

Вихрострумовий дефектоскоп з автоматичним налаштуванням на заданий рівень чутливості

Призначення: безконтактне виявлення поверхневих дефектів (в тому числі втомного і корозійного походження, в різних конструкційних магнітних і немагнітних матеріалах за допомогою вихрострумового давача локального типу.

Основні технічні характеристики та переваги:

- Виявлення коротких тріщин довжиною більше 1 мм з глибиною більше 0,2 мм (залежно від вибраного типу давача), в тому числі через лакофарбове покриття товщиною до 0,5 мм.
- Нечутливість до впливу зміни зазору та нахилу давача відносно контрольованої поверхні під час сканування.
- Автоматичне налаштування.
- Можливість відстроювання від впливу краю.
- Зручна світлова і звукова сигналізація про наявність дефекту.

Особливості функціонування:

- В дефектоскопі реалізовано запатентовані способи реалізації режиму переривчастої генерації автогенератора.
- Інтелектуалізація процесів налаштування дозволяє збільшити достовірність виявлення дефектів за рахунок часткової заміни процедур, що виконуються оператором.

• На відміну від попередніх розробок має можливість автоматичного налаштування на попередньо визначений рівень чутливості, який висвітлюється додатковим індикатором.

• Має можливість контролювати з відлаштуванням від краю виробу, в тому числі зону заклепок.



Вихрострумовий контроль вузлів авіаційної техніки.

• Забезпечує можливість контролювати литво за допомогою спеціального давача.

Галузі застосування: авіація, космічне машинобудування, хімічна промисловість, нафто-газова галузь, машинобудування, енергетика тощо.

Стан розробки: виготовлено діючий зразок дефектоскопа, випробувано в умовах ДП «АНТОНОВ».

Пропозиції по співробітництву: Дефектоскоп та розроблені на його основі методики можуть знайти застосування на авіаремонтних підприємствах, енергогенеруючих компаніях тощо.

Прилад для безконтактного вимірювання механічних напружень у виробах із феромагнітних сталей

Призначення: безконтактне вимірювання залишкових і робочих напружень конструкцій із феромагнітних сталей.

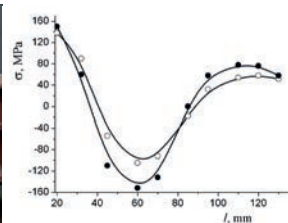
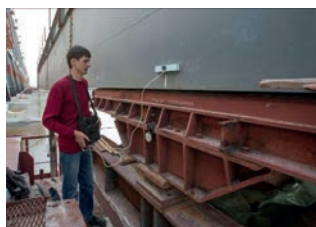
Основні технічні характеристики та переваги:

- Прилад дозволить вимірювати залишкові і робочі механічні напруження магнітоанізотропним методом.
- Робочі частоти збудження магнітоанізотропного вихрострумового давача від 1 до 50 кГц залежно від глибини контрольованої зони.
- На відміну від методу свердлення отворів є неруйнівним.
- На відміну від резистивного методу є безконтактним і мобільним.

Особливості функціонування:

- Магнітоанізотропний метод базується на застосуванні зворотного магнітострикційного ефекту.
- В розробці буде використано новий спосіб, що зменшує вплив гістерезису на результати вимірювання.
- прилад може бути використаний під час будівництва та експлуатації мостів, для визначення

залишкових напружень зварних швів, для контролю залишкових напружень залізничних рейок та коліс тощо.



Розподіл залишкових напружень в зоні кільцевих швів труб отриманий магнітоанізотропним методом (○) і методом свердлення отворів (●)

Стан розробки: створено експериментальні макети приладів і магнітоанізотропних перетворювачів, які випробувано під час насування пролітної будови моста методом насування.

Пропозиції по співробітництву: Прилад може знайти застосування в будівництві, на МК «Азовсталь», ДП «Укрзалізниця», трубопровідному транспорті, підприємствах нафто-газової галузі тощо.

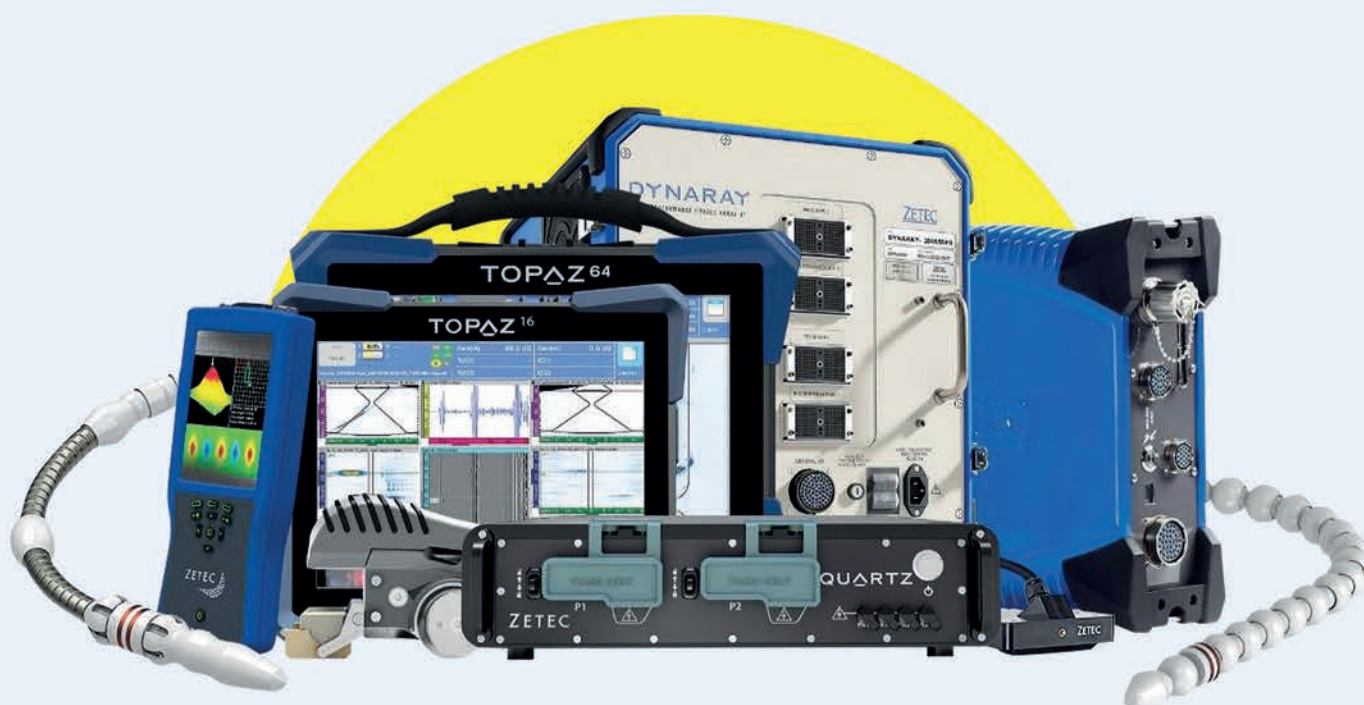


Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, вул. Наукова, 5
e-mail: vuchanin@gmail.com



рішення для лабораторій

ХЛР (ТОВ «ХІМЛАБОРРЕАКТИВ») – це комплексні рішення для галузевих лабораторій. Компанія покриває всі задачі по контролю якості в промисловій сфері. Маємо все необхідне для лабораторій нафтогазової галузі та енергетики, гірничо-металургійного комплексу і машинобудування, хімічної та будівельної галузей.



**Передові та безпечні рішення
для неруйнівного контролю**



вул. Січових Стрільців
(Щолківська), 8, Бровари,
Київська обл., 07400, Україна



тел./факс: (044) 494 42 42



sales@hlr.ua



www.hlr.ua

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

В.Л. Венгринович

Інститут прикладної фізики НАН Білорусі, Мінськ

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща

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

Г.І. Прокопенко

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова

НАН України, м. Київ

А.Г. Протасов, С.К. Фомічов

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

В.О. Сторожено

Харківський національний університет радіоелектроніки

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка

НАН України, м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і

природокористування України, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2021

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія: 960 грн. за річний комплект

з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 960 грн. за річний комплект

(випуски журналу надсилаються електронною поштою

у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера

передплатника надається доступ до архіву журналу).

За зміст рекламних матеріалів

редакція журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

Інтерв'ю з директором НВФ «Діагностичні прилади»
О. Павлієм 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ВЕРТИЙ О.О., УЧАНІН В.М. Тривимірна візуалізація
виявлених дефектів методами вихрострумової
обчислювальної томографії..... 7

**МІЛЕНІН О.С., ВЕЛИКОІВАНЕНКО О.А., РОЗИНКА Г.П.,
ПІВТОРАК Н.І.** Скінченно-елементні методи оцінки техніч-
ного стану великогабаритних конструкцій зі структурно
неоднорідних матеріалів (Огляд) 14

**ЛОБАНОВ Л.М., ТОРОП В.М., РАБКІНА М.Д.,
КОСТИН В.А., ШТОФЕЛЬ О.О.** Особливості руйнування
арматурних канатів захисних оболонок атомних електро-
станцій 20

**ЯВОРСЬКИЙ І.М., ЮЗЕФОВИЧ Р.М., ЛИЧАК О.В.,
ВАРИВОДА М.З., СТЕЦЬКО І.Г.** Методи та засоби ранньої
вібродіагностики підшипникових вузлів обертових механізмів.... 30

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

**ДЕМЕНЧУК Е.В., ШАЙДА В.П., ШИЛКОВА Л.В.,
ЮР'ЄВА О.Ю.** Дослідження впливу вищих гармонік
струму в мережі живлення на роботу асинхронних
двигунів з використанням приладів діагностики 38

КУЛІШ В.А., КРИЛОВ Е.С. Розробка єдиної галузевої
бази даних технічного стану вугільних шахтних копрів 46

ІНФОРМАЦІЯ

З історії розвитку технічної діагностики в Україні..... 52

Міжнародна конференція «Сучасні технології з'єднання
матеріалів» 57

Неруйнівний контроль зварних з'єднань 58

Сучасне застосування стандартів з НК 62

Пристрій «ВІК/ТВА-1» для швидкого і точного візуального
контролю протяжних металоконструкцій 65

Дати, події, факти з історії неруйнівного контролю 67

Видання журналу підтримують:

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,

Технічний комітет стандартизації «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» ТК-98

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

V.L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk

K. Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland

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

G.I. Prokopenko

G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics
of NAS of Ukraine, Kyiv

A.G. Protasov, S.K. Fomichov

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

V.O. Storozhenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

V.O. Stryzhalo

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

M.G. Chausov

National University of Life and Environmental Sciences
of Ukraine, Kyiv

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine,
International Association «Welding» (Publisher)

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.

Tel./Fax: +38 (044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration
of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2021

Subscription index 74475.

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

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

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

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

CONTENT

Interview with O. Pavliy, Director of Diagnostic Devices Company 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

VERTIY O.O., UCHANIN V.M. Three-dimensional visualization
of the detected defects by eddy current computing tomography 7

**MILENIN O.S., VELIKOIVANENKO O.A., ROZYNKA G.P.,
PIVTORAK N.I.** Finite element methods for assessment of
the technical condition of large-sized structures from structur-
ally heterogeneous materials (Review)..... 14

**LOBANOV L.M., TOROP V.M., RABKINA M.D., KOSTIN V.A.,
SHTOFEL O.O.** Features of the destruction of reinforcing
ropes in nuclear power plant containment 20

**YAVORSKIY I.M., YUZEFOVYCH R.M., LYCHAK O.V.,
VARYVODA M.Z., STETSKO I.H.** Methods and means of
early vibrodiagnostics of bearing units of rotary mechanisms..... 30

INDUSTRIAL

DEMENCHUK E.V., SHAIDA V.P., SHILKOVA L.V., YURIEVA O.Yu.
Diagnosis of induction motors by using the influence of higher
current harmonics 38

KULISH V.A., KRYLOV E.S. Development of unified industrial
database of the technical condition of coal mine headgear 46

INFORMATION

Excerpts from history of technical diagnostics in Ukraine 52

International conference «Modern technologies
of joining materials» 57

Non-destructive testing of welded joints 58

Modern application of NDT standards 62

VIK/TVA-1 device for fast and accurate visual inspection of
stretched metal structures 65

Dates, events, facts in the history of non-destructive testing 67

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

НВФ «ДІАГНОСТИЧНІ ПРИЛАДИ» – 25 РОКІВ ЖИТТЯ В НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ.

*Інтерв'ю з генеральним директором підприємства
Олександром Павлієм*

Сьогодні гостем журналу є Олександр В'ячеславович Павлій – директор Науково-виробничої фірми «Діагностичні прилади». Вже 25 років фірма поставляє на підприємства України сучасні технології, обладнання, прилади та матеріали для технічного контролю та діагностики. До складу фірми також входять випробувальна лабораторія та учбовий центр персоналу з неруйнівного контролю. Олександр Павлій відповів редакції журналу на ряд запитань.

Які на сьогодні основні напрямки роботи НВФ «Діагностичні прилади»? Підприємство сьогодні має декілька напрямків діяльності, враховуючи споріднені проекти. Традиційно головний та найстаріший напрямок – дистрибуція матеріалів і приладдя для різних методів неруйнівного контролю. Другий напрямок – поставки різноманітного обладнання НК та технологічних рішень. Стратегічними видами є сьогодні навчання і сертифікація персоналу та діяльність акредитованої лабораторії з неруйнівного контролю.

В чому, на Вашу думку, переваги Вашої фірми перед іншими учасниками ринку засобів технічного контролю? Всього час існування ми продовжуємо навчатись. Ми позиціонуємо себе як організація, що здатна запропонувати експертне рішення. Ми співпрацюємо з партнерами, які можуть запропонувати найкраще з можливого, що може вирішити задачі замовника. Ми продовжуємо підвищувати свої компетенції. І лабораторія, і навчальний центр сприяють цьому.

Чому, на Вашу думку, замовники вибирають саме НВФ «Діагностичні прилади»? З одного боку, ми розуміємося на неруйнівному контролі, з іншого, ми здатні запропонувати оптимальні умови клієнту для задоволення його потреб.

Чи маєте Ви постійних багаторічних замовників і з ким із них Ви плідно співпрацюєте? Нашими замовниками є велика кількість підприємств з різних галузей промисловості. Це – підприємства металургійної галузі, нафто-газового комплексу, але найцікавіші завдання ми вирішуємо в машинобудуванні та аерокосмічній галузі.

Ми знаємо, що у Вас було кілька дуже великих, знакових проектів. Що Ви можете про них розповісти? Так, кілька великих проектів ми реалізували для «Інтерпайп», «Південмаш», «Зоря-Машпроект», «Чорноморнафтогаз», «Мотор Січ». Це були



Павлій Олександр В'ячеславович

комплексні складні рішення для контролю різних типів виробів. Для нас, перш за все, це досвід і нові компетенції. Це можливість відкрити для себе нові знання, доступ до нових технологій, впровадження інноваційних методик контролю та вимірювань.

Ми просимо Вас подумки повернутись на багато років назад. Навчаючись на приладобудівному факультеті НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Ви для спеціалізації обрали кафедру «Прилади і системи неруйнівного контролю». Чому? Це чисто сімейна справа. Старший брат Ігор навчався на цій спеціальності, і вона здавалась мені досить перспективною, адже вона знаходилась на перехресті кількох напрямків знань, а саме: матеріалознавства, взаємодії фізичних полів різної природи з матеріалами, інформаційних технологій. Я отримав кваліфікацію інженера-фізика, що стало першою сходинкою в світ знань і технологій.

Після закінчення університету Ви могли обрати різні напрямки професійної діяльності. Чому Ви вирішили віддати свої сили і час створенню бізнесу? Це сталося не відразу. На час захисту дипломної роботи вже існував сімейний бізнес (він і сьогодні досить успішно функціонує, це НВФ



В.І. Павлій з синами Ігорем та Олександром

«Ультракон» (прим. ред.)). Я почав роботу в НВФ «Ультракон», яким керували мій батько В'ячеслав Іванович і брат Ігор В'ячеславович. Знать не вистачало, тому я вирішив отримати другу вищу освіту в Міжнародному університеті фінансів за фахом «Промисловий маркетинг». А вже потім батько далекоглядно запропонував реалізувати мої ідеї в окремому підприємстві. Так в 1996 році з'явилось підприємство «Діагностичні прилади».

Ми знаємо, що Вашою дипломною роботою була розробка вихрострумowego дефектоскопа. Потім цей прилад Ви виготовляли і пропонували замовникам. Яка доля цієї розробки? Не зовсім так. На четвертому курсі я дійсно працював над курсовою роботою з розробки вихрострумowego дефектоскопа з накладним перетворювачем під керівництвом Гліба Олексєєва та Юрія Куца. НВФ «Ультракон» до сих пір виробляє вихрострумові дефектоскопи. А ось у Міжнародному університеті фінансів темою моєї дипломної роботи був маркетинг серійних вихрострумових дефектоскопів.

Ви часто берете участь в роботі виставок та конференцій, самостійно організовуєте конференції, неодноразово були спонсором навіть національних конференцій, що проводить УТ НКТД. Що це Вам дає? Це досить хороше та об'ємне запитання. Виставки, з одного боку, це шлях до продаж, з іншого – це нові знання та просування ідей. Конференції – це наука та механізми керування змінами. Розуміючи важливе значення конференцій та виставок, НВФ «Діагностичні прилади», при можливості, допомагала в їх проведенні. Ми були генеральним спонсором двох Національних конференцій «Неруйнівний контроль і технічна діагностика» в 2012-у та 2016-у роках, які проводило УТ НКТД. Ще раніше ми допомагали проведенню конференцій в Криму, організовували тематичні конференції в різних містах України та Туреччини.

Україна, як асоційований член ЄС та країна, яка має договір про вільну торгівлю з Європейською співдружністю, взяла на себе зобов'язання привести свою нормативну базу (стандарти, регламенти) у відповідність до європейської. Один зі шляхів в цьому напрямку – готувати наших фахівців і підприємства в цілому до роботи за правилами, що діють в ЄС, навчати наших колег підходам, правилам, регламентам. Це ми і робимо на своїх профільних конференціях «Неруйнівний контроль в контексті договору про асоційоване членство України в ЄС», які ми проводили щороку в період 2017–2019 рр.

