас (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб) відповідно до ДСТУ EN 13067		32 г	щокварталу
421	Спеціальна підготовка дефектоскопістів до сертифікації згідно ДСТУ EN 9712	ультразвуковий контроль	32/36 / 64 (I рів) г ⁴	індивідуальна підготовка за узгодженням з замовником
423			40/48 / 72/80 /144 (II рів) г ⁴	
427		радіографічний контроль	36/40 72 (I рів) г ⁴	
430			40/48 / 76/80 / 152 (II рів) г ⁴	
433		візуально-оптичний контроль	16/20 / 30 (I рів) г ⁴	
436			20/24 / 35/40 / 70 (II рів) г ⁴	
448	Переатестація операторів-зварників контактної-стикового зварювання рейок відповідно до вимог ДСТУ ISO 14732 і СОУ 35.2-00017584-030-1:2009		32 г	лютий

5. Тренінги, тестування і підтвердження кваліфікації

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

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

² - Тривалість навчання залежить від спеціалізації.

³ - Тривалість програми визначається за результатами вхідного тестування.

⁴ - Тривалість навчання вказується в направленні ОСП (орган по сертифікації персоналу).

⁵ - Тривалість програми залежить від умов і характеру випробувань.

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

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

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/rwj
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

ДАТИ, ПОДІЇ, ФАКТИ З ІСТОРІЇ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

1 жовтня 1934 р. Президія АН УРСР затвердила директором Інституту електрозварювання Євгена Оскаровича Патона (1870–1953 рр.). Для визнання зварювання як надійного технологічного процесу знадобились комплексні дослідження механіки зварних конструкцій, металургійних процесів і металознавства зварювання, фізики дугового розряду. Необхідно було створити апаратуру, матеріали і нові технології зварювання та випробування. Саме для цих цілей і був створений перший в світовій практиці інститут, що в наступні роки зайняв лідируючі позиції в розвитку зварювальної науки і техніки.



1 жовтня 1948 р. почалась експлуатація газопроводу Дашава-Київ. Будівництво трубопроводу розпочалося в 1946 р. і вже за два роки він був готовий до транспортування природного газу. Загальна протяжність – 509,6 км, діаметр труби – 500 мм, пропускна здатність – 1,5 млн м³ за добу. В цьому ж 1948 р. природний газ із цієї труби отримав і Тернопіль. Цей день можна вважати днем народження теперішнього «Укртрансгазу». В 1951 р. газопровід був продовжений з Києва через Брянськ до Москви.



3-7 жовтня 1926 р. в Празі відбувся Перший український науковий з'їзд – форум українських науковців в екзилі. Голова оргкомітету з'їзду – академік Іван Горбачевський. З'їзд розпочав роботу в Геологічному інституті Праги в присутності українських і чеських учених та представників емігрантських організацій у Чехії. Робота з'їзду відбувалась у 4 секціях: історично-філологічній; права і суспільних наук; природничій; технічно-математичній. Загалом відбулись 41 засідання та обговорення 154 доповідей. Робота секцій проходила у стінах Карлового університету.



11 жовтня 1928 р. дирижабль «Граф Цепелін LZ 127» вирушив у свій перший міжконтинентальний рейс із Фрідріхсгафена. Через 111 годин він був у США. Свою назву отримав на честь німецького піонера дирижаблів жорсткої системи графа Цепеліна. LZ 127 мав найщасливішу долю з усіх побудованих за всю історію повітроплавання півтора жорстких дирижаблів. За дев'ять років експлуатації «Граф Цепелін» провів у повітрі близько 17 200 годин, виконав 590 польотів в різні країни світу, подолав майже 1,7 млн. км, перевіз 13 110 пасажирів і близько 70 т вантажів і пошти, при цьому 143 рази перетнув Атлантичний океан і 1 раз – Тихий. Однією з проблем таких дирижаблів є підтримання герметичності оболонки.