До речі, Ви були одним з організаторів першої в Україні виставки засобів технічного контролю в 1993 році. Тоді ця виставка помістилась в одній аудиторії КПП. Хто брав участь в цій виставці та що виставлялось? Так, тоді ми змогли зібрати досить цікаву експозицію, де були зраз-



Група співробітників на конференції з НК в Мюнхені. 2016 р.



Дискусія на конференції в Неленчуві. 2018 р. С. Щупак (ІЕЗ ім. Є.О. Патона), Т. Якубович, І. Якубович (НВФ «Діагностичні прилади»), В. Коваленко (ДП «Антонов»)



Стенд на Промисловому форумі, 2014 р. О. Козін (ліворуч), М. Юр'єв (праворуч)

ки приладів виробництва вітчизняних, тоді ще нечисленних, фірм, науково-дослідних інститутів, окремих ентузіастів. Нажаль, деякі зразки, що експонувались, не знайшли масового використання, та пам'ятають про них лише ентузіасти з історії технічного контролю.

Нещодавно в складі Вашої фірми була створена випробувальна лабораторія, акредитована НААУ. Чим це було викликано та які напрямки її роботи? Логіка розвитку промисловості в 21-у столітті вказує на зміну пріоритетів в бізнесі. Щоб залишатись конкурентоспроможним в сфері продажів, треба бути експертом в продукції та технології. Найпростіший шлях до експертності – це самому бути користувачем того продукту, який ти



Виконання робіт з радіографічного контролю вузлів авіаційного обладнання, 2021 р.



Роботи з дефектоскопії на авіасудні MD-08, 2021 р.



Рентгенографічний контроль трубопроводу, 2021 р.

пропонуєш клієнту. З іншого боку, ринок обладнання дуже виріс, купити дефектоскоп можна за малі гроші, а написати методику та проконтролювати шов або виріб – тут вже потрібні знання та досвід. Тому маємо лабораторію.

У Вас також працюють учбовий та екзаменаційний центри з підготовки фахівців з неруйнівного контролю. Розкажіть про них. Це теж впливає з попереднього питання. Навчання та сертифікація фахівців з неруйнівного контролю – це розвиток основного напрямку діяльності. Наші замовники мають можливість підготувати дефектоскопістів, що зможуть потім використовувати наше обладнання та матеріали. До речі, наш центр володіє мабуть найкращим парком навчальних зразків. Цим я опікуюсь особисто.

Ви створили професійний та дієздатний колектив однодумців. Що б Ви хотіли про нього розповісти? Перш за все, колектив – це велика цінність. Я дуже ціную моїх колег і дякую їм за те, що вони поділяють наші цінності. Я дякую тим, хто працює зараз, і тим, хто працював раніше та продовжив своє професійне зростання в інших компаніях.

Чи просто керувати колективом професіоналів? Це не легко, треба постійно працювати над собою.



Навчальний семінар із стандартизації, 2018 р. Доповідач — С. Щупак

Найкращий метод керування – це лідерство та постійне підвищення компетенції та знань. В сучасному світі модель «навчання протягом життя» стає одним з факторів виживання.

Кого і чому Ви вважаєте своїм учителем? Я в своєму житті зустрів декількох людей, кого сьогодні можу вважати своїми вчителями. Перш за все – це батьки, вони заклали ціннісний базис. Вже в дорослому віці я зустрів колег, набагато старших за себе, кого я вважаю своїми вчителями: в бізнесі – Каміл Ленартс, в науці – Олександр Скордев, в житті – Темурі Рігішвілі.

Вже працюючи директором, Ви навчались в бізнес-школах. Що це Вам дало? Підприємство існує вже 25 років без сторонньої допомоги. І це говорить само за себе.

Які книги з неруйнівного контролю Ви вважаєте найкращими? Книги американських авторів.

З якими труднощами в роботі Ви стикаєтесь і як шукаєте вихід? Якщо є стратегія, що спирається на цінності, всі складні питання можна вирішити.

В яких напрямках Ви плануєте розширювати свою діяльність? Будемо фокусуватись на компетенції компанії в окремих напрямках, де ми досяг-



Стенд на виставці «Зброя і безпека», 2017 р. С. Глабець, Д. Комаров



В лабораторії «МР-Хемі» вивчають дефектоскопічні матеріали Д. Комаров та Ю. Яременко



Радіографічний контроль лопатей гвинтокрила на АТ «МОТОРСІЧ», 2021 р.



Прийом лінії капілярної дефектоскопії для АТ «МОТОРСІЧ» на заводі виробника у Франції

ли певних успіхів. Є речі, які ми вміємо найкраще, це ми і будемо розвивати.

Як Ви оцінюєте сучасний стан засобів і технологій НК? Україна відстала у впровадженні сучасних методів років на двадцять.

За якими технологіями НК, на Вашу думку, майбутнє? Світ дуже швидко змінюється, з'являються нові сфери виробництва та галузі промисловості. В технології технічного контролю широко входять автоматизація та роботизація.



Демонстрація обладнання Olympus на конференції з НК, 2019 р.



Навчання співробітників Учбового центру, 2019 р. Лектор — доктор Олександр Скордєв



Ультразвуковий контроль виконує С. Глабець

Які компанії Ви б назвали лідерами на українському ринку засобів і технологій НК? Безумовно, серед вітчизняних виробників слід відзначити «Промприлад», «Ультракон», «Новотест». Імпортерів набагато більше, але це окрема тема.

Які журнали чи інтернет-ресурси в галузі НК, на Ваш погляд, є найкращі? Ресурси ASNT, NDT.NET, ТДНК.

Радіографія чи ультразвук — що краще? Радіографія!

Розмову провів Юрій Посипайко

ТРИВИМІРНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ВИЯВЛЕНИХ ДЕФЕКТІВ МЕТОДАМИ ВИХРОСТРУМОВОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТОМОГРАФІЇ

О.О. Вертій¹, В.М. Учанін²

¹Харківський національний університет радіоелектроніки, 61058, м. Харків, просп. Науки, 14.

E-mail: alexey.vertiy@gmail.com

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

E-mail: vuchanin@gmail.com

Комп'ютерна томографія, яка заснована на різних фізичних явищах, розглядається як ефективний метод для вирішення багатьох проблем НК в контексті революції NDE 4.0. Представлено принцип вихрострумової томографії та експериментальну установку для реконструкції томографічних зображень, пов'язаних з розподілом електропровідності матеріалу. Зони заклепок у вигляді з'єднання двох листів з алюмінієвого сплаву зі штучними дефектами типу тріщина довжиною 2 мм вибрано як приклад достатньо складної для контролю структури. Дослідження проводили із застосуванням двох типів вихрострумових перетворювачів (ВСП): перший – традиційний ВСП абсолютного типу із коаксіальними вимірювальною та генераторною обмотками, а другий – низькочастотний ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201. Отримано набір вертикальних (ортогональних до досліджуваної поверхні) перерізів для зони заклепки, які дозволили продемонструвати ефективність вихрострумової томографії. Горизонтальні перерізи аналізували для демонстрації можливості отримання томографічних зображень на різній глибині. Для реконструкції вертикальних томографічних перерізів із застосуванням ВСП подвійного диференціювання застосували двошарові структури, які склалися з верхньої обшивки товщиною 0...8 мм та нижньої обшивки товщиною 5 мм і дефектом типу тріщина. Останні результати демонструють високу глибину контролю із застосуванням ВСП подвійного диференціювання і можливість оцінювати розмір виявленого дефекту та його відстань від контрольованої поверхні. Бібліогр. 34, рис. 8.

Ключові слова: вихрострумова томографія, вихрострумовий перетворювач (ВСП), ВСП подвійного диференціювання, електропровідність, томографічні зображення, перерізи, зони заклепок

Четверта промислова революція поступово набуває реального змісту, свідченням чого є численні публікації [1, 2]. Вже працюють повністю автоматизовані заводи, побудовані на принципах Індустрії 4.0 з керуванням усіма процесами в реальному часі. В більшості промислово розвинутих країн діють відповідні державні програми. Нажаль, Україна поки ще дуже відстає від цього загальносвітового тренду, хоча і тут з'являються поодинокі лідери [3].

Очевидно, що прийдешня перебудова промисловості не омине необхідності формування нових підходів у неруйнівному контролі (НК) і світова НК спільнота вже активно дискутує на цю тему, проголошуючи формування четвертої революції в НК під аббревіатурою NDE 4.0 (Non-destructive Evaluation 4.0) [4, 5]. Огляд цих робіт не є метою даної статті. Зазначимо тільки, що одним із напрямків розвитку технологій НК 4.0 є автоматизація контрольних операцій (у тому числі на основі використання роботів) та інтелектуалізація засобів контролю. Зі стриманим оптимізмом зазначимо, що в цих напрямках вітчизняні спеціалісти з вихрострумового контролю (ВК) мають певні напрацювання [6–8]. Створено низку автоматизованих (в тому числі, роботизованих) систем

і розроблено нові підходи щодо обробки сигналів вихрострумових перетворювачів (ВСП) [6–9].

До технологій NDE 4.0 можна впевнено віднести методи НК, побудовані на томографічних принципах обробки і надання інформації. Найпоширеніші методи НК, які базуються на зондуванні об'єкта контролю (ОК) зовнішніми полями різної природи, поступово отримують томографічні реалізації.

Вперше математичні томографічні алгоритми були використані в рентгенівському діапазоні випромінювання, для якого характерний експоненціальний закон загасання. Рентгенівська комп'ютерна томографія (КТ) дозволяє реалізувати НК внутрішньої структури ОК багатократним рентгенівським просвічуванням у різних напрямках з наступною обробкою проєкційних даних і побудовою тривимірного розподілу ступеня загасання випромінювання. Вперше рентгенівську КТ для застосування в медицині винайшов англійський винахідник Годфрі Хаунсфілд, який у 1972 р. отримав відповідний патент [10], а вже у 1979 р. отримав разом з Аланом Кормаком Нобелівську премію з фізіології і медицини з формулюванням «За розробку комп'ютерної томографії». І вже як проєкція успіху медичної КТ виникла рентгенівська промислова томографія як метод НК. На теперішній час

рентгенівська КТ є найуживанішим методом томографічної побудови зображень внутрішньої структури в медицині і промисловому НК [11–14]. Цей поступ призвів то до того, що застосування рентгенівської КТ в НК з 2011 р. регулюється низкою міжнародних стандартів (EN 16016–1(2,3):2011).

Наступним томографічним «бастіоном» стали досягнення з ультразвукової КТ, де можна відзначити результати науковців Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ [15–18]. З часом настала черга електричних (резистивних) і електромагнітних (у тому числі, вихрострумів) методів [19–28]. Тут результати представників України, які отримано у Турецько-Українській міжнародній лабораторії високих технологій науково-дослідного центру «Мармара» (м. Гебзе, Туреччина), є пріоритетними. При цьому використовували теоретичні підходи, розвинуті раніше для діапазону НВЧ [20–22]. Важливо, що крім формулювання теоретичних засад отримано низку експериментальних результатів [19, 23–24], які показали, що практична реалізація підходів вихрострумової томографії (ВТ) дозволить піднести вихрострумівий метод НК на принципово новий рівень. Зазначимо, що закордонні дослідження з ВТ дотепер мають теоретичний характер і не вийшли на експериментальний рівень [28].

Метою цієї статті є презентація і узагальнення напрацювань з вихрострумової обчислювальної томографії. Зазначимо, що українська наукова спільнота НК з поданими результатами практично не знайома.

Принцип вихрострумової томографії. Відновлення розподілу питомої електропровідності (ПЕП) у будь-якому поперечному перерізі ОК базується на інтегральному рівнянні томографії [19–22]:

$$\frac{\hat{\psi}(v, y_1) \exp(i\gamma_1 y_1)}{c_1(v)} = \iint_S K(x', y') \exp[-2\pi i(\alpha x' + \beta y')] dx' dy', \quad (1)$$

де $\hat{\psi}(v, y_1)$ – Фур'є-перетворення комплексного розсіяного поля $\psi(x, y_1)$, яке вимірюється над поверхнею досліджуваного середовища на лінії сканування $y = y_1$; змінна v – просторова частота; $c_1[\gamma_1(v), \gamma_2(v)]$ – комплексна функція від v ; γ_1, γ_2 та β – комплексні функції від v у загальному випадку; α – дійсна функція від v ; $K(x', y')$ – невідомий (шуканий) нормований розподіл струму в області S (поперечний переріз ОК), що є джерелом розсіяного поля. Досліджувана область обмежена, тому інтеграл у рівнянні (1) можна розглядати в нескінченних границях. Тут приймається, що Фур'є-перетворення розсіяного поля існує, так як це поле розглядається в обмеженій області простору.

Розв'язок цього інтегрального рівняння дає можливість знайти функцію $K(x', y')$, що описує нормований розподіл струму у досліджуваному поперечному перерізі, перпендикулярному до поверхні металу, і який містить лінію сканування (вертикальний переріз). Функція $K(x', y')$ залежить від робочої частоти (частоти зондуючого електромагнітного поля). В томографії вимірювання та реконструкція функції $K(x', y')$ проводяться для певного набору робочих частот у заданому діапазоні. Функція томографічного зображення є модулем суми цих функцій. Вона дає можливість виявити неоднорідність ПЕП металу у вертикальному перерізі, у тому числі пов'язану з наявністю дефектів. Застосування томографічного алгоритму дозволяє отримати достатньо якісні зображення поперечних перерізів локальних (типу пор) і протяжних (типу тріщин) дефектів. Набір зображень у різних вертикальних (ортогональних відносно поверхні об'єкта контролю) перерізах дозволяє реконструювати тривимірне зображення досліджуваної зони ОК.

Експериментальна установка для автоматизованого контролю за принципом вихрострумової обчислювальної томографії. Експериментальна установка (рис. 1) складається з персонального комп'ютера 1, блоку вихрострумівого контролю 2 для визначення складових сигналу в діапазоні робочих частот, блоку керування 3 кроковими електродвигунами 4 і 7 сканування ВСП 6 по координатах X і Y , які є складовою двокоординатного сканувального пристрою 8, і досліджуваного зразка 5. Зовнішній вигляд установки з двокоординатним сканувальним пристроєм, встановленим на досліджуваній зразок, наведено на рис. 2.

Персональний комп'ютер керує роботою крокових електродвигунів двокоординатного сканувального пристрою і блоку ВК, реєструє і зберігає параметри (амплітуду і фазу) сигналів ВСП в дискретних точках вибраної зони контролю на шістнадцяти робочих частотах у вибраному діапазоні, проводить дискретизацію та обробку сигналів за розробленим томографічним алгоритмом і формує кольорову презентацію отриманих результатів, яка відтворює двовимірний розподіл ПЕП у вибраних перерізах ОК. Блок ВК працює як звичайний бага-

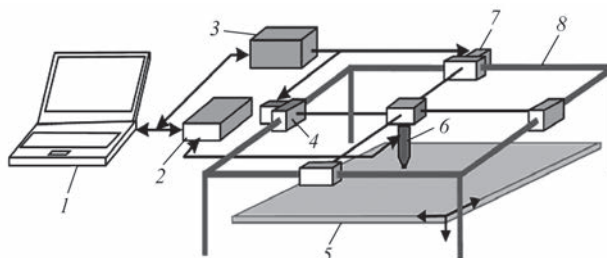


Рис. 1. Схема побудови експериментальної установки вихрострумової томографії

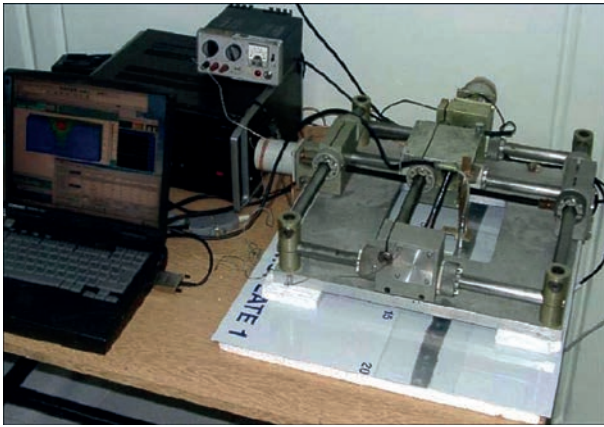


Рис. 2. Зовнішній вигляд експериментальної установки вихрострумової томографії

точастотний дефектоскоп, який оперує з ВСП різного типу (абсолютні, диференційні тощо). Його особливістю є швидке перемикання робочих частот, необхідне для реалізації томографічних алгоритмів, та покращена схема компенсації, яка дозволяє розширити динамічний діапазон під час обробки вихідних сигналів ВСП. На томографічних реконструйованих зображеннях однорідну область ОК відтворювали синім кольором, зону аномалії (дефекту) – червоним, а перехідні зони – зеленим.

Для експериментальних досліджень використано два різні типи ВСП. Перший – традиційний ВСП абсолютного типу фірми Nortec, який складався з двох (генераторної і вимірювальної) коаксіальних обмоток. Особливості ВСП цього типу подано в огляді [29], а особливості просторового розподілу сигналу ВСП від тріщин різної довжини аналізували в роботі [30]. Інший, низькочастотний ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201, розроблено у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАНУ [31]. ВСП подвійного диференціювання складається з двох включених послідовно і розташованих поруч обмоток збудження і двох диференційно включених вимірювальних обмоток. Вимірювальні обмотки розта-

шовано в нейтральній площині, в якій електромагнітне поле обмоток збудження має протилежний напрямок, через що сумарне електромагнітне поле обох обмоток відсутнє, а вихрові струми навпаки складаються. Для локального дефекту такий ВСП має чотири зони чутливості. Видовжені дефекти створюють «квазіабсолютний» сигнал з максимальною амплітудою безпосередньо над дефектом, як у звичайних ВСП абсолютного типу. Особливістю цього ВСП є велика глибина контролю, що відзначалось у низці публікацій [31, 32].

Томографічна візуалізація дефектів в зоні заклепок. Заклепки є найуживанішим елементом багатшарових авіаційних конструкцій, які використовують для з'єднання сполучених обшивок, підсилювальних пластин, стрингерів тощо. В той же час заклепкові шви авіаційних конструкцій створюють найбільшу кількість концентраторів напружень і тому вимагають підвищеної уваги під час експлуатації. Слід зазначити, що під час виявлення дефектів в зоні заклепок необхідно позбутися сильного впливу самої заклепки, яка по суті також є допустимим, згідно конструкції, дефектом великого розміру і яка створює додаткові сигнали завад. Тому задача виявлення втомних тріщин (особливо внутрішніх), що утворюються в процесі експлуатації в зоні заклепок, є реальним викликом для розробників засобів ВК і практиків. Тим не менше, в наших роботах показано, що на основі вихрострумового методу можна створити низку безальтернативних технологій НК заклепкових вузлів, особливо коли необхідно виявляти втомні тріщини у внутрішніх шарах або під головкою заклепки [33, 34]. В нашому експерименті зона заклепки з дефектом вибрана з метою показати можливості ВТ у складних випадках.