14 жовтня 1948 р. відбувся перший історії авіації надзвуковий політ. Його виконав пілот Чарльз Єгер на експериментальному літаку «Белл Х-1» з рідинним реактивним двигуном, якими оснащувались бомбардувальники «Боїнг В-29», і досяг швидкості 2600 км/год. Планер літака був виконаний з високоміцного алюмінію, паливні баки були зварені зі сталі. Зварювання також застосовували для виготовлення деталей планера. Виготовлення літака супроводжувалось численними операціями випробувань, неруйнівного контролю та контролю герметичності.



15 жовтня 1964 р. відбулася офіційна церемонія запуску нафтопроводу «Дружба». Він збудований для транспортування нафти з Росії в країни Європи. Загальна довжина – близько 5200 км. Маршрут нафтопроводу проходить від Альмет'євська через Самару, Брянськ (Росія) до Мозиря (Білорусь), де розгалужується на дві гілки: північну (через Білорусь, Польщу та Німеччину) і південну (через Україну, Чехію, Словаччину й Угорщину). Будівництво трубопроводів супроводжується великим обсягом робіт зі зварювання та технічного контролю.



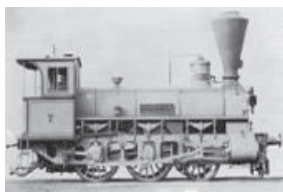
22 жовтня 1967 р. під час проведення Всесвітньої виставки відвідувачі могли познайомитися з найбільшим у світі просто неба геодезичним куполом, діаметром 76 м та 62 м заввишки, відомим як Монреальська біосфера. Купол побудований з використанням приблизно 65000 частин, у тому числі 13 км екструдованих алюмінієвих трубок, зварених у шестикутники. У ньому немає жодних внутрішніх опор і вся 80-тонна конструкція лежить на п'яти заповнених бетоном пілонах. 5 червня 1995 р. там було відкрито музей Біосфера, який присвяченим водній екосистемі.



Редакція журналу буде вдячна читачам за доповнення до дат, подій та фактів з НК



25 жовтня 2007 р. розпочато експлуатацію авіалайнера A380 – широкофюзеляжного двопалубного пасажирського літака, найбільшого серійного авіалайнера у світі. За словами працівників, найскладнішим завданням при створенні літака стала проблема зниження його маси. Місткість – 525 пасажирів у салонах трьох класів, 853 пасажери в однокласовій конфігурації. Для зниження маси літака використовувались прогресивні технології зварювання та покращені алюмінієві сплави. На нижніх панелях фюзеляжу застосовано лазерне зварювання стрингерів та обшивки, що суттєво знизило кількість кріплень. У виробництві літаків застосовано велику кількість випробувальних та контрольних операцій.



4 листопада 1861 р. до Львова прибув перший поїзд з Кракова (через Перемишль) по новозбудованій Галицькій залізниці ім. Карла Людвіга. Зі Львова залізницю продовжили до Бродів (1869 р.). З Красного було прокладено відгалуження до Золочева, Зборова, Тернополя і Підволочиська (1871 р.). У південному напрямку залізниця вела з Кракова до Цешина і далі до Угорщини. Відтинок залізниці від кордону до Львова вважається першою на території України залізницею. Паровози Галицької залізниці закуплялись впродовж 1858-1884 рр. на паровозобудівних підприємствах Німеччини і Австро-Угорщини.



6 листопада 1960 р. у Києві пущено першу чергу метрополітену – ділянка Святошино-Броварської лінії від станції «Вокзальна» до станції «Дніпро». Одночасно було запущено перше депо для технічного огляду і ремонту. Депо розташовувалося у невеликому будинку, поблизу від наземного вестибюля станції «Дніпро», і було розраховано на два вагони. Згодом були створені технічні служби дефектоскопії рельсового шляху, рухомого складу та ескалаторів.