Для досліджень використано фрагмент авіаційної двошарової обшивки із алюмінієвого сплаву, ПЕП якого дорівнює 35,4 МСм/м, з рядами заклепок зі штучними дефектами типу тріщина, виконаними електроерозійним методом. Товщина кожного

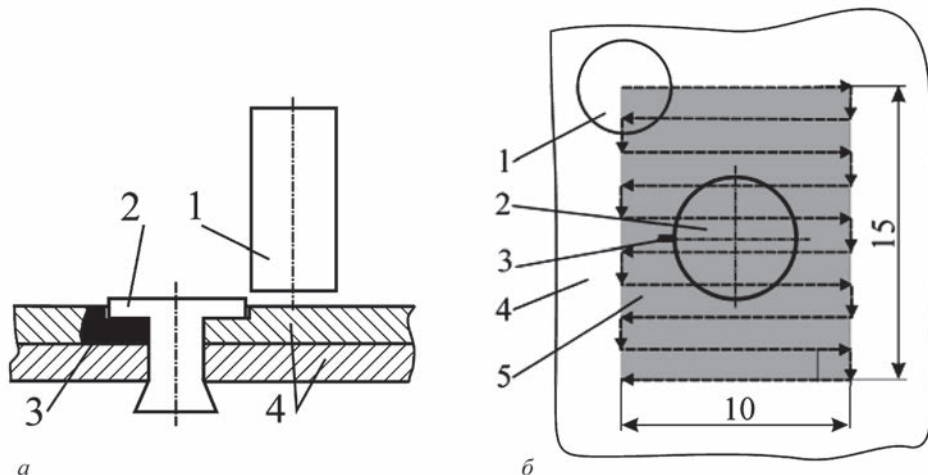


Рис. 3. Схема сканування зони заклепок: 1 – ВСП; 2 – заклепка; 3 – дефект; 4 – двошарова конструкція; 5 – ділянка сканування

шару конструкції складала 2,5 мм. Діаметр головки заклепки 6 мм, а заклепкового отвору – 5 мм. Схема сканування зони вибраної заклепки подана на рис. 3, *а* (вид збоку) і рис. 3, *б* (вид зверху). Прямокутна ділянка двовимірного сканування (кадр) для окремої заклепки був вибраний 10 мм по координаті *X* і 15 мм по координаті *Y* (на рис. 3, *б* затемнене сірим кольором). На рис. 3, *а* видно, що у вибраній конструкції заклепки розміщувались в спеціальних заглибленнях, через що між матеріалом обшивки і тілом заклепки утворювалась щілина.

Результати, отримані з використанням традиційного ВСП абсолютного типу. Процес отримання томографічних зображень у різних перерізах, що відповідають різним лініям сканування, і, відповідно, різним положенням ВСП відносно заклепки, наведено на рис. 4. Цифрами зазначено координати по осях *X* і *Y*. Результати отримано шляхом обрахунку амплітуди і фази сигналу ВСП на шістнадцяти робочих частотах у діапазоні від 5 до 50 кГц. Праворуч на кожному зображенні показано координати у перпендикулярному від поверхні (вглиб зразка) напрямку.

По закінченню сканування вибраної ділянки отримано горизонтальні перерізи, що відповідають розподілу ПЕП на різній глибині. Реконструйовані томографічні зображення наведено на рис. 5.

Розроблені алгоритми дозволяють розглядати і аналізувати різні перерізи зони контролю після завершення процесу сканування. В якості прикладу на рис. 6 наведено тривимірне томографічне зображення зони заклепки, коли переріз зони контролю вибраний вздовж дефекту.

Наведені результати показують також, що під час використання традиційного ВСП абсолютного типу в діапазоні робочих частот від 5 до 50 кГц можна отримати горизонтальні томографічні зображення на глибині до 1,5 мм. Зазначимо, що аналогічні дослідження, проведені в діапазоні робочих частот від 100 кГц до 1,0 МГц, дозволяють досягати глибини контролю тільки 0,2 мм, що легко пояснити сильнішим впливом скін-ефекту.

Результати контролю зони заклепок, отримані з використанням низькочастотного ВСП подвійного диференціювання. В наступному експерименті використали низькочастотний ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201 [31]. Отримані результати, що характеризують горизонтальні перерізи на різних глибинах до 3 мм для бездефектної (зверху) і дефектної (знизу) заклепок, наведено на рис. 7. Робочі частоти під час використання цього ВСП змінювали в діапазоні 0,9...10 кГц.

Томографічні зображення горизонтальних перерізів для бездефектної заклепки (рис. 7, *а, б, в*) мають характерний чотирьохпелюстковий вигляд, який відповідає чотирьом зонам чутливості ВСП

подвійного диференціювання [31]. Наявність дефекту типу тріщина спотворює чотирьохпелюсткове зображення, яке характерне для бездефектної заклепки. Зображення стає асиметричним і одна пелюстка зникає. Подібні спотворення зображень спостерігались під час традиційної візуалізації результатів контролю зони заклепок, коли двовимірний розподіл сигналу ВСП реєстрували на електрохімічному папері [33]. Зазначимо, що глибина контролю тут сягає 3 мм, що підтверджує високу глибину контролю з застосуванням цього ВСП.

Вертикальні перерізи розподілу електропровідності від підповерхневих дефектів з різною глибиною залягання. Низькочастотний ВСП типу МДФ 1201 використали також для проведення експериментів з шаруватими зразками з дефектами типу тріщина у внутрішніх шарах. Нагадаємо, що для видовжених дефектів типу тріщина сигнал ВСП подвійного диференціювання має «квазіабсолютний» характер, що впливає на отримані томографічні зображення. Тріщину імітували стиком двох алюмінієвих пластин товщиною 5,0 мм, які розміщували на базовій алюмінієвій пластині товщиною 5,0 мм. Зразок зверху накривали пластинами товщиною 1,5; 2,5; 5,0; 6,5 і 8,0 мм для зміни глибини залягання дефекту. Шаруваті зразки сканували ВСП паралельно до поверхні за лінійною траєкторією довжиною 39,6 мм. Для реконструкції вертикального (перпендикулярного до поверхні) перерізу зразка в кожній точці через 0,6 мм по лінії сканування реєстрували сигнали ВСП на шістнадцяти робочих частотах у діапазоні 0,9...10 кГц. На томографічних реконструйованих зображеннях однорідну область відтворювали синім кольором, зону аномалії – червоним, а перехідні зони – зеленим. На томографічних зображеннях вертикального перерізу шаруватих зразків (рис. 8) зверху вказані координати вздовж лінії сканування по поверхні зразка в мм, а праворуч – координати у перпендикулярному від поверхні (вглиб зразка) напрямку.

На томографічних зображеннях вертикального перерізу аномальні зони, що відповідають дефекту, виділені червоним кольором, верхній край яких відповідає глибині залягання (товщині верхньої пластини) дефектів (відлік по правій шкалі). Протяжність червоної аномальної зони по вертикалі вглиб металу відповідає висоті дефекту (5,0 мм). Винятком є томографічне зображення перерізу зразка з поверхневим (без верхньої пластини) дефектом (рис. 8, *а*), на якому аномальна зона розділилася на дві ділянки. Це можна пояснити існуванням бічних максимумів для дефектів великого розміру у ВСП подвійного диференціювання. Однак вертикальна межа червоної ділянки зображення очікувано починається від поверхні зразка. Зі збільшенням глибини залягання на томографічних зображеннях з'являються зелені

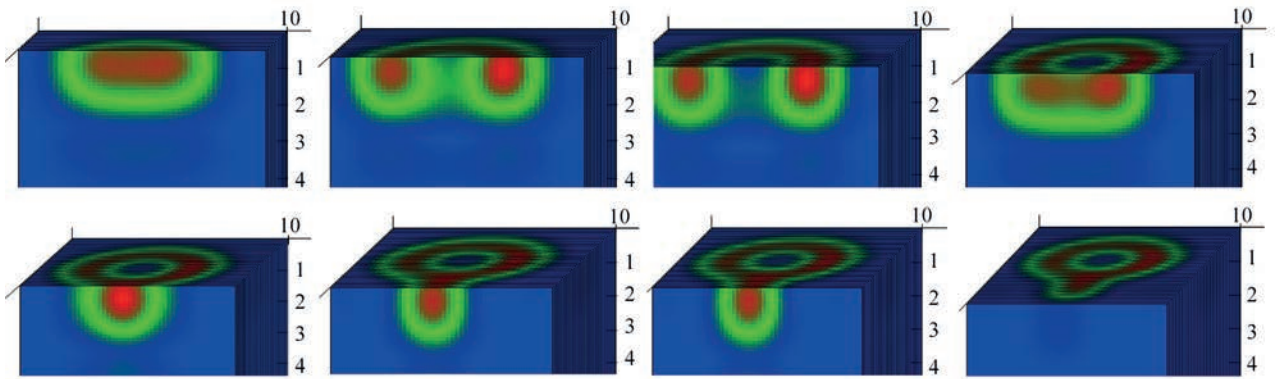


Рис. 4. Тривимірні томографічні зображення зони заклепок з дефектом у різних вертикальних перерізах

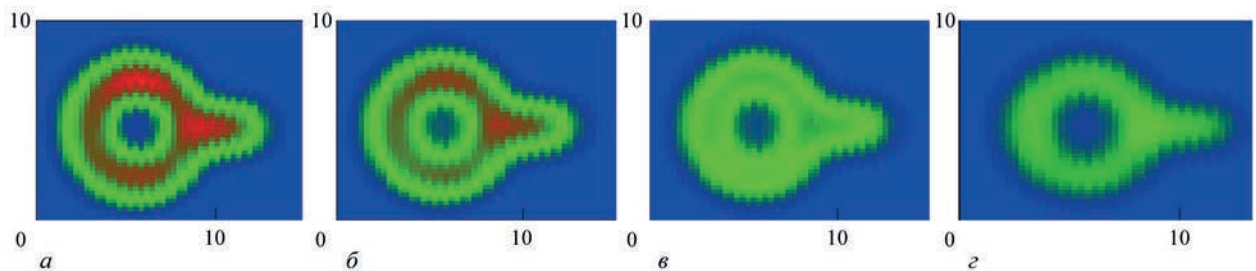


Рис. 5. Томографічне відтворення горизонтального перерізу зони заклепок з дефектом на глибині: 0 (а); 0,9 (б); 1,2 (в), 1,5 мм (г) за допомогою традиційного ВСП абсолютного типу

ділянки, що пов'язано зі зростанням чутливості системи ВК і, відповідно, рівня завад. Але за червоною аномальною зоною можна достовірно ідентифікувати дефект, який залягає на глибині до 8,0 мм. Крім того, чітко видно положення нижньої кромки дефекту, яка для дефекту, що залягає найглибше, відповідає відстані від поверхні 13 мм.

Наведені результати свідчать про принципову можливість кількісного ВК з оцінкою параметрів виявлених дефектів на основі томографічних підходів. Крім того, підтверджена велика глибина контролю з використанням ВСП типу МДФ 1201.

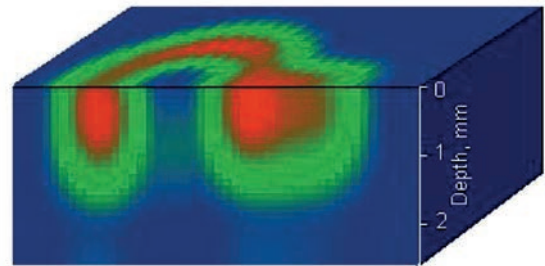


Рис. 6. Тривимірне томографічне зображення зони заклепки з вертикальним перерізом вздовж дефекту

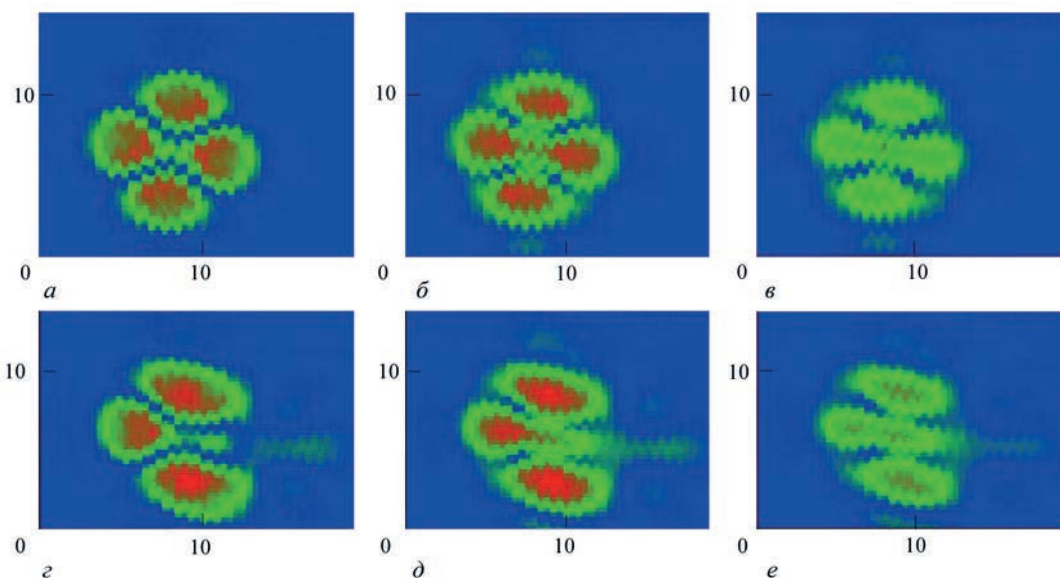


Рис. 7. Томографічне зображення горизонтального перерізу на різних глибинах: 0 (а, з); 2,0 (б, д), 3,0 мм (в, е) під час вихрострумового сканування зони бездефектної заклепки (а, б, в) і заклепки з тріщиною (з, д, е)

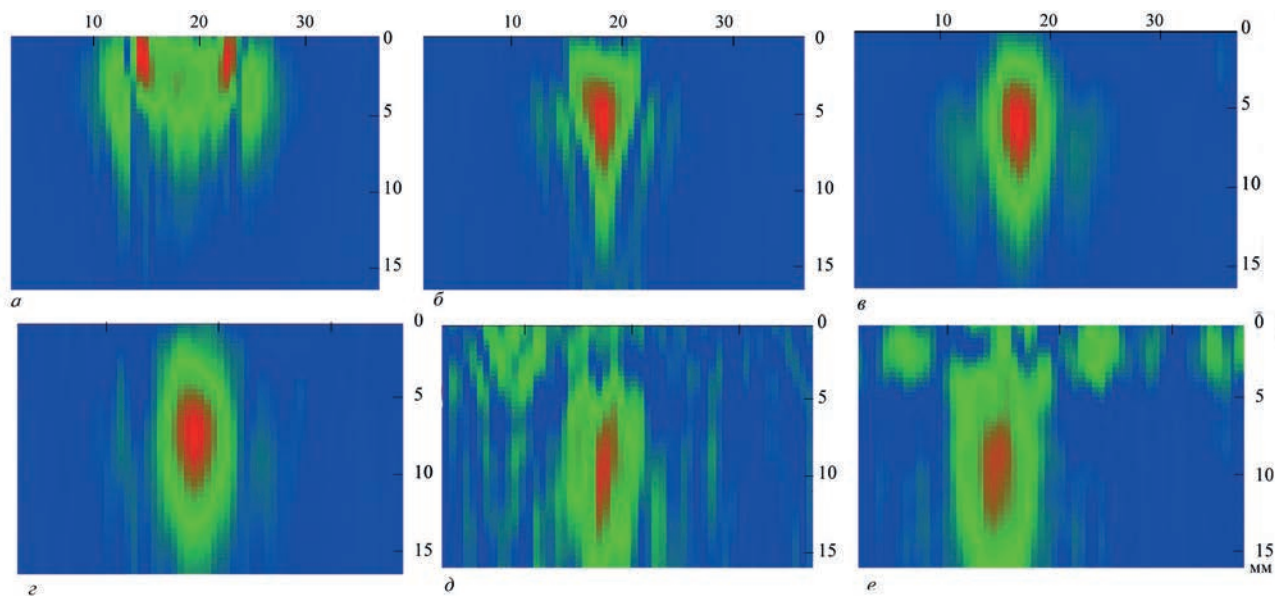


Рис. 8. Реконструйований вертикальний переріз зразка для поверхневого дефекту (а) і дефектів, що залягають на глибинах 1,5 (б), 2,5 (в), 5,0 (г), 6,5 (д), 8,0 мм (е)

Висновки

1. Наведено короткий огляд неруйнівних методів комп'ютерної томографії, заснованої на різних фізичних явищах, як ефективний метод вирішення багатьох проблем НК в контексті революції NDE 4.0.

2. Представлено принцип ВТ та експериментальну установку для реконструкції томографічних зображень, пов'язаних з розподілом електропровідності матеріалу.

3. Для досліджень використано два типи ВСП: перший – традиційний ВСП абсолютного типу із коаксіальними вимірювальною та генераторною обмотками, а другий – низькочастотний ВСП подвійного диференціювання.

4. Для досліджень з ВТ використано двошаровий зразок, що складається з двох листів алюмінієвого сплаву з заклепками і дефектами типу тріщина довжиною 2 мм. Для зони заклепок отримано набір вертикальних (ортогональних до контрольованої поверхні) перерізів, які продемонстрували ефективність ВТ. Проаналізовано також томографічні зображення горизонтальних перерізів на різній глибині.

5. Для реконструкції вертикальних томографічних перерізів із застосуванням ВСП подвійного диференціювання застосовували багат шарові структури, які склалися з верхньої обшивки товщиною 0...8 мм та дефектами типу тріщини у нижньому шарі. Отримані результати показали високу глибину контролю з використанням ВСП цього типу та можливість оцінювати розмір виявленого дефекту та його відстань від контрольованої поверхні.

6. Використання принципів ВТ дозволить піднести рівень вихрострумowego контролю на принципово новий рівень. Поновлення досліджень і розробок з ВТ можна вважати питанням національного пріоритету.