13 листопада 1927 р. було відкрито Тунель Голланда – перший у світі підводний подвійний автомобільний тунель під річкою Гудзон, що з'єднує Нью-Йорк з Джерсі-Сіті. Тунель був побудований в 1920–1927 рр. за проектом Кліффорда Голланда. Тунель отримав ім'я Голланда після його смерті, що сталася до завершення будівництва. Це один із найстаріших тунелів з механічною вентиляцією – 84 вентилятори забезпечують обмін повітря в тунелі кожні 90 с. У 1982 р. Тунель Голланда був визнаний національним історичним пам'ятником цивільної і механічної інженерії, а у 1993 р. – національним історичним пам'ятником.



14 листопада 1918 р. гетьман Павло Скоропадський підписав Закон про заснування Української Академії наук. Затверджений закон ухвалював статут Академії, визначав її структуру та організацію, процедуру прийняття рішень, обговорював бюджет. Складався з 9 статей. Набув чинності 27 листопада 1918 р. Першим президентом обрано академіка Володимира Вернадського – українського та російського науковця, природознавця, засновника геохімії, біогеохімії та радіогеології, вчення про біосферу, ноосферу, космізм. Згодом розпочалось формування установ Академії наук.



17 листопада 1869 р. в Єгипті офіційно відкрили Суецький судноплавний канал, який з'єднує Середземне й Червоне моря та дозволяє сполучення між Європою й Азією максимально коротким шляхом, замість обходу Африки або перевезення вантажів сушею. Він проходить між Порт-Саїдом на півночі й Суецом на півдні. Початкова довжина каналу становила 162,5 км, а його глибина – 8 м. Станом на 2010 р. довжина Суецького каналу становила 193,30 км, глибина – 24 м та ширина – 205 м. Це найбільший завантажений міжнародний морський судноплавний коридор у світі. Канал не має шлюзів: морська вода вільно прямує каналом у Велике Гірке озеро з Червоного моря та водночас замінює випаровану воду. Підтримка такого каналу в робочому стані вимагає щоденної роботи технічних служб.



18 листопада 1987 р. зійшли з конвеєра перші серійні «Таврії» ЗАЗ-1102 передньопривідні автомобілі із кузовом типу хетчбек, які вироблялися на Запорізькому автомобілебудівному заводі у 1988–1997 рр. Під час підготовки автомобіля було отримано та впроваджено в життя 26 авторських свідоцтв. За весь час виробництва автомобілі сімейства ЗАЗ-110х вироблялися в десятках конфігурацій. Використовувалося кілька двигунів об'ємом від 1,1 до 1,3 літра (карбюраторні й інжекторні), різні інтер'єри, праворульні варіанти, варіанти з вакуумним підсилювачем гальм і без нього, кілька варіантів з кузовом «фургон» і т. д. Двигуни були виробництва Мелітопольського моторного заводу

20 листопада 1996 р. у бік Марса запущено «Delta II Heavy» – ракету другого покоління ракет-носіїв сімейства «Дельта». Розроблено та сконструйовано авіабудівною компанією «McDonnell Douglas». Ракети другого покоління називались «тяжкими», оскільки застосовувались для доставки на орбіту важких вантажів. Застосування зварювання тертям з перемішуванням зробило шви і стики ракети легше, тому конструкція вийшла міцною і витримувала величезні навантаження під час польоту. Паливні баки ракет контролюють на герметичність різними методами.



23 листопада 1903 р. народився Олександр Івченко (помер 1 липня 1968 р.), український авіаконструктор, академік АН УРСР, керівник розробки поршневих, турбореактивних двигунів для багатьох типів літаків. З 1945 р. конструкторське бюро, яке очолював Олександр Івченко, створило двигуни до літаків Ту-95, Ту-114, Ан-8, Ан-10, Ан-12, Ан-24, Іл-18, Як-40 та двигуни вертольотів. Конструкторське бюро переросло у провідне підприємство України – АТ «Мотор Січ». Відділ технічного контролю підприємства використовує в своїй роботі методи та засоби дефектоскопії та течошукування.