Автори висловлюють подяку академіку З.Т. Назарчуку, який сприяв організації спільних досліджень і співробітництву авторів.

Список літератури/Rferences

- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E.F.R., Ramos, L.F.P. (2017) Past, present and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal. *Intern. J. of Production Research*, 55, 12, 3609–3629. <http://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>.
- Drath, R., Horch, A. (2014) Industrie 4.0: Hit or Hype. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56–58. <http://doi.org/10.1109/mie.2014.2312079>.
- Юрчак А. (2019) Далеко від сусідів: чому Україна пасе задніх у сфері розвитку індустрії 4.0. *Економічна правда*. <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2019/11/5/653346>.
- Yurchak, A. (2019) Far from the neighbours: why Ukraine lags behind in the sphere of industrial development 4.0. *Ekonomichna Pravda*. <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2019/11/5/653346>.
- Singh, R. (2019) The Next Revolution in Nondestructive Testing and Evaluation: What and How. *Materials Evaluation*, 77(1), 45–50.
- Vrana, J. (2020) NDE Perception and Emerging Reality: NDE 4.0 Value Extraction. *Materials Evaluation*, 78(7), 835–851.
- Найда В.Л., Учанин В.Н., Мозжухин А.А. и др. (2008) Разработка системы автоматизированного вихретокового контроля перемычек коллекторов атомных станций, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 21–24.
- Naida, V.L., Uchanin, V.N., Mozhukhin, A.A. et al. (2008) Development of elements of a system of automated eddy current testing of collector bridges in nuclear power plants. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 21–24 [in Russian].
- Lutcenko, G., Uchanin, V., Mischenko, V., Opanasenko A. (2012) Eddy Currents Versus Magnetic Particles. *Proc. 18-th World Conf. on Nondestructive Testing, Durban*, www.ndt.com.
- Долиненко В.В., Шаповалов С.В., Скуба Т.Г. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумowego контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, 5–6, 60–67. <http://doi.org/10.15407/as2017.06.10>.
- Dolinenko, V.V., Shapovalov, E.V., Skuba, T.G. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, 5–6, 60–67. <http://doi.org/10.15407/as2017.06.10>.
- Lysenko, Ju., Eremenko, V., Kuts, Yu. et al. (2020) Advanced signal processing methods for inspection of aircraft structural materials. *Transactions on Aerospace Research*, 2(259), 27–35. <http://doi.org/10.2478/tar-2020-0008>.
- Hounsfield, G. N. (1972) *A method and apparatus for examination of a body by radiation such as X-ray or gamma radiation*. British Patent No. 1283915. British Patent Office, London.

11. Вайнберг Э.И., Клюев В.В., Курозаев В.П. (1986) Промышленная рентгеновская вычислительная томография. *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник* (Клюев В.В. ред.). 2-е изд. Москва, Т. 1. Vajnberg, E.I., Klyuev, V.V., Kurozaev, V.P. (1986) Industrial X-ray computed tomography: *Book. Devices for non-destructive testing of materials and products: Refer. book*. Ed. by V.V. Klyuev. 2nd Ed., Moscow, Vol. 1 [in Russian].
12. Вайнберг Э.И., Казак И.А., Курозаев В.П. (1981) Реконструкция внутренней пространственной структуры объектов по интегральным проекциям в реальном масштабе времени. *ДАН СССР*, 257(1), 89–94. Vajnberg, E.I., Kazak, I.A., Kurozaev, V.P. (1981) Reconstruction of internal space structure of objects by integral projections in real time. *DAN SSSR*, 257(1), 89–94 [in Russian].
13. Reimers, P., Goebbels, J. (1983) New Possibilities of Nondestructive Evaluation by X-ray Computed Tomography. *Materials Evaluation*, 42(6), 732–737.
14. Maire, E., Buffiere, J., Salvo, L. et al. (2001) On the Application of X-ray Microtomography in the Field of Materials Science. *Advanced Engineering materials*, 3(8), 539–546.
15. Nazarchuk, Z.T., Koshovy, V.V., Krivin, E.V., Romanyshyn, I.M. (1999) Ultrasonic tomography, technologies for NDT and monitoring of material degradation. *Proc. Joint EC IAEA Specialists Meeting on NDT Methods for Monitoring Degradation*. Petten, The Netherlands, 79–89.
16. Koshovy, V.V., Nazarchuk, Z.T. (2001) Estimating the Predefective State of a Material Using Methods of Ultrasonic Computerized Tomography. *Materials Science*, 37(2), 279–293.
17. Кошевой В.В., Романишин И.М., Романишин Р.И., Шарамга Р.В. (2010) Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала (Часть 1). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 37–42. Koshevoj, V.V., Romanishin, I.M., Romanishin, R.I., Sharamaga, R.V. (2010) Ultrasonic computer tomography based on recording of a signal scattered by material structure. Pt. 1. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 37–42 [in Russian].
18. Кошевой В.В., Романишин И.М., Романишин Р.И., Шарамга Р.В. (2010) Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала (Часть 2). *Там же*, 3, 19–24. Koshevoj, V.V., Romanishin, I.M., Romanishin, R.I., Sharamaga, R.V. (2010) Ultrasonic computer tomography based on recording of a signal scattered by material structure. Pt. 2. *Ibid*, 3, 19–24 [in Russian].
19. Turk, A.S., Hocaoglu, A.K., Vertiy, A.A. (Eds.) (2011) *Sub-surface sensing*. John Wiley & Sons, Inc. 890 p.
20. Vertiy, A., Gavrilov, S., Voynovsky, I., Stepanyuk, V. (2002) The millimeter wave tomography application for the subsurface imaging. *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*, 23(10), 1413–1444.
21. Gavrilov, S.P., Vertiy, A.A. (1997) Application of tomography method in millimeter wavelengths band: I. Theoretical. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, 18(9), 1739–1760.
22. Vertiy, A.A., Gavrilov, S.P. (1997) Application of tomography method in millimeter wavelengths band: II. Experimental. *Ibid*, 18(9), 1761–1781.
23. Vertiy, A., Gavrilov, S., Voynovsky, I. et al. (2004) Sub-surface imaging by deep penetrating eddy current tomography. *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів*, 9, 123–127.
24. Vertiy, A.A., Gavrilov, S.P., Voynovsky, I.V. et al. (2004) Deep penetrating eddy current tomography for subsurface imaging. *Proc. 10-th Int. Workshop on Electromagnetic Evaluation*. Michigan, USA. 91–92.
25. Tamburrino, A., Rubinacci, G. (2002) A new non-iterative inversion method for electrical resistance tomography. *Inverse Problems*, 18(6), 1809–1829.
26. Tamburrino, A., Soleimani, M. (2006) Shape reconstruction in magnetic induction tomography using multifrequency data. *International J. of informaton and systems sciences*, 2(3), 343–353.
27. Tamburrino, A., Rubinacci, G., Soleimani, M., Lionheart, W. (2003) Non iterative inversion method for electrical resistance, capacitance and inductance tomography. *3-rd World Congress on Industrial Process Tomography*, Banff, Canada, pp. 233–238.
28. Tamburrino, A., Rubinacci, G. (2006) Fast methods for quantitative eddy-current tomography of conductive materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(8), 2017–2028.
29. Учанин В.Н. (2010) Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 24–29. Uchanin, V.N. (2010) Eddy current overlay transducers: Expanded classification, comparative analysis and characteristic examples of realization. (Review). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 24–29 [in Russian].
30. Uchanin, V.M. (2007) Specific features of the space distribution of the signal of an eddy-current converter caused by cracks of different lengths. *Materials Science*, 43, 591–595. <http://doi.org/10.1007/s11003-007-0068-2>.
31. Учанин В.М. (2013) Вихреструмові накладні перетворювачі подвійного диференціювання. Львів, Сполом.
32. Mook, G., Hesse, J., Uchanin, V. (2007) Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. *Materials Testing*, 49(5), 258–264. <http://doi.org/10.3139/120.100810>.
33. Учанин В. (2006) Вихретоковые методы выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–12.
34. Uchanin, V. (2020) Detection of the fatigue cracks initiated near the rivet holes by eddy current inspection techniques. *Transactions on Aerospace Research*, 1(258), 47–58. <http://doi.org/10.2478/tar-2020-0010>.

THREE-DIMENSIONAL VISUALIZATION OF THE DETECTED DEFECTS BY EDDY CURRENT COMPUTING TOMOGRAPHY

O.O. Vertiy¹, V.M. Uchanin²

¹Kharkiv National University of Radio Electronics. 14 Nauky Ave., 61058, Kharkiv, Ukraine. E-mail: alexey.vertiy@gmail.com

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

Nondestructive computing tomography methods based on different physical phenomena are reviewed as an effective tool to solve many NDT problems in the context of NDE 4.0 revolution. Eddy current (EC) tomography principle and experimental set-up are presented to demonstrate the possibility to reconstruct the tomography images related to the distribution of material electric conductivity. A riveted joint of two aluminum alloy sheets with 2 mm long artificial crack like defects was selected as an example of complex enough structure for control. Investigations were carried out with two types of EC probes application: the first one – the traditional EC probe of absolute type with coaxial driving and sensing coils, and the second – low-frequency double differential EC probe of MDF 1201 type. The set of vertical (orthogonal to the inspected surface) slices for the rivet zone were obtained to demonstrate the effectiveness of EC tomography. The horizontal slices were analyzed to demonstrate the possibility to produce tomography images at different depths. Two-layer structures, consisting of upper sheets with thicknesses from 0 to 8 mm and 5 mm thick lower sheath with a crack like defect were applied to reconstruct the vertical tomography slices with double differential EC probe application. The latter results demonstrate the high penetration ability of inspection using double differentiation EC probes and the possibility to estimate the defect size and distance from the inspected surface. 34 Ref., 8 Fig.

Keywords: eddy current (EC) tomography; eddy current probe (EC probe); double differentiation EC probe; electric conductivity; tomography images; slices; riveted joints

Надійшла до редакції 18.03.2021

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗІ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

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

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

Проведено критичний аналіз літературних даних про методи чисельного аналізу технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів. В рамках умовного розділення цих методів на три класи – макроструктурні, мезоструктурні та мультимасштабні – показано основні переваги та недоліки їх використання для прогнозування процесів, що визначають якість та міцність типових конструкцій зі структурнонеоднорідних металів і композиційних матеріалів. Бібліогр. 42, рис. 2.

Ключові слова: великогабаритні конструкції, неоднорідні матеріали, композиційні матеріали, технічний стан, скінченно-елементне моделювання, зварні з'єднання

Для розв'язання типових задач проектування, визначення технічного стану та прогнозування міцності великогабаритних конструкцій різного призначення (посудин тиску, панелей, балок, ферм) прийнято використовувати відповідні аналітичні методи визначення їх граничного стану з урахуванням фактичних властивостей матеріалу, результатів дефектоскопії та конкретного механізму руйнування. При реалізації відповідних алгоритмів необхідним є схематизація як геометричних особливостей конкретної конструкції та її окремих елементів, так і поведінки матеріалу в залежності від умов зовнішнього впливу. Зокрема, характерним припущенням є розгляд матеріалу як однорідного та ізотропного, що суттєво спрощує методи аналізу, дозволивши використовувати засади лінійної механіки пружного суцільного середовища. Проте ці підходи є обмежено застосовними при аналізі стану просторово неоднорідних конструкцій, до яких відносяться просторово неоднорідні метали та сплави, композити, а та-

кож місця зварних з'єднань з відповідним залишковим напружено-деформованим і структурним станом. Розвиток як чисельних методів прогнозування складних мультифізичних процесів в реальних матеріалах, так і високоефективних комп'ютерних засобів їх програмної реалізації суттєво розширили спектр практичних задач, що можуть бути розглянуті з мінімальною консервативністю. В рамках даної роботи проведено критичний огляд методів чисельного аналізу та прогнозування стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів.

Можна виділити три загальні підходи аналізу стану неоднорідних матеріалів та великогабаритних конструкцій з них – макроструктурний, мезоструктурний та мультимасштабний (рис. 1) [1].

Так, макроструктурний підхід передбачає однорідну інтерпретацію матеріалу, згідно з яким усі властивості визначаються явно та їм присвоюються певні ефективні значення для опису конкретних явищ. Найпростішим методом в такому випадку є викори-

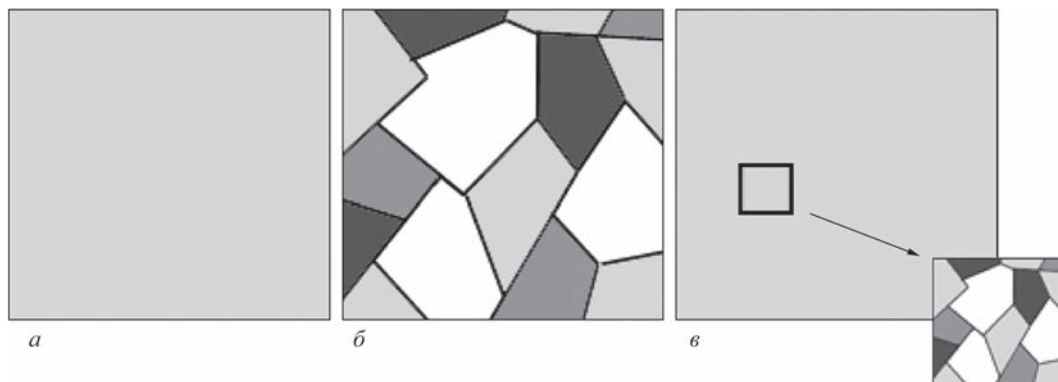


Рис. 1. Умовне представлення структурно неоднорідного матеріалу в моделях різного класу: а – макроструктурні (однорідний матеріал); б – мезоструктурні (неоднорідний матеріал); в – мультимасштабні (поетапний розгляд як однорідного, так і неоднорідного матеріала)

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

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак, 2021

стання правила сумішей відповідно до парціально-го внеску кожної структурної складової [2] або формального усереднення вихідних властивостей, що може використовуватись, якщо характерний лінійний розмір досліджуваних фізичних полів значно перевищує масштаб неоднорідності матеріалу [3]. Подальше використання класичних методів, що базуються на загальних правилах будівельної механіки, дозволяє реалізувати відносно прості інженерні алгоритми, які дають загальне уявлення про несучу здатність конкретного конструкційного елемента за певної комбінації факторів зовнішнього впливу [4–6].

Для моделювання макродеформування конструкційних елементів з типових волокнистих або ортотропних двокомпонентних композиційних матеріалів, які мають виражену анізотропію властивостей, вони мають бути інтерпретовані як однорідні анізотропні [7]. Відомо, що в цьому випадку ефективні властивості усередненого матеріалу, зокрема, модуль Юнга E , коефіцієнт Пуассона ν та модуль зсуву G , необхідно погоджувати з конкретними напрямками в залежності від просторового положення матеріалу згідно з правилом сумішей та, зокрема, моделлю Халпина-Цая [8]. При цьому властивості матеріалу в різних напрямках обчислюються наступним чином [9]:

$$E_1 = (1 - f) \cdot E_m + f \cdot E_f, \quad (1)$$

$$E_2 = E_3 = E_m \cdot \frac{(1 + \xi \cdot \eta \cdot f)}{(1 - \eta \cdot f)}, \quad (2)$$

$$G_{12} = G_{21} = G_{13} = G_{31} = G_m \cdot \frac{(1 + \xi \cdot \eta \cdot f)}{(1 - \eta \cdot f)}, \quad (3)$$

$$\nu_{12} = (1 - f) \cdot \nu_m + f \cdot \nu_f, \quad (4)$$

$$\nu_{23} = 1 - \nu_{12} - \frac{E_2}{3 \cdot K}, \quad (5)$$

де

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi} \quad \text{або} \quad \eta = \frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi}, \quad (6)$$

$$K = \left(\frac{f}{K_f} + \frac{1-f}{K_m} \right)^{-1}, \quad (7)$$

$$K_f = \frac{E_f}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_f)}, \quad (8)$$

$$K_m = \frac{E_m}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_m)}, \quad (9)$$

$\xi \approx 1$ – константа, індекси m, f відносять параметр, відповідно, до матеріалу матриці та наповнювача.

Пружне деформування матеріалу, тобто залежність механічних напружень σ_{ij} від деформацій ϵ_{kl} , має наступний вигляд:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \epsilon_{kl}, \quad (10)$$

де E_{ijkl} – матричне представлення пружних констант, що обчислюються згідно з (1)–(9).

Задача описання стану такого роду матеріалів ускладнюється при комбінації різнорідних шарів композитів в загальний ламінат. В рамках макроструктурного підходу такі випадки прийнято розглядати на основі класичної теорії шаруватих композитів (ламінітів), що дозволяє врахувати неоднорідність кожного шару при усередненні властивостей [10, 11]. Таке спрощення застосовується, зокрема, при інженерних розрахунках міцності та працездатності оболонкових елементів фізеляжів апаратів авіаційного та космічного призначення [12].

Активне використання скінченно-елементних методів (СЕМ) для моделювання стану матеріалів і конструкцій за різного зовнішнього впливу при проектуванні, аналізі фактичного стану з урахуванням результатів неруйнівного контролю, розробці нових матеріалів та оптимізації виробничих технологій зумовив подальший розвиток підходів інтерпретації неоднорідних властивостей реальних матеріалів і конструкцій. З одного боку, в рамках СЕМ алгоритми гомогенізації властивостей матеріалу знайшли своє природне продовження, тому що скінченно-елементне описання базується на припущенні однорідних властивостей матеріалу в рамках одного скінченного елемента, з іншого, вимагає формального узгодження між формуванням скінченно-елементного просторового розбиття та формулюванням фізичної моделі поведінки реального матеріалу.

Використання СЕМ для описання великогабаритних конструкцій стикається з природною складністю ресурсомісткості задач. Тому поряд із розробкою високоефективних розрахункових алгоритмів на сучасних комп'ютерних системах [13, 14] на сьогодні реалізовано низку спрощених одно- та двовимірних СЕМ, які дозволяють проводити необхідні чисельні дослідження без залучення значних обчислювальних потужностей. Зокрема, необхідно виділити балкові (так звані 2D-X) моделі, які поєднують засади балкових теорій та СЕМ [15], а також оболонкові СЕМ [16].

Окрім того, гнучкість скінченно-елементного розбиття для певних випадків дозволяє використовувати більш дрібну просторову дискретизацію біля потенційно небезпечних ділянок великогабаритних конструкцій (зварних з'єднань,

дефектів, виявлених інструментальними засобами дефектоскопії або постульованих), тоді як на периферії конструкції просторові кроки розбиття можуть бути значно більшими, що суттєво знижує ресурсомісткість задачі [17]. При цьому виникає природна проблема інтерпретації отримуваних результатів. Зокрема, в разі використання просторового розбиття мікронного розміру застосування загальних правил розрахунку напружено-деформованого стану суцільного середовища є некоректним, тому що формально в такому масштабі не виконуються вимоги до суцільності, однорідності та ізотропності матеріалу. Тому після виконання подібних розрахунків прийнято використовувати певні інтегральні методи (розрахунок J-інтегралу або інтегральних статистичних параметрів), які дозволяють отримати коректні експертні висновки щодо стану великогабаритної конструкції [18, 19].

Загальним недоліком макроструктурних підходів є суттєве спрощення поведінки матеріалів на нижчих масштабних рівнях, що суттєво обмежує їх застосовність. Зокрема, гомогенізація матеріалу та використання ефективних фізичних характеристик матеріалу не дозволяє врахувати особливості взаємодії різних структурних складників. Крім того, зародження та розвиток докритичного пошкодження матеріалу відбувається саме на мезо-, мікро- чи наномасштабних рівнях. Тому при використанні макроструктурних підходів в якості умов настання граничного стану не можуть бути безпосередньо без супутніх припущень використані критерії механіки руйнування. Стосовно структурно неоднорідних матеріалів при статичному силовому впливі існує низка критеріїв, заснованих на різних усереднених параметрах стану матеріалу, які мають бути визначені для кожного конкретного випадку. Так, заслуговує уваги критерій, що є модифікацією формули Хофмана для матеріалів при переважно розтягувальному зовнішньому зусиллі [20]:

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_{KM}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{xx}}{X_{KM}}\right)\left(\frac{\sigma_{yy}}{X_{KM}}\right) + \left(\frac{\sigma_{yy}}{Y_{KM}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{KM}}\right)^2 = 1, (11)$$

де X_{KM} , Y_{KM} , S_{KM} – умовні параметри міцності.

Альтернативні критерії граничного стану наведено, зокрема, в [21].

В рамках мезоструктурних підходів матеріал описується як неоднорідний, поєднуючи засади механіки суцільного середовища, пластичності, механіки руйнування та фізичного матеріалознавства. Відомо, що в мікрмасштабі втрата стабільності матеріалу відбувається в області мікроконцентраторів напружень і основним типом дефектності є дислокації кристалічної решітки [22, 23]. В свою чергу, при мезоструктурному описанні суцільність матеріалу втрачається

в окремих локалізованих областях матеріалу конструкції під зовнішнім навантаженням, руйнування розвивається вздовж максимальних дотичних напружень незалежно від орієнтації кристалічної решітки. Під макроруйнуванням в цьому випадку прийнято вважати появу глобальної втрати стабільності в області макроконцентратора напружень, відповідального за перехід несучильності матеріалу з мезорівня на макрорівень.

До основних задач мезоструктурних підходів відносяться [24–26]:

- прогнозування макроскопічних властивостей структурно неоднорідних матеріалів;
- дослідження нелінійної реакції неоднорідного матеріалу та конструкцій на зовнішній вплив;
- реалізація принципів механіки руйнування стосовно багатофазних матеріалів та конструкцій з них;
- аналіз розвитку динамічних процесів та розповсюдження хвиль стискання-розтягу;
- прогнозування поведінки спеціальних матеріалів за високих температур.

Більшість чисельних алгоритмів в рамках мезоструктурних підходів включають поняття репрезентативного об'ємного елемента (РОЕ), в рамках якого, власне, розглядається поведінка матеріалу конкретної конструкції [27–29]. Ключовою вимогою до РОЕ є його репрезентативність, тобто його поведінка в усередненому розумінні має представляти адекватне відображення реакції матеріалу на зовнішній вплив. Застосовність РОЕ конкретного розміру залежить від однорідності матеріалу та рівномірності фізичних полів. Особливий тип РОЕ – елементарні осередки, які формуються на основі регулярності архітектури матеріалу, що може бути прямим геометричним описанням або певною ідеалізацією на основі певних статистичних ознак [30]. Це зумовлює об'єктивну складність його використання для прогнозування стану великогабаритних конструкцій. Тому стосовно задач визначення їх технічного стану мезоструктурний підхід використовується для аналізу окремих невеликих конструкційних елементів, місць підвищеної небезпеки руйнування або локальних експлуатаційних дефектів.

В мультимасштабних підходах використовуються як однорідний, так і неоднорідний опис матеріалу, а саме: на мезорівні як неоднорідний матеріал, властивості якого чітко визначені для кожного окремого компонента, на макрорівні – як однорідний, властивості якого не відображаються явно, але є ефективними властивостями через мезо-макророзв'язок (наприклад, врахування деформацій ϵ , напружень σ , об'ємного докритичного пошкодження концентрації D , див. рис. 2) [31]. Це, з одного боку, дозволяє використовувати перева-

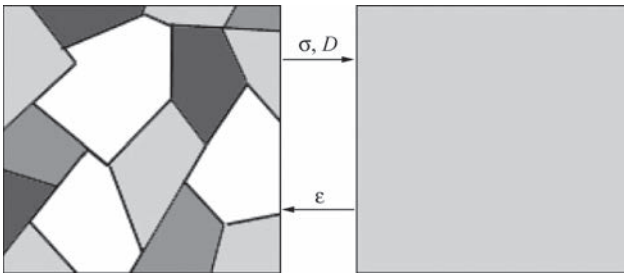


Рис. 2. Приклад мезо-макророзв'язків в мультимасштабних моделях [1]

ги мезоструктурних підходів та враховувати особливості структурного стану матеріалу, з іншого – прогнозувати певні макроскопічні реакції реальної конструкції на зовнішнє експлуатаційне навантаження, реалізувавши так звані мікроструктурно-чутливі моделі [32, 33].

Зокрема, характерним випадком є аналіз впливу технологічних параметрів монтажного зварювання на залишковий деформований стан великогабаритних конструкцій авіакосмічного призначення, в суднобудівній галузі, будівництві. Відомо, що зварювання є локальним процесом, що викликає суттєві структурні перетворення в металі шва та зоні термічного впливу, а також зумовлює формування певного залишкового напружено-деформованого стану (НДС), що, в свою чергу, впливає на загальне відхилення форми кінцевого виробу від проектної. Локальність кінетики температурних полів, фазових перетворень та формування НДС призводить до об'єктивних труднощів при моделюванні всієї конструкції. Тому раціональним є використання мультимасштабних моделей, які дозволяють розглядати процеси при зварюванні та загальне деформування великогабаритних конструкцій окремо. Тут можна видокремити методи, що базуються на теорії функції усадки [34], тобто результатом розрахунку локальних процесів при зварюванні є інтегральне значення зменшення об'єму металу в результаті його пластичного плину (усадки) та перенесення цього значення в якості мезо-макророзв'язку в макромодель, де величина усадки є параметром окремого скінченного елемента, розмір якого відповідає характерному розміру зварного шва. Такий підхід дозволяє не тільки спростити розрахунок НДС великогабаритних зварних конструкцій, врахувавши особливості зварювального процесу та його впливу на поточний стан матеріалу, але й реалізувати схеми для конструкційних елементів з великою кількістю зварних швів. Тому цей клас методів застосовується для аналізу стану площинних суднобудівних конструкцій та зварних підсиленних панелей в авіабудуванні [35, 36].

Використання мультимасштабних підходів найбільш поширене при описанні конструкційних елементів з композиційних матеріалів з регуляр-

ною структурою, де можливо реалізувати методи елементарних осередків. Зокрема, стосовно конструкцій волокнистих композитів можна виділити метод послідовного аналізу накопичення руйнування, запропонованого авторами [37], який дозволяє враховувати особливості пошкодження композиту при прогнозуванні настання граничного стану в сенсі макроруйнування.

Стосовно реальних полікристалічних матеріалів регулярність їх структури є достатньо умовною. Тому для опис процесів деформування та руйнування в рамках мультимасштабних підходів можлива реалізація статистичного аналізу, що враховує стохастичну нерегулярність структурного стану матеріалу, зокрема, певного докритичного пошкодження, яке може мати суттєвий вплив на стан конструкції. Так, Ешелбі в своїх роботах [38] запропонував порядок врахування докритичних неоднорідностей несучильності матеріалів в РОЕ при оцінці втомної міцності структурно неоднорідних конструкцій. Цю ідеологію було розвинуто в моделях кристалічної пластичності [39], методі Мура-Танакі [40] та теорії гомогенізації [41]. В роботі Макдауела пропонується замінити РОЕ на статистичні об'ємні елементи для аналізу багатоциклової втоми, що дозволяє розглянути повний статистичний розподіл можливих відповідей матеріалу на зовнішній вплив [42].

Ці приклади демонструють, що в цілому мультимасштабні підходи є найбільш універсальними з точки зору застосовності для розв'язання типових задач аналізу стану реальних великогабаритних конструкцій, але вимагають достатнього ретельного обґрунтування зв'язків між мезо- та макроописанням матеріалу для гарантовано адекватних результатів прогнозування та відповідних експертних висновків.

Висновки

1. Проведено огляд існуючих робіт по методах аналізу технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів. Основну увагу приділено чисельним підходам, що передбачають скінченно-елементну (або аналогічну) реалізацію. В рамках умовного розділення на три класи – макроструктурні, мезоструктурні та мультимасштабні – показано основні переваги та недоліки характерних методів прогнозування процесів, що визначають якість та міцність типових конструкцій зі структурнонеоднорідних металів і композиційних матеріалів.

2. Розглянуто основні принципи інтерпретації просторово неоднорідних матеріалів в рамках макроструктурних підходів аналізу стану великогабаритних конструкцій. Наведено приклади алгоритмів розрахунку ефективних значень пружних

характеристик ортотропних композитів, що використовуються для розрахунків в рамках наближення однорідних анізотропних матеріалів.

3. Продemonстровано основні переваги мезоструктурних підходів, зокрема, можливості прогнозування ефективних макроскопічних властивостей структурно неоднорідних матеріалів і можливості аналізу докритичного руйнування матеріалу з урахуванням особливостей розподілу структурних компонентів. Зазначено їх обмежену застосовність для великогабаритних конструкцій через значну ресурсомісткість відповідних задач.

4. Показано, що мультимасштабні підходи є найбільш універсальними для аналізу стану реальних великогабаритних конструкцій, але для адекватних результатів прогнозування та відповідних експертних висновків вимагають обґрунтування зв'язків між мезо- та макроописанням матеріалу.

Список літератури/References

- Gitman, I.M. (2006) *Representative Volumes and Multi-scale Modelling of Quasi-brittle Materials*. Proefschrift. ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische Universiteit Delft.
- Feng, B., Feng, X., Yan, C. et al. (2020) On the rule of mixtures for bimetal composites without bonding. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8, 4, 1253–1261.
- Aboudi, J., Arnold, S.M., Bednarczyk, B.A. (2013) *Micromechanics of Composite Materials. A Generalized Multiscale Analysis Approach*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Moss, D.R., Basic, M. (2013) *Pressure Vessel Design Manual*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Kollár, L.P., Springer, G.S. (2003) *Mechanics of composite structures*. Cambridge University Press.
- Sayyad, A.S., Ghugal, Y.M. (2017) Bending, buckling and free vibration of laminated composite and sandwich beams: A critical review of literature. *Composite Structures*, 171, 486–504.
- (1998) *Металлические конструкции. Т.1. Общая часть*. Кузнецов В.В. (ред.). Москва, Изд-во АСВ.
- (1998) *Metal structures. Vol.1: General*. Ed. by V.V. Kuznetsov. Moscow, ASV [in Russian].
- Shokrieh, M.M., Moshrefzadeh-Sani, H. (2016) On the constant parameters of Halpin-Tsai equation. *Polymer*, 106, 14–20.
- Fragoudakis, R. (2019) *Strengths and Limitations of Traditional Theoretical Approaches to FRP Laminate Design against Failure*. Engineering Failure Analysis. London: IntechOpen Limited.
- Li S., E. Sitnikova, E. (2020) Representative volume elements and unit cells. Concepts, Theory, Applications and Implementation. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Haynes, R., Cline, J., Shonkwiler, B., Armano, E. (2016) On plane stress and plane strain in classical lamination theory. *Composites Science and Technology*, 127, 20–27.
- Sofiyev, A.H. (2019) Influences of shear deformations and material gradient on the linear parametric instability of laminated orthotropic conical shells. *Composite Structures*, 225, 111–156.
- Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф. и др. (2018) Высокопроизводительные методы численных исследований для решения задач экспертизы работоспособности дефектных конструкций. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 27–33.
- Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. et al. (2018) High-performance methods of numerical studies for solving the problems of evaluation of defective structure serviceability. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 27–33 [in Russian].
- Velikoivanenko, E., Milenin, A., Popov, A. et al. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55, 1, 117–127.
- Махненко В.И., Миленин А.С., Семенов А.П. (2007) Математическое моделирование термодформационных процессов при сваркопайке стыковых соединений типа титан-алюминий. *Автоматическая сварка*, 11, 5–9.
- Makhnenko, V.I., Milenin, A.S., Semyonov, A.P. (2007) Mathematical modeling of thermal-deformation processes in braze-welding of butt joints of the titanium-aluminium type. *The Paton Welding J.*, 11, 2–6.
- Trinh, M.-C., Jun, H. (2021) A higher-order quadrilateral shell finite element for geometrically nonlinear analysis. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 89, 104–283.
- Perić, M., Seleš, K., Tonković, Z., Lovrenić-Jugović, M. (2019) Numerical simulation of welding distortions in large structures with a simplified engineering approach. *Open Phys*, 17, 719–730.
- Kharchenko, V.V., Chirkov, A.Yu., Kobel'skii, S.V., Kravchenko, V.I. (2018) Peculiarities of the Fracture Strength Design of the Branch Pipe Zone of the Nuclear Reactor Vessel. *Strength of Materials*, 50, 517–528.
- Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 171, 60–68.
- Фудзии Т., Дзако М. (1982) *Механика разрушения композиционных материалов*. Москва, Мир.
- Fudzii, T., Dzako, M. (1982) *Fracture mechanics of composite materials*. Moscow, Mir [in Russian].
- Гребенюк С.Н., Мелашенко О.П. (2012) Использование различных критериев прочности для расчёта волокнистых композитов. *Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил*, 3(32), 134–136.
- Grebenyuk, S.N., Melashchenko, O.P. (2012) Application of different criteria of strength for calculation of fiber composites. *Zbirnyk Naukovykh Prats KhNUPS*, 3(32), 134–136 [in Russian].
- Panin, V.E., Korotaev, A.D., Makarov, P.V., Kuznetsov, V.M. (1998) Physical mesomechanics of materials. *Russian Physics Journal*, 41(9), 856–884.
- Haritos, G.K., Hager, J.W., Amos, A.K. et al. (1988) Mesomechanics: the microstructure mechanics connection. *Int. J. Solid Structures*, 24(11), 1081–1096.
- Srivastava, V.K., Gabbert, U., Berger, H. (2011) Representative Volume Element Analysis for the Evaluation of Effective Material Properties of Fiber and Particle Loaded Composites with Different Shaped Inclusions. *Mechanics of Time-Dependent Materials and Processes in Conventional and Multifunctional Materials*, 3, 185–192.
- Panin, V. (1998) Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 30(1), 1–11.
- Saksala, T. (2018) Numerical modelling of concrete fracture processes under dynamic loading: Meso-mechanical approach based on embedded discontinuity finite elements. *Engineering Fracture Mechanics*, 201, 282–297.
- Kanit, T., Forest, S., Galliet, I. et al. (2003) Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach. *International Journal of Solids and Structures*, 40, 3647–3679.
- Ostoja-Starzewski, M. (2006) Material spatial randomness: From statistical to representative volume element. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21, 112–132.
- Bargmann, S., Klusemann, B., Markmann, J. et al. (2018) Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials: A review. *Progress in Materials Science*, 96, 322–384.
- Schmauder, S., Mishnaevsky, L.Jr. (2009) *Micromechanics and Nanosimulation of Metals and Composites*. Berlin: Springer-Verlag.

31. McDowell, D.L. (2008) Viscoplasticity of heterogeneous metallic materials. *Materials Science and Engineering R.*, **62**, 67–123.
32. McDowell, D.L. (2007) Simulation-based strategies for microstructure-sensitive fatigue modeling. *Ibid.*, **468**, 4–14.
33. Wilson, D., Dunne, F.P.E. (2019) A mechanistic modelling methodology for microstructure-sensitive fatigue crack growth. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **124**, 827–848.
34. Махненко О.В., Мужиченко А.Ф., Зайффарт П. (2009) Применение математического моделирования при термической правке судостроительных панелей. *Автоматическая сварка*, **1**, 10–16.
Makhnenko, O.V., Muzhichenko, A.F., Seyffardt, P. (2009) Application of mathematical modeling in thermal straightening of shipbuilding panels. *The Paton Welding J.*, **1**, 10–16.
35. Махненко О.В., Зайффарт П. (2008) Расчетное прогнозирование общих деформаций сварных балок при лазерной сварке. *Там же*, **3**, 14–20.
Makhnenko, O.V., Seyffardt, P. (2008) Calculation prediction of overall distortions in laser welded beams. *Ibid.*, **3**, 6–12.
36. Махненко О.В., Мужиченко А.Ф., Прудкий И.И. (2013) Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния сварных стрингеров панелей из титанового сплава BT20. *Там же*, **2**, 14–20.
Makhnenko, O.V., Muzhichenko, A.F., Prudky, I.I. (2013) Mathematical modeling of stress-strain state of welded stringer panels from titanium alloy VT20. *Ibid.*, **2**, 13–9.
37. Великоиваненко Е.А., Миленин А.С., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2016) Численное прогнозирование эффективности усиления дефектных трубопроводов бандажами из композиционных материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 12–18.
Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. (2016) Numerical prediction of effectiveness of reinforcement of defective pipelines by composite material bands. *Tekh. Diagnost i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 24–31 [in Russian].
38. (2006) Collected Works of J. D. Eshelby: *The Mechanics of Defects and Inhomogeneities (Solid Mechanics and Its Applications)*. Edit: X. Markenscoff, A. Gupta. Springer Netherlands.
39. Dormieux, L., Kondo, D. (2016) *Micromechanics of Fracture and Damage*. Vol. 1. London, ISTE Ltd.
40. Xiaotao, L., Shan, L. (2021) A micro-crack initiation life simulation method by improving the Tanaka-Mura's model of slip behavior. *International Journal of Fatigue*, **145**, 106–108.
41. Cioranescu, D., Damlamian, A., Griso, G. (2002) Periodic unfolding and homogenization, *C.R. Acad. Sci. Paris. Ser.*, **1(335)**, 99–104.
42. McDowell, D.L., Gall, K., Horstemeyer, M.F., Fan J. (2003) Microstructure-based fatigue modeling of cast A356-T6 alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, **70**, 49–80.