27 листопада 1918 р. народився Борис Євгенович Патон (помер в 2020 р.) – видатний український вчений у галузі зварювання, металургії та матеріалознавства. Видатний громадський діяч та талановитий організатор науки, академік Національної академії наук України, Академії наук СРСР, Президент НАН України, Міжнародної асоціації академії наук, директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, заслужений діяч науки та техніки УРСР, лауреат Ленінської та Державних премій СРСР та України, двічі Герой Соціалістичної Праці, Герой України. Разом зі своїм батьком, Євгеном Оскаровичем Патonom, створив всесвітньо відому патонівську науково-інженерну школу.



29 листопада 2016 р. на Чорнобильській АЕС було встановлено новий захисний конфайнмент над зруйнованим блоком, він став найбільшою на цей час рухомою спорудою в світі. В листопаді 2016 р. почалося насування арки над четвертим енергоблоком ЧАЕС. Швидкість насування склала 10 м/год, а тривав процес близько двох тижнів. За рік після його встановлення, незважаючи на продовження будівництва, рівень радіації поблизу арки знизився в 10 разів. 10 липня 2019 р. конфайнмент було введено в експлуатацію. Проектний термін його експлуатації складає 100 років. На спорудженні нового саркофага працював великий загін дефектоскопістів.



5 грудня 2014 р. успішно стартував космічний корабель «Оріон», який прийшов на зміну космічним човникам «Space Shuttle». Примітним при цьому корабля є застосування зварювання тертям з перемішуванням. Інженери «Marshall Space Flight Center» НАСА розробили інноваційний інструмент для зварювання тертям із перемішуванням. Крім космонавтики, нова технологія використовується у виробництві корпусів кораблів, вагонів, крил і фюзеляжів літаків, викликавши необхідність створення нових способів та засобів неруйнівного контролю.



6–7 грудня 1994 р. в одній з аудиторій корпусу 20 Київського політехнічного інституту проведена перша в Україні виставка засобів неруйнівного контролю. Організаторами виставки були кафедра «Прилади і системи неруйнівного контролю» КПІ (проф. С.М. Масєвський) та НВФ «Ультракон» (В.І. Павлій, І.В. Павлій). На виставці були продемонстровані засоби ультразвукового, магнітного, вихрострумowego, капілярного контролю, товщинометрії, твердометрії, вібродіагностики тощо. Одночасно проведено семінар, де виступили розробники з Києва, Харкова, Дніпра, Донецька, Львова, Миколаєва і Сєверодонецька.

Кафедра ПСНК

УЛЬТРАКОН
Засоби Неруйнівного Контролю

10 грудня 1964 р. нобелівську премію з фізики була вручена Ч. Таунсону (США), Г. Басову (СРСР) та А.М. Прохорову (СРСР) за відкриття в 1954 р. нового принципу генерації та посилення світла – лазера. На основі цих робіт на початку 1960-х р. у США було створено перший оптичний квантовий генератор – лазер на рубіні, що використовується і в зварюванні. Лазер отримав свою назву за першими буквами англійської фрази – «Light-Amplification by Stimulated Emission of Radiation» («Посилення світла шляхом стимульованого випромінювання»). На сьогодні лазерна техніка широко використовується також і в технічному контролі.





11 грудня 1954 р. спущений на воду «Форрестол» – американський авіаносець, головний корабель свого типу. Це був перший авіаносець, спроектований у післявоєнний час, в якому було повністю враховано досвід, отриманий під час другої світової війни, а також враховано вимоги реактивної авіації. Під час будівництва кожного авіаносця типу «Форрестол» було витрачено близько 700 т зварювальних матеріалів, що стало рекордом використання таких матеріалів у суднобудуванні. Для технічного контролю широко використовувались рентгенівські апарати.



14 грудня 2004 р. відкритий віадук Мійо – найвищий транспортний міст у світі, що проходить над долиною річки Тарн поблизу міста Мійо в південній Франції. Авторами проекту моста є французький інженер Мішель Вірложе, відомий також проектом другого за довжиною вантового мосту у світі – міст Нормандія – і англійський архітектор Норман Фостер, що є також автором проектів аеропорту в Гонконзі та реставрації будівлі Рейхстагу в Берліні. Віадук складається з восьми пролітних сталевих конструкцій, що підтримуються сімома сталевими пілонами. Пролітна конструкція важить 36 000 тон. Загальна довжина мосту – 2460 м, ширина – 32 м, одна з його опор має висоту 341 метр – це трохи вище, ніж Ейфелева вежа.