FINITE ELEMENT METHODS FOR ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF LARGE-SIZED STRUCTURES FROM STRUCTURALLY HETEROGENEOUS MATERIALS (Review)

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

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

Critical analysis of literature data on the methods of numerical analysis of the technical condition of large-sized structures from structurally heterogeneous materials was performed. The main advantages and disadvantages of their application for prediction of the processes, determining the quality and strength of typical structures from structurally-heterogeneous metals and composite materials, are shown within the framework of conditional division of these methods into three classes, namely macrostructural, mezostructural and multiscale. 42 Ref., 2 Fig.

Keywords: large-sized structures, heterogeneous materials, composite materials, technical condition, finite-element modeling, welded joints

Надійшла до редакції 07.05.2021

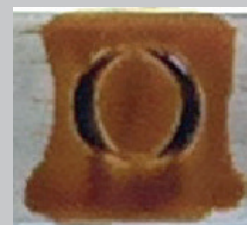
КОМПОЗИЦІЇ НА ОСНОВІ МАГНІТНИХ НАНОЧАСТИНОК ДЛЯ НЕРУЙНІВНОЇ МАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

Призначення: проведення неруйнівної дефектоскопії виробів з магнітних матеріалів із використанням композицій на основі магнітних наночастинок, а також одержання стійкого зображення дефекту завдяки створенню репліки при затвердінні композиції.

Область застосування: дефектоскопія виробів з магнітних матеріалів – сталі, заліза, чавуну.

Основні технічні характеристики та переваги:

Розмір дефектів, які можна виявити	1,2 мкм і більше
Виявлення скритих дефектів, що не виходять на поверхню	до 3 мм під поверхню
Висока контрастність зображення дефекту	так
Можливість фіксації зображення дефекту при затвердінні репліки	так
Низька вартість композиції	так
Відсутність потреби в спеціальному обладнанні	так



Інститут фізичної хімії
ім. Л.В. Писаржевського НАН України

ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ АРМАТУРНИХ КАНАТІВ ЗАХИСНИХ ОБОЛОНОК АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Л.М. Лобанов¹, В.М. Тороп¹, М.Д. Рабкіна¹, В.А. Костін¹, О.О. Штофель²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 57

Збільшення кількості розривів армоканатів після короткого функціонування може бути пов'язане з умовами їх виготовлення та умовами експлуатації. Мета – встановити основні причини передчасних руйнувань високоміцної арматури на основі елементного та структурно-фазового складу сталі, механічних властивостей дротів, а також – характеру пошкоджених поверхонь та характеристик руйнування. Бібліогр. 18, табл. 6, рис. 8.

Ключові слова: армоканат, атомна електростанція, фрактальний підхід, металографічні дослідження, фактографічні дослідження, механіка руйнування, фретінг-корозія

Арматурний канат (армоканат) – це, як правило, багатодротова високоміцна арматура, виготовлена з високовуглецевої сталі, що дозволяє створювати стискаючі напруження в захисних оболонках атомних електростанцій (АЕС) при їх натягу. Випадки розривів дротів при нетривалому функціонуванні армоканатів, що застосовуються на всіх, без винятку, захисних оболонках АЕС ВВЕР-1000 серії В-320 (рис. 1), можуть бути пов'язані як з результатом виробництва (структура і механічні властивості сталі, геометрія перерізу дроту, характер його скручування тощо), так і з умовами експлуатації (знакозмінні і часто високі напруження; нерівномірне навантаження дротів в пучку армоканатів, зокрема, в місцях вигину каната на блоках або барабані; зношування дротів каната внаслідок їх взаємного тертя в місцях торкання і додаткове зношування зовнішніх дротів каната, що стикаються з поверхнею жолоба блоку і барабана; застосування мастильних матеріалів; наявність абразивного пилю і хімічно-активних середовищ тощо) [1–3].

Численні експериментальні дані показують, що зменшення довговічності канату в першу чергу пов'язане зі зменшенням діаметра блоку (чим менше діаметр робочого блоку, тим інтенсивніше зростає число обривів дротів), а також зі збільшенням напружень [4, 5]. Проте однією з причин руйнування арматурних елементів без докладання будь-яких додаткових навантажень в процесі експлуатації енергоблоків є поява мікротріщин в процесі намотування або монтажу арматурного каната і потім їх розвиток при значних напруженнях, що діють в досить тривалий період [6].

Мета роботи – встановити основні причини передчасних відмов високоміцної арматури, виходя-

чи з якості дротів, а також з характеру пошкоджених поверхонь дротів і особливостей зламу.

Матеріали і методи випробувань. Дослідження проводилося на фрагментах зруйнованих дротів, що вийшли з ладу, після різних термінів експлуатації. Уламки довжиною 300...500 мм і діаметром близько 5 мм були отримані з трьох різних ділянок: з нижньої і верхньої ділянок по відношенню до місця руйнування канату, а також неушкодженої ділянки, умовно названої середньою частиною. Слід зазначити, що на зовнішній поверхні всіх досліджених зразків фрагментів є ознаки різного ступеня корозійних пошкоджень. При тому ці ознаки можуть бути в більшій чи меншій мірі виражені як у верхній, так і в нижній частині дротів.

Визначення хімічного складу металу фрагментів виконано на рентгенівському флуоресцентно-



Рис. 1. Закріплення канату

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Тороп В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8807-9811>, Рабкіна М.Д. – <https://orcid.org/0000-0003-3498-0716>, Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>, Штофель О.О. – <https://orcid.org/0000-0003-0965-6340>

© Л.М. Лобанов, В.М. Тороп, М.Д. Рабкіна, В.А. Костін, О.О. Штофель, 2021

му спектрометрі CEP-01 «ElvaxLight» і аналізаторі вуглецю ГОУ-1.

Зразки для металографічних досліджень (мікрошліфи) були виготовлені в поперечному перерізі представлених фрагментів дроту (діаметром близько 5 мм) за стандартною методикою. Для виявлення структури мікрошліфи піддавали хімічному травленню в 4%-му розчині азотної кислоти. Металографічний аналіз здійснювали на мікроскопі NEOPHOT-32. Фотографії мікрошліфів до і після травлення отримані за допомогою цифрової фотокамери OLYMPUS. Мікротвердість за Віккерсом ($HV_{0.1}$) вимірювали на твердомірі М-400 фірми LECO.

До оцінки структури у зв'язку з експлуатаційними властивостями конструкційних сталей застосовано фрактальний підхід, суть якого полягає в обробці масштабуванням фрактальної структури і описів розподілу будь-якої структурної характеристики при даному масштабуванні. Геометричним носієм при масштабуванні є сітка з квадратними осередками різного розміру [6–9].

Короточасні випробування на розтяг зразків, вирізаних з отриманих фрагментів (не менш, ніж на 5-ти зразках з партії) проводили при кімнатній температурі на установці Instron 8802 (рис. 2, а) відповідно до [10]. Швидкість деформування становила 10,0 мм/хв.

Фрактографічні дослідження експлуатаційних зламів і зламів після випробувань на розтяг (рис. 2, б) проводили на стереоскопічному оптичному мікроскопі МБС-10 зі спеціальною насадкою та на растровому електронному мікроскопі JSM-840. Перед фрактографічними дослідженнями експлуатаційних зламів їх очищали від експлуатаційних забруднень, в тому числі від мастил та продуктів корозії, в ультразвуковому диспергаторі

рі УЗДН з використанням 2%-го спиртового розчину щавлевої кислоти з інгібітором і наступним промиванням у петролейному ефірі. Однак з огляду на сильну забрудненість пошкодженого каната повністю очистити поверхню зламів від артефактів не завжди вдавалось.

Результати і їх обговорення. Як можна бачити (табл. 1), досліджуваний метал дротів (згідно з табл. 2) належить до вуглецевих сталей: ст. 70 (АК Ц), ст. 80 (АК 1Ц, АК 25Ц, АК 49Ц) і ст. 85 (АК 64Ц). Слід зазначити, що для всіх відібраних проб розсіювання за хімічним складом в залежності від місця вибірки знаходиться в межах допустимих значень.

Звертає на себе увагу підвищений вміст нікелю в металі дротів АК 49Ц в порівнянні зі стандартними значеннями. Однак, як відомо, у комбінації із хромом і молібденом нікель ще більше підвищує здатність сталей до втомної міцності і термічного зміцнення, а також сприяє підвищенню в'язкості, розчиняючись в фериті. Крім того, нікель повинен забезпечити стійкість проти корозії.

Мікроструктура. На полірованій поверхні мікрошліфів поперечного перерізу досліджуваних дротів в цілому спостерігаються світло-сірі круглі включення – сульфід, забрудненість якими не перевищує бал № 2 за [12]. Також зустрічаються поодинокі оксиди і оксисульфід. В деяких випадках виявлено поодинокі включення силікатів. Їх наявність навіть в самій забрудненій частині не перевищує бал №1 відповідно до [12].

Аналіз розподілу мікротвердості в поперечних перерізах дротів показав, що як в ушкоджених, так і в неушкоджених фрагментах приповерхневі шари мають підвищену твердість в порівнянні з центральною частиною (табл. 3).

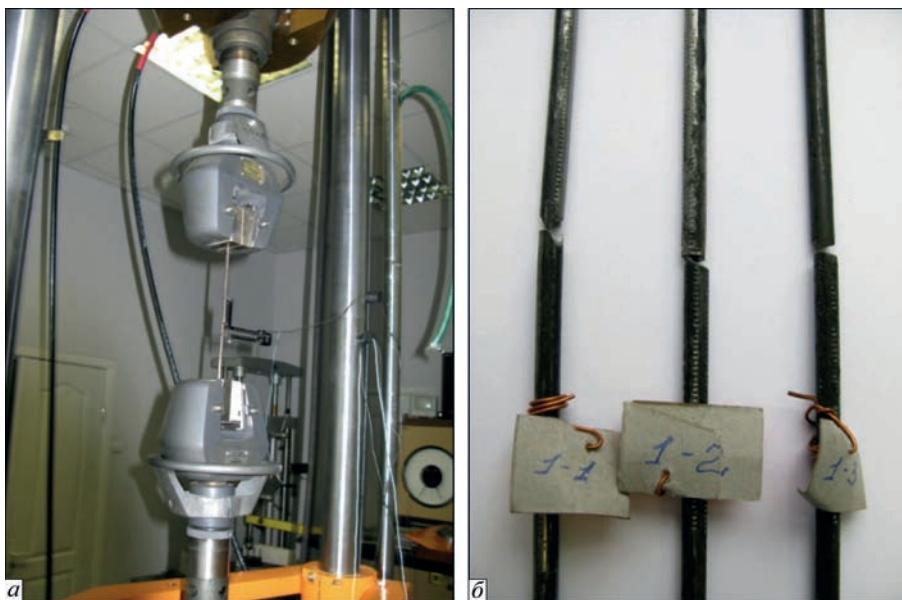


Рис. 2. Установка Instron 8802 для механічних випробувань на розтяг (а) і зразки після випробувань (б)

Таблиця 1. Хімічний склад метала ушкоджених і неушкоджених частин дротів

Проба	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
AK Ц (AK5) ст.70								
Верх	0,680	0,370	0,620	0,240	0,120	0,024	0,015	-
Низ	0,720	0,400	0,800	0,150	<0,100	0,029	0,031	-
Середина	0,780	0,370	0,670	0,300	0,160	0,040	0,020	-
AK 1Ц (AK6) ст. 80								
Низ	0,800	0,196	0,564	0,149	-	0,005	0,010	0,124
Верх	0,830	0,178	0,580	0,115	0,080	0,008	0,015	0,189
Середина	0,800	0,197	0,546	0,059	-	0,003	0,016	0,043
AK 25Ц (AK1) ст. 80								
Верх	0,800	0,310	0,566	0,114	-	0,01	0,015	0,177
Низ	0,805	0,260	0,569	0,144	0,045	0,01	0,014	0,133
Середина	0,800	0,230	0,450	0,153	-	0,01	0,015	0,184
AK 49Ц (AK2) ст. 80								
Верх	0,800	0,323	0,540	0,129	0,680	0,01	0,020	0,080
Низ	0,800	0,234	0,470	0,123	0,680	0,01	0,020	0,093
Середина	0,800	0,326	0,570	0,126	0,700	0,01	0,017	0,138
AK 64Ц (AK3) ст.85								
Верх	0,880	0,303	0,440	0,104	-	0,01	0,015	0,034
Низ	0,840	0,234	0,396	0,106	-	0,01	0,015	0,031
Середина	0,895	0,285	0,412	0,109	-	0,01	0,014	0,047

Таблиця 2. Хімічний склад сталі [11]

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
Ст.70	0,67...0,75	0,17...0,37	0,5...0,8	≤0,25	≤0,25	≤0,035	≤0,035	≤0,2
Ст.80	0,77...0,85	0,17...0,37	0,5...0,8	≤0,25	≤0,25	≤0,035	≤0,035	≤0,2
Ст.85	0,82...0,90	0,17...0,37	0,5...0,8	≤0,25	≤0,25	≤0,035	≤0,035	≤0,2

Що стосується верхньої і нижньої частин дротів відносно розриву, то в цілому вони мають підвищену твердість у порівнянні з неушкодженою (середньою) частиною, що може також свідчити про деяке зміцнення при наклепі, яке призводить в результаті експлуатації до приповерхневого руйнування.

Таким чином, неоднорідність розподілу твердості в дротах може бути наслідком декількох чинників. Це – хімічний склад, початкова термообробка при виготовленні, можливий локальний розігрів в результаті деформацій розтягу чи вигину, саме розтягнення як вид механічного впливу і нерівномірна релаксація напружень в дротах армоканатів.

Слід зазначити, що властивості вуглецевої сталі, зокрема твердість, залежать не тільки від хімічного складу сплаву (перш за все вуглецю), але також і від технології отримання елементів конструкції (зокрема структура) і наступних умов експлуатації. Так, мікроструктура ст. 70 (AK Ц) в основному представлена дрібнодисперсним тонкопластинчастим сорбітом з рідкими вкрапленнями так званих «розеток троостіту» (рис. 3).

Таблиця 3. Дані дюрOMETричного аналізу металу дротів

Місце заміру частини		Мікротвердість ($HV_{0.1}$), кгс/мм ²
дроту	шліфа	
АК Ц ст. 70		
Верх	Центр	421...433
	Край	421...442
Низ	Центр	423...442
	Край	437...442
Середина	Центр	425...433
	Край	421...433
АК 25Ц ст. 80		
Верх	Центр	397...421
	Край	405...417
Низ	Центр	380...409
	Край	376...417
Середина	Центр	376...413
	Край	409...437
АК 64Ц ст. 85		
Верх	Центр	417...421
	Край	409...417
Низ	Центр	405...409
	Край	405...429
Середина	Центр	351...376
	Край	357...421

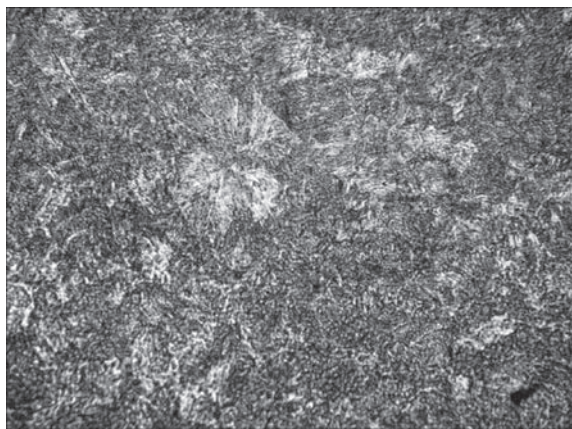


Рис. 3. «Розетка троостіту» в нижній частині дроту АК Ц, $\times 1000$

У той же час мікроструктуру ст. 80 (АК 1Ц, АК Ц25, АК 49) і ст. 85 (АК Ц64) представлено сорбіто-троостітною сумішшю (рис. 4). Твердість сорбіту за Віккерсом зазвичай не перевищує величини близько 300 кгс/мм^2 , троостіту – близько 400 кгс/мм^2 . В результаті виготовлення дроту на останніх етапах під час волочіння відбувається деформація як пластин фериту, так і цементиту. В процесі навантаження перед руйнуванням внаслідок зменшення областей вільного переміщення дислокацій підвищується твердість і, відповідно, міцність такої деформованої структури (верхня і нижня проби).

Таким чином, аналіз хімічного складу дротів показав, що в цілому згідно до [11] всі вони відповідають вуглецевій сталі марок ст. 70, 80 і 85 із змінною, залежно від марки, структурою від дрібнодисперсного сорбіту з «розетками троостіту» до сорбіт-троостітної суміші.

Крім хімічного складу і структури на величину міцності і опір руйнуванню армоканатів впливає нерівномірне навантаження дротів в пучку, про що свідчить різке падіння показників пластичності (відносного подовження і відносного поперечного звуження), а також значний розкид цих характеристик при випробуваннях дротів, відібраних з ушкоджених частин (табл. 5). При цьо-

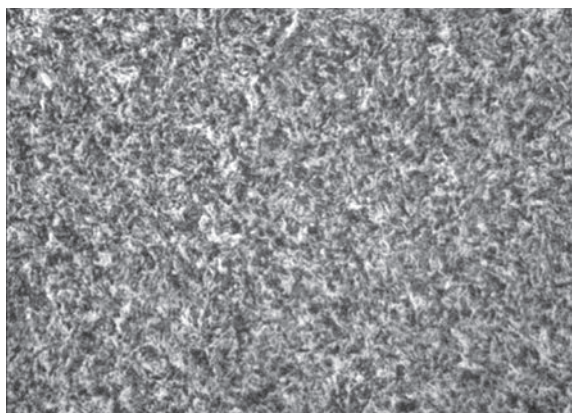


Рис. 4. Сорбіто-троостітна суміш в верхній частині дроту АК Ц25, $\times 500$

му слід зауважити, що товщини усіх розглянутих дротів, крім дротів АК 64Ц, не відповідають стандартному значенню, відрізняючись від нього близько на 1,5 % (табл. 4).

Цей фактор разом з хімічним складом і технологією одержання дроту також може впливати не тільки на показники міцності, а й на опір руйнуванню готового каната. Крім низьких показників пластичності, особливо відносного звуження та тенденції до окрихчення, також показують близькі значення межі міцності (тимчасового опору) і межі текучості на кривій деформування. Значний розкид характеристик пластичності також може побічно свідчити про можливість лавиноподібного руйнування дротів канату при його попередньому навантаженні.

Складається ситуація, коли після досягнення найменшого значення межі текучості для декількох з 456 дротів в канаті зусилля почне розподілятися нерівномірно і навантаження різко зросте на ті дроти, в яких характеристики пластичності низькі, і вони почнуть крихко руйнуватися при вичерпанні пластичного деформування, тим самим передаючи зусилля, що залишилося, на інші, більш пластичні дроти. У зв'язку з цим, доречно виконати перевіірочні розрахунки на міцність, які враховують нерівномірний розподіл навантажень на армоканати і дроти в них.

Цікаво відзначити, що дроти різних класів можуть мати практично однакові механічні вла-

Таблиця 4. Геометричні характеристики дротів

Проба	Діаметр, мм	Загальна довжина L , мм	Довжина робочої частини l_0 , мм	Площа F , мм^2
АК Ц				
Верх	4,93	292,0	190,0	19,08
Низ	4,93	255,0	166,0	19,08
Середина	4,93	298,0	199,5	19,08
АК 1Ц				
Верх	4,93	200,0	100,0	19,08
Низ	4,93	200,0	100,0	19,08
40 м від коуша	4,93	200,0	100,0	19,08
170 м від коуша	4,94	200,0	100,0	19,16
АК 25Ц				
Верх	4,93	211,0	111,0	19,08
Низ	4,84	209,0	109,0	18,40
Середина	4,93	211,0	111,0	19,08
АК 49Ц				
Верх	4,93	210,0	110,0	19,08
Низ	4,93	210,0	110,0	19,08
Середина	4,93	209,5	110,0	19,08
АК 64Ц				
Верх	5,01	210,0	111,0	19,70
Низ	5,02	209,0	109,0	19,79
Середина	5,03	209,0	109,0	19,87

стивості (табл. 5). У той же час дріт зі ст. 80 (АК 25Ц), що займає проміжне значення за змістом вуглецю, має найвищий тимчасовий опір і межу плинності в порівнянні з іншими розглянутими варіантами. Це також корелює зі значеннями твердості (табл. 3), що зайвий раз свідчить про вплив умов виготовлення та експлуатації.

Що стосується верхньої і нижньої частин дротів (табл. 5), слід зазначити, що показники міцності знаходяться в допустимих межах вимог [13, 14]. Однак в характеристиках пластичності має місце значна нестабільність, особливо коли руйнування відбувається по дефекту, що може бути наслідком накопичення при експлуатації пошкоджень в металі поблизу місця розриву. Отримані результати добре узгоджуються з даними фрактального аналізу (табл. 5), який буде розглянуто нижче. Щодо армоканату АК Ц, найменшим запасом пластичності характеризується метал верхньої частини (табл. 5), що також узгоджується з даними пошкодженості ω . В армоканаті АК 1Ц між різними частинами дротів спостерігається більш-менш стабільна картина, що віддзеркалюється на результатах ω . Проте в деяких зразках з верхньої частини розрив почався з тріщини, що розвивалася на зовнішній поверхні дроту. В результаті відносно подовження цього зразка дорівнює нулю, а відносно звуження 2,4 %. Тимчасовий опір і межа плинності дротів армоканату АК 25Ц відповідають стандартним вимогам,

а в разі середньої, незруйнованої частини навіть перевищують ці значення (табл. 5), що може бути обумовлено наявністю хрому (табл. 1), як за рахунок легування твердого розчину, так і за рахунок утворення додаткових фаз. Щодо нижньої частини дроту, високі значення характеристик міцності супроводжуються різким зниженням характеристик пластичності ($\delta = 1,4$ % та $\varphi = 2,3$ %), що може вказувати на схильність металу до крихкого руйнування. Механічні характеристики дротів армоканату АК 49Ц незруйнованої частини (табл. 5) відповідають їх виготовленню згідно з [14]. Характеристики міцності верхньої і нижньої частин АК 49Ц також практично не відрізняються від стандартних значень. Проте характеристики пластичності значно нижчі, особливо в верхній частині дроту, де в деяких зразках розрив починався з дефекту. Як видно з отриманих результатів механічних випробувань, тимчасовий опір дротів армоканату АК 64Ц (середня, незруйнована частина) відповідає їх виготовленню згідно з [14]. Необхідно також підкреслити, що в разі нижньої частини розрив супроводжується зниженням характеристик пластичності ($\delta = 3,2$ % та $\varphi = 13,1$ %), що також відображається на значеннях ω .

Фрактальні чинники і пошкодженість. Для опису металу дротів АК методом фрактального аналізу використовували знімки мікроструктури металу та неметалевих включень. Це в певній мірі

Таблиця 5. Механічні властивості і фрактальні характеристики металу дротів

Проба	Тимчасовий Опір $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Межа текучості $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження φ , %	Фрактальна розмірність		Пошкодженість ω
					структури $D_{\text{ст}}$	включень $D_{\text{вк}}$	
АК Ц ст. 70							
Верх	1720,8	1684,2	1,0	8,0	-	1,005	0,07
Низ	1704,0	1483,5	2,1	12,7	1,973	0,961	0,36
Середина	1767,7	1583,1	5,0	37,7	-	0,922	0,58
АК 1Ц ст.80							
Верх *	1758,8	1540,0	4,2	40,6	1,921	0,927	0,54
Низ	1699,6	1543,7	3,5	25,2	1,951	0,932	0,51
Середина	1762,1	1543,7	4,6	46,6	1,926	0,925	0,56
АК 25Ц ст. 80							
Верх	1771,3	1639,0	4,0	29,3	1,746	0,897	0,53
Низ	1812,4	1670,9	1,4	2,3	1,828	1,036	0,20
Середина	1818,6	1634,8	5,0	37,6	1,790	1,127	0,57
АК 49Ц ст. 80							
Верх *	1664,4	1469,0	1,1	10,8	1,957	0,998	0,13
Низ	1741,6	1530,4	2,2	15,7	1,932	0,951	0,38
Середина	1806,0	1586,2	5,2	37,2	1,901	0,920	0,58
АК 64Ц ст. 85							
Верх	1785,0	1544,4	4,2	34,2	1,913	0,927	0,54
Низ	1695,1	1370,2	3,2	13,1	1,948	0,936	0,49
Середина	1754,3	1456,9	6,3	46,8	1,923	0,909	0,63

дає можливість описати зв'язки механічних характеристик із фрактальною розмірністю D і пошкодженістю ω (табл. 5).

Фрактальну розмірність двовимірних зображень визначали методом осередків (box method) [8]. Для встановлення фрактальної розмірності меж зерен на обрану криву накладали елементарні сітки, які складалися з квадратів зі сторонами розміром l_i . При цьому підраховували кількість квадратів $N(l_i)$, які перетинає крива. Далі змінювали масштаб сітки, а отже, і сторін квадрата $l_2 > l_3 > \dots > l_n$. Масштаб сітки такий: (4×4) ; (2×2) ; (1×1) ; $(0,5 \times 0,5)$; $(0,25 \times 0,25)$ см. Щоразу обчислювали кількість квадратів $N(l_2)$, $N(l_3)$, ..., $N(l_n)$, які перетинає крива, і результати вносили в таблицю. Виявили, що кількість квадратів $N(l_i)$ залежить від розміру їх сторони l_i :

$$N(l) \propto l^{-D} \quad (1)$$

де D – фрактальна розмірність [9].

У подвійних логарифмічних координатах будували графіки $\lg N(l_i) - f(\lg l_i)$. Тангенс кута нахилу графіка до осі $\lg l_i$ дорівнював фрактальній розмірності D [6–9]. Похибка визначення не перевищує 5 %.

Пошкодженість матеріалу ω визначалась через зміну макромеханічного параметра жорсткості матеріалу, а саме через зміну модуля пружності згідно з (2). При аналізі пошкодження дротів був використаний симетричний тензор пошкодження другого порядку ω [15]:

$$\omega = 1 - \sqrt{E/E_0}, \quad (2)$$

де E_0 і E – модуль пружності неушкодженого матеріалу і поточний модуль, який визначається з випробувань на одновісний розтяг, відповідно.

Як впливає із аналізу табл. 5, найменші показники пластичності (δ і φ) відповідають найменшим значенням пошкодження ω .

Раніше було встановлено залежність характеру руйнування від показника ω і фрактальної розмірності структури D_{cr} , не беручи до уваги окремих вплив неметалевих включень [6].

Зі збільшенням деформації збільшується частка дислокацій, пор, мікротріщин, які в міру розвитку деформації об'єднуються, ростуть і призводять до збільшення пошкодженості [16, 17]. Пошкодженість з мікроскопічної точки зору – це сума всіх дефектів кристалічної будови. І в кінці настає момент, коли сума пошкоджень перевищує деяке критичне значення, що і призводить до руйнування. Якщо інтерпретувати пошкодженість як відношення площі перетину, зайнятої мікропорами і мікротріщинами, до номінальної площі перетину зразка, то пошкодженість при крихкому руйнуванні відповідає дефектам, створеним без макроскопічних пластичних деформацій. Саме

при крихкому руйнуванні (в порівнянні з в'язким) меншому значенню ω відповідає більша величина фрактальної розмірності і менша пластичність.

Таким чином, в досліджених експлуатаційних зламах канатів, задіяних в захисних оболонках реакторної установки ВВР-1000, виявлено певний зв'язок між особливостями руйнування, пов'язаними з пошкодженням, і показниками фрактальних розмірностей, а саме: більш крихкому руйнуванню відповідає вище значення фрактальної розмірності з меншим показником пошкодженості матеріалу. При цьому виявлено лінійну залежність відносного подовження від пошкодженості. Отримано експериментальні результати щодо взаємно однозначної відповідності між якісними характеристиками досліджуваного металу і фрактальною розмірністю його мікроструктури та включень. Так, для оцінки експлуатаційних пошкоджень в армоканатах АЕС було застосовано підхід мультифрактальної параметризації, головною перевагою якого було підтвердження існування взаємно однозначної відповідності між фрактальною розмірністю мікроструктури металу та його кількісними характеристиками.

Виявлено залежність фрактальної розмірності і середніх значень механічних властивостей (границі міцності σ_b і пластичності $\sigma_{0,2}$), а також зв'язок між характером руйнування досліджених дротів залежно від пошкодженості металу і фрактальною розмірністю: крихкіший злам характеризується нижчим значенням фрактальної розмірності. Отже, досліджено, що фрактальна розмірність змінюється в залежності від неметалевих включень. Можна припустити, що концентрація включень саме і провокує місце руйнування.

Фрактографічні дослідження. Для подальших досліджень були відібрані злами, взяті безпосередньо з місця руйнування (рис. 5), а також зразків, зруйнованих в результаті випробувань на розтяг (рис. 6–8).

В цілому картину поверхонь експлуатаційних руйнувань дротів доцільно розглянути з точки зору хімічно-активних середовищ у загальному процесі розвитку корозійної тріщини зі слідами втоми (рис. 5). Розрізняють інкубаційний період (до появи зародкової тріщини) і періоди розвитку тріщини і крихкого руйнування при перевищенні локальної міцності матеріалу. Інкубаційний період визначається створенням умов для різкої локалізації корозійного процесу на дефектах поверхні напруженого металу. Він, як правило, скорочується зі зростанням діючих напружень, температури, концентрації активних компонентів середовища. При цьому виявляється, що швидкість розвитку тріщини залежить від того, в якому середовищі була отримана початкова тріщина. У тому випадку, коли

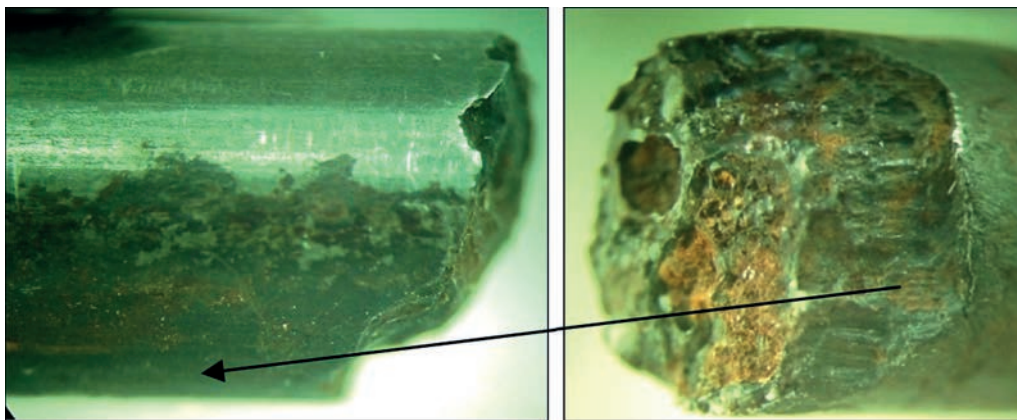


Рис. 5. Поверхня зламів дротів експлуатаційного руйнування з нижньої частини АК ІЦ

при подальшому розвитку внаслідок змін умов навантаження змінюється характер руйнування (міжзеренний на внутрішньозеренний або навпаки), швидкість росту тріщини змінюється.

Таким чином, поверхня експлуатаційного руйнування являє собою магістральну тріщину, що утворилось з декількох джерел, які зливаються на поверхні, охоплюючи весь поперечний переріз дроту, чи то численні дрібні ямкові поглиблення, чи то ямкові поглиблення, що чергуються з фасетками відколу, які покриті плівкою розтрісканих не розчинених продуктів корозії.

Загальну картину поверхні руйнування дротів після випробувань на розтяг в цілому можна представити у вигляді наступних типових зон, які добре узгоджується з уявленнями, що зазначено в роботі [18]: 1 – волокниста зона (зона стабільного росту тріщини), що утворюється за механізмом злиття мікропор. В основному ця зона доводиться на центр руйнування і представляє переважно в'язкий ямковий злам (рис. 6, а); 2 – радіальна зона (зона нестабільного росту тріщини), що складається з характерних радіально розташованих в напрямку руйнування «рубців»; 3 – зона, що примикає до зовнішнього периметру поперечного перерізу дроту (зона зрізу), розташовується приблизно під кутом 45° по відношенню до загальної поверхні руйнування, тоді як поверхні волокнистої і радіальної зон зазвичай перпендикулярні осі розтягнення. Так, в частині дроту АК ІЦ, що перебувала поза зоною експлуатаційного руйнування (рис. 6, а), спостерігаються приблизно рівнознач-

ні наступні три зони: центральна зона зародження тріщини з в'язким ямковим зломом; зона, де має місце нестабільне зростання тріщини з вторинними тріщинами і радіальними «хребтами»; зона з в'язким завершенням руйнування.

Для нижньої (рис. 6, б) і особливо для верхньої частини (рис. 6, в) щодо розриву дроту характерне зміщення осередку руйнування на поверхневий дефект. Поверхню руйнування займає в основному крихка складова зона з великими радіальними «хребтами». Численні вторинні тріщини в крихкій матриці (рис 7, а) і сам характер її руйнування свідчить про наявність крихких фаз, що відносяться найімовірніше до троостітної структури. Крім того, на поверхні зламу спостерігаються значні плівкові виділення, що швидше за все належать до з'єднань кальцію (рис. 7, б, табл. 6). Можливо, їх наявність пов'язана з умовами експлуатації і не є результатом виготовлення дроту, оскільки їх присутність виявлено тільки в нижній частині зразка. Також на поверхні зламу має місце дуже багато сірки ($0,39 \dots 0,5 \%$), тоді як у дослідних сталей (табл. 2) її повинно бути $\leq 0,035 \%$. Ймовірно виділення сірки по границях зерен сприяло їх окрихченню з подальшим руйнуванням.

У зв'язку з підвищенням ресурсу конструкцій і рівня напружень останнім часом зросла ймовірність появи фреттінг-корозії. Так, поверхня дроту, що пошкоджена контактним вищербленням, покрита виразками приблизно однакової глибини, які взаємно перекриваються (рис. 8). При цьому

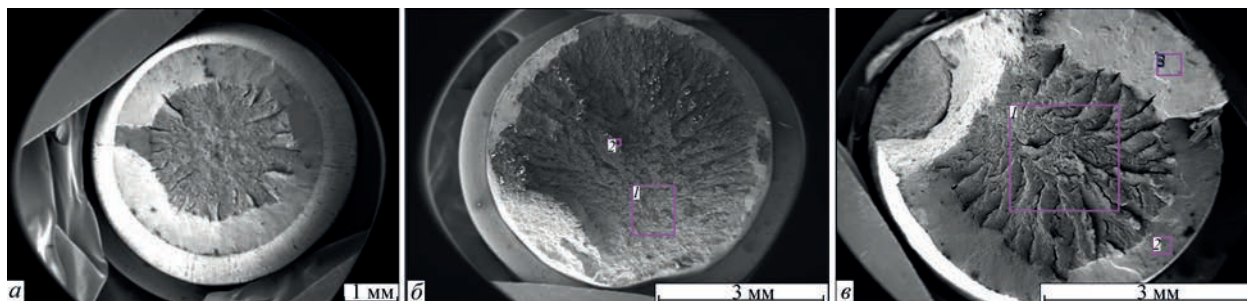


Рис. 6. Загальний вид поверхні руйнування в дротах АК ІЦ: а – середина, б – низ, в – верх

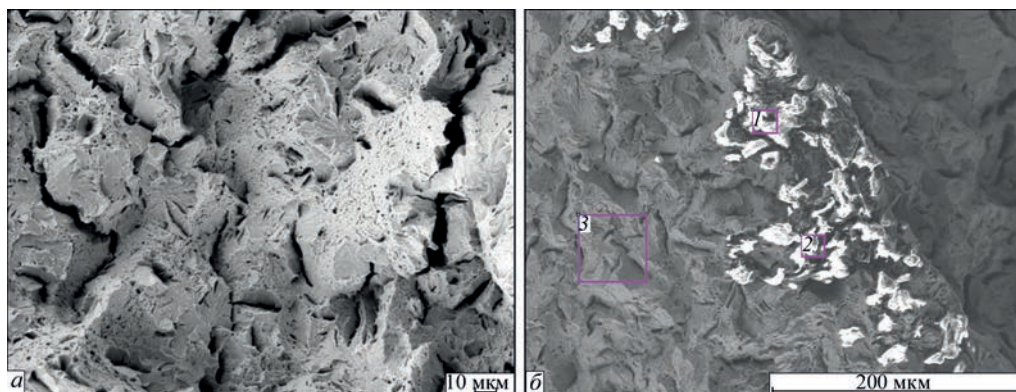


Рис. 7. Чисельні вторинні тріщини у крихкій матриці (а) і неметалеві плівкові включення (б) на нижній частині зламу АК Ц (див. рис.6, б)

Таблиця 6. Хімічний склад плівкових включень на поверхні зламу, атомні %

Спектр	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
1	72,70	22,52	0,31	0,27	0,20	0,69	0,50	0,08	0,15	0,38	0,15	2,07
2	76,92	20,30	0,21	0,29	0,09	0,44	0,39	0,18	0,14	0,35	0,05	0,65
3	0,00	12,50	0,00	0,00	0,11	0,28	0,10	0,08	0,00	0,00	0,78	86,15



Рис. 8. Зовнішня поверхня дротів армоканату АК 49Ц після випробувань на короткочасне розтягування: а – на відстані 170 м від коушу; б – на відстані 40 м від коушу; в – з нижньої (щодо розриву) частини

руйнування має багатоосередковий характер, в області джерела спостерігаються рубці, які утворилися при злитті декількох тріщин. На поверхні зламу мають місце тріщини, паралельні магистральній. У початковій зоні зламу виявляються продукти фреттінгу.