15 грудня 1832 р. народився Гюстав Ейфель (помер 28 грудня 1923 р.) – французький архітектор та інженер з проектування металевих конструкцій. Ейфель побудував більш ніж 200 споруд: мости, віадук, вокзали, банки, школи, церкви, казино. Майже усі побудовані ним 36 мостів увійшли до підручників як приклади сміливих інженерних рішень. У січні 1887 р. Ейфель підписав контракт з урядом Франції та адміністрацією Парижу на будівництво металевої 300-метрової вежі на Марсовому полі до Всесвітньої виставки. Згодом вежа стала символом сучасної Франції і була названа на честь її конструктора. У 1900–1902 рр. за проектом Гюстава Ейфеля збудовано маяк на острові Джарилгач в Херсонській області. Ажурний металевий каркас маяка та його оснастка були виконані у Парижі.



17 грудня 1897 р. на Харківському паровозобудівному заводі збудували перший український паровоз (останній у Харкові випустили у 1968 р.). Підприємство засноване 1895 р. поруч із харківським Балашовським вокзалом як паровозобудівний завод і було одним із найбільших у Російській імперії та СРСР. Згодом стали випускати двигуни (з 1911 р.; зокрема, дизель-генератори), сільськогосподарську (1909 р.) та вугледобувну техніку (з 1922 р.; зокрема, рудникові електровози), трактори (1924 р.), тепловози, танки та тягачі (1927 р.). Нині ДП «Завод імені В.О. Малишева» пропонує і реалізує на зовнішньому ринку бронетехніку: основні бойові танки Т-84У «Оплот», бронетранспортери БТР-3 та БТР-4, здійснює модернізацію танків, випущених у колишньому СРСР – Т-54, Т-55, Т-62, Т-64, Т-72, Т-80; бронетранспортерів – БТР-60, БТР-70.



18 грудня 1959 р. було закладено перший у світі атомний підводний човен К-162 з титановим корпусом. Радянський атомний підводний човен другого покоління був найшвидшим у світі підводним човном, що досягав у підводному положенні швидкості понад 80 км/год (42 вузли). Зварювання титанових конструкцій доводилося проводити в середовищі аргону (було витрачено близько 1 млн. м3 аргону). Ці роботи вимагали ювелірної точності та хірургічної чистоти в процесі виконання робіт. Оскільки зварювались великі товщини, були створені надпотужні рентгенівські апарати.



21 грудня 1988 р. здійснив перший політ дослідний зразок найбільшого у світі діючого літака Ан-225 «Мрія», створеного київським КБ імені Антонова (головний конструктор В. І. Толмачов). Ан-225 був створений, перш за все, для потреб радянської космічної програми для транспортування вантажів, зокрема космічних кораблів багаторазового використання «Буран» і компонентів ракетної системи «Енергія». Літак може перевозити також великогабаритні вантажі іншого призначення, які можуть розміщуватись як у фюзеляжі, так і «на спині». 13 травня 1989 р. Ан-225 перевіз «Буран» з міста Жуковський у Байконур. Через місяць цю комбінацію літака та космічного човна було продемонстровано на Паризькому авіасалоні.



24 грудня 1993 р. в Києві на установчій конференції проголошено створення Української асоціації фахівців з неруйнівного контролю «ОКО». Головною метою її діяльності названо вирішення питань контролю якості продукції, оцінки технічного стану обладнання підприємств, а також забезпечення підприємств засобами контролю. Президентом обраний проф. І.П. Білокур. В наступні роки Асоціація «ОКО» була переформатована і об'єднала провідні підприємства України в розробці засобів неруйнівного контролю: ТОВ «Ультракон-Сервіс», ТОВ «Промприлад», ПрАТ УкрНДІНК. На сьогодні Асоціацію «ОКО» очолює Т.М. Луценко.