У той час, як із зовнішнього боку дроту, що знаходиться далеко від розриву, спостерігається абсолютно гладка поверхня (рис. 8, а), у міру наближення до місця розриву зовнішня поверхня характеризується наявністю окремих подряпин (рис. 8, б). А поблизу руйнування чітко видно результат поверхневого контактного викришування (рис 8, в), яке утворюється на поверхні металевих деталей при багаторазовому додаванні контактних навантажень і відносному коливальному русі, що виявляється в слідах втоми (рис. 5 і 8, в). При цьому руйнування починається з поверхневих дефектів, які є результатом фреттінг-корозії. У свою чергу, утворення фреттінг-корозійних тріщин обумовлене виразковою та структурно-виборчою корозією.

Так, в армоканаті АК 49Ц фреттінг-корозійні руйнування як у верхній, так і в нижній частині поверхні в основному мають в'язкий ямковий злам з численними «віспинами». Місцями ділянки поверхні зламу нагадують розтріскану плівку на поверхні фасеток. У той же час в нижній частині

дротів каната, крім посипаних більшими, порівняно з верхньою частиною, ямками, спостерігається також крихка складова, що нагадує, як і в попередньому випадку, розтріскану плівку на поверхні руйнування. У середній частині дротів, як і в випадку АК 1Ц, слідів фреттінг-корозійного пошкодження практично не виявлено.

Висновки

1. Аналіз хімічного складу розглянутих дротів свідчить про їх відповідність до наступних марок: ст. 70, ст. 80 і ст. 85 [11], з гетерогенною структурою – сорбіту та троостіту. Дріт із структурою сорбіту має надзвичайно високий запас пластичності і зміцнюється до дуже високих значень тимчасового опору і межі плинності. Зі збільшенням ступеня деформації при волочінні дроту зі структурою сорбіту відбувається деформація як пластинок фериту, так і цементиту. У той же час наявність троостіту в металі свідчить про істотне зменшення характеристик пластичності та схильність до крихкого руйнування.

2. Опір руйнуванню армоканатів, крім хімічного і структурно-фазового складу сталі, залежить від товщини дротів, і, перш за все, від умов експлуатації. Одна з причин руйнування арматурних канатів без докладання будь-яких додаткових навантажень при експлуатації енергоблоків обумов-

лена появою мікротріщин в процесі намотування або монтажу арматурного каната, і потім розвиток їх при значних напруженнях, що діють в довший протяжний період. Численні сліди корозії на зовнішній поверхні досліджуваних фрагментів свідчать про джерела зародження фреттінг-корозійних тріщин. Тріщини, що зародилися з декількох джерел, на поверхні зливаються в магістральну, охоплюючи весь поперечний переріз дроту.

3. Умови виготовлення, монтажу і експлуатації дротів армоканатів істотно впливають на їх ресурс, так як при цьому для окремих дротів попереднє навантаження і релаксація напружень можуть привести до їх пластичної течії, окрихнення або руйнування, що в свою чергу приводить до нерівномірного навантаження дротів в армоканаті.

4. Виявлено залежність фрактальної розмірності і середніх значень механічних властивостей, а також зв'язок між характером руйнування досліджених дротів залежно від пошкодженості металу і фрактальною розмірністю – крихкіший злам характеризується нижчим значенням фрактальної розмірності.

5. Характер руйнування дротів в процесі експлуатації і в результаті механічних лабораторних випробувань істотно відрізняється. Так, в процесі експлуатації руйнування, як правило, починається з дефектів зовнішньої поверхні, тоді як під час випробувань руйнування починається з центральної частини поперечного перерізу або з явних концентраторів на поверхні. При зіставленні цих зламів і поверхонь руйнування в процесі експлуатації стає очевидним, що руйнування внаслідок короткочасних випробувань має зовсім інший характер у порівнянні з руйнуванням, що виникло в результаті фреттінг-корозії під напруженням. Наявність фреттінг-корозійних пошкоджень на зовнішній поверхні дротів в поєднанні з низькими значеннями показників пластичності досліджених зразків з цих ділянок дозволяють припустити, що руйнування армоканатів відбувається внаслідок нерівномірного навантаження та обриву окремих дротів, що може привести до лавиноподібного руйнування армоканату.

Список літератури

1. (1989) *Инструкция по техническому обслуживанию системы преднапряжения защитных оболочек головной серии и модернизированной конструкции для АЭС с энергоблоками ВВЭР-1000 типов 302, 338 и 187*. Москва.
2. Рапина К. А. (2013) Конструкции защитных железобетонных оболочек ядерных установок. *Будівельні конструкції*, 78(1), 84–91.
3. Савицкий Н.В., Швеца В.Б., Седин В.Л. и др. (2012) Система обеспечения надежности строительных конструкций АЭС и ТЭС Украины. *Строительство, материаловедение, машиностроение*, 65, 531–540.
4. *Report on Aging of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures*. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6424/>

5. *Bonded or Unbonded Technologies for Nuclear Reactor Prestressed Concrete Containments*. URL: <https://www.oecd-neo.org/nsd/docs/2015/csni-r2015-5.pdf>
6. Тороп В.М., Рабкина М.Д., Штофель О.О., Усов В.В., Шкатуляк Н.М., Савчук О.С. (2018) Про причини руйнування арматурних канатів захисних оболонок атомних енергоблоків АЕС. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 2, *Physicochemical Mechanics of Materials*, 54(2), 98–106.
7. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксагоев А.А. (1994) *Синергетика и фракталы в материаловедении*, Москва, Наука.
8. Усов В.В., Рабкина М.Д., Шкатуляк Н.М., Чернева Т.С. (2014) Фрактальна розмірність границь зерен і механічні властивості металу кисневих балонів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 4, 117–124.
9. Dubuc, B., Roques-Carmes, C., Tricot, C., Zucker S.W. (1989) Evaluating the fractal dimension of profiles. *Phys. Rev. A*, 39(2), 1500–1512.
10. (1984) ГОСТ 1497-84 *Металлы. Методы випробувань на розтягування* (ISO 6892-84, СТ СЭВ 471-88).
11. (1979) ГОСТ 14959-79 *Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия. С изменениями № 1, 2, 3, 4, 5, 6*.
12. (1970) ГОСТ 1778-70 *Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений* (ИСО 4967-79).
13. (1981) ГОСТ 7348-81 (СТ СЭВ 5728-86) *Дрит з вуглецевої сталі для армування заздалегідь напружених залізобетонних конструкцій. Технічні умови*.
14. (1995) ТУ У 00191046.014-95 *Проволока круглая диаметром 5,0 мм из углеродистой стали для армирования предварительно напряженных защитных оболочек АЭС*.
15. Hansen, N.R., H.L. Schreyer, A. (1994) Thermodynamically Consistent Framework for Theories of Elastoplasticity Coupled with Damage. *Int. J. Solids Struct.*, 31(3), 359–389.
16. Lemaitre, J., Dufailly, J. (1987) Damage measurements. *Engineering Fracture Mechanics*, 28(516), 643–661.
17. Bonora, N., Ruggiero, A., Gentile, D., De Meo, S. (2011) Practical Applicability and Limitations of the Elastic Modulus Degradation Technique for Damage Measurements in Ductile Metals. *Strain*, 47, 241–254.
18. (1982) *Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник*. Москва, Металлургия, 36–38.

References

1. (1989) *Instructions on maintenance of containment prestressing system of the main series and upgraded design for NPP with power units WWER-1000 of 302, 338 and 187 types*. Moscow [in Russian].
2. Rapina, K.A. (2013) Designs of reinforced concrete shields of reactor units. *Budivelnii Konstruktsii*, 78(1), 84–91 [in Russian].
3. Savitsky, N.V., Shvets, V.B., Sedin, V.L. et al. (2012) System of ensuring the safety of building structures of Ukrainian NPP and TPP. *Stroitelstvo, Materialovedenie, Mashinostroyeniye*, 65, 531–540 [in Russian].
4. Report on Aging of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6424/>
5. Bonded or Unbonded Technologies for Nuclear Reactor Prestressed Concrete Containments. URL: <https://www.oecd-neo.org/nsd/docs/2015/csni-r2015-5.pdf>
6. Torop, V.M., Rabkina, M.D., Shtofel, O.O. et al. (2018) On the causes for fracture of reinforcement ropes of containment of NPP nuclear power units. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 54(2), 98–106 [in Ukrainian].
7. Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.Zh., Oksagoev, A.A. (1994) *Synergy and fractals in materials science*. Moscow, Nauka [in Russian].
8. Usov, V.V., Rabkina, M.D., Shkatulyak, N.M., Cherneva, T.S. (2014) Fractal dimension of grain boundaries and mechanical properties of oxygen cylinder metal. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 4, 117–124 [in Ukrainian].

9. Dubuc, B., Roques-Carmes, C., Tricot, C., Zucker, S.W. (1989) Evaluating the fractal dimension of profiles. *Phys. Rev. A.*, **39**(2), 1500–1512.
10. (1984) GOST 1497-84: *Metals. Methods of tension test* (ISO 6892-84, CT SMEA 471-88) [in Ukrainian].
11. (1979) GOST 14959-79: *Spring carbon and alloy steel bars. Specifications. Modifications Nos. 1, 2, 3, 4, 5, 6* [in Russian].
12. (1970) GOST 1778-70: *Steel. Metallographic methods for the determination of nonmetallic inclusions* (ISO 4967-79) [in Russian].
13. (1981) GOST 7348-81: *Carbon steel wire for reinforcement of prestressed concrete constructions. Specifications.* (CT SMEA 5728-86) [in Ukrainian].
14. (1995) TU U 00191046.014-95: *5.0 mm diameter round wire from carbon steel for reinforcement of prestressed containment vessels of NPP* [in Russian].
15. Hansen, N.R., Schreyer, A. (1994) Thermodynamically consistent framework for theories of elastoplasticity coupled with damage. *Int. J. Solids Struct.*, **31**(3), 359–389.
16. Lemaitre, J., Dufailly, J. (1987) Damage measurements. *Engineering Fracture Mechanics*, **28**(516), 643–661.
17. Bonora, N., Ruggiero, A., Gentile, D., De Meo, S. (2011) Practical applicability and limitations of the elastic modulus degradation technique for damage measurements in ductile metals. *Strain*, **47**, 241–254.
18. (1982) *Fractography and atlas of fractograms: Refer. book.* Moscow, Metallurgiya, 36–38 [in Russian].

FEATURES OF THE DESTRUCTION OF REINFORCING ROPES IN NUCLEAR POWER PLANT CONTAINMENT

L.M. Lobanov¹, V.M. Torop¹, M.D. Rabkina¹, V.A. Kostin¹, O.O. Shtofel²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: kvas69@ukr.net

The increased number of ruptures in reinforcing ropes after short-time functioning may be associated with their manufacturing and operating conditions. The objective is to establish the main causes of premature breakage of high-strength reinforcement bars, based on the elemental and structural-phase composition of steel, mechanical properties of the wires, as well as the nature of the damaged surfaces and fracture characteristics. 18 Ref., 6 Tabl., 8 Fig.

Keywords: reinforcing rope, nuclear power plant, fractal approach, metallographic investigations, fractographic investigations, fracture mechanics, fretting-corrosion

Надійшла до редакції 26.04.2021

НОВА КНИГА

Недосека А.Я., Недосека С.А. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: Издательство «ИНДПРОМ», 2020. – 886 с, 406 рис., 35 табл. – Библиогр.: 18 назв.

Изложены основные проблемы, связанные с обеспечением безопасности эксплуатации конструкций и сооружений, возникающие при расчете их прочности, при испытаниях и в процессе эксплуатации. Большое внимание уделено теории, методам и средствам диагностики и оценки состояния материала конструкций, его остаточному ресурсу. Изложены основные вопросы теории прогнозирования и принятия решений при оценке состояния конструкций. Освещены современные методы расчета и измерения температурных полей, напряжений и деформаций, показаны способы борьбы с вредными последствиями сварочных напряжений и деформаций, рассмотрены основы классической и квантовой механики разрушения.

Предназначена для студентов, аспирантов и преподавателей машиностроительных специальностей вузов, для специалистов, проходящих переподготовку на курсах повышения квалификации по направлению «Техническая диагностика», а также для инженеров предприятий и организаций, занимающихся контролем и диагностикой конструкций.

Глава 1. Температурное поле при сварке

Глава 2. Сварочные напряжения и деформации

Глава 3. Несущая способность сварных конструкций

Глава 4. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных конструкций

Глава 5. Акустическая эмиссия

Глава 6. Дополнительные разделы

Приложения



Замовлення на книгу прохання надсидати до редакції журналу.

Тел.: (044) 200-82-77, E-mail: journal@paton.kiev.ua

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РАННЬОЇ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ОБЕРТОВИХ МЕХАНІЗМІВ

І.М. Яворський^{1,2}, Р.М. Юзефович^{1,3}, О.В. Личак¹, М.З. Варивода¹, І.Г. Стецько¹

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

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Технологічно-природничий університет, інститут телекомунікацій. 85796, Польща, м. Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

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

Наведено характеристики методів і засобів вібродіагностики обертових вузлів механізмів на основі моделей сигналів вібрації у вигляді періодично корельованих випадкових процесів. Такі моделі дають можливість виявляти та аналізувати взаємодію повторюваності та стохастичності у властивостях вібрації, яка є характерною при появі дефектів. Такий підхід суттєво підвищує ефективність раннього виявлення дефектів та встановлення їх типів. Описано основні етапи статистичної обробки вібросигналів з метою визначення діагностичних ознак. Представлено розроблені та створені вібродіагностичні системи ВЕКТОР, ПУЛЬС та КОМПАКТ-ВІБРО. Наведено технічні характеристики цих систем. Бібліогр. 33, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: вібродіагностика, неруйнівний контроль, вібраційний сигнал, періодично корельований випадковий процес, спеціалізовані пристрої, дефект, підшипник

Забезпечення безаварійної та безперебійної роботи механізмів тривалої експлуатації вимагає детального перспективного планування їх технічного обслуговування та ремонтів на тривалій період. Таке планування, окрім чисто економічного аспекту (забезпечення безперебійної роботи обладнання, економії на постачанні запасних частин, оптимізації та здешевлення ремонтно-профілактичних робіт), повинно забезпечуватись інтегрованими інформаційно-вимірювальними системами діагностування технічного стану обладнання. Системи діагностування повинні не лише інтегрально класифікувати стан досліджуваних механізмів чи машин, але й виявляти та класифікувати дефекти на ранніх стадіях їх розвитку, оцінювати ступінь пошкодження, що власне і дозволяє проводити перспективне планування ремонту обладнання. Тобто, під час проведення планових і поточних робіт необхідно визначати такі діагностичні ознаки в роботі механізмів, які реагують на незначні відхилення параметрів технічного стану в межах заданих норм. У випадку машин та обертових механізмів таким інструментом діагностування є дослідження тонкої структури вібраційних сигналів та їх зв'язку з кінематикою та динамікою механізмів. Опис такої структури вимагає адекватних математичних моделей вібраційних сигналів, які відображають параметри, що є необхідними для встановлення стану елементів системи. Повторюваність і стохастичність є характерними ознаками вібраційних коливань у механізмах. Повторюваність задається циклічним принципом дії механізмів, а стохастичність є оз-

накою неоднорідностей та нелінійностей в системі. Причому ці обидві особливості виступають у властивостях взаємодії як риси одного періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП).

Адекватними моделями для опису та аналізу цієї взаємодії є періодично та майже періодично нестаціонарні випадкові процеси (в рамках теорії другого порядку – періодично та майже періодично корельовані) [1, 2]. Підхід, що ґрунтується на таких моделях, був вперше апробований при аналізі сигналів вібрації підшипників опор турбоагрегатів ТЕС [3–7] і показав свою ефективність [1, 2, 8, 9]. Дефекти обертових механізмів проявляються, зокрема, у змінах в структурі вібраційних сигналів – у появі нових гармонічних складових та їх модуляціях. Імовірнісні характеристики ПКВП є носіями інформації про такі зміни, тому вони можуть використовуватися безпосередньо для діагностики та бути основою для формування нових діагностичних ознак. Ці ознаки згодом можуть використовуватися для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку. Останнім часом підхід до аналізу вібраційних сигналів на основі ПКВП розвивається багатьма вченими [10–12]. Зокрема, J. Antoni назвав концепцію, яка ґрунтується на аналізі вібраційних сигналів методами ПКВП і їх узагальнень та використання результатів до оцінки стану об'єктів, революційною [13]. В англійській літературі також розвивається методологія, що ґрунтується на результатах, отриманих в теорії ПКВП (W. Gardner, H. Hurd, A. Napolitano [14–16]). Для задач діагностики тут використовується підхід, що ґрунтується на аналізі

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

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

© І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, О.В. Личак, М.З. Варивода, І.Г. Стецько, 2021

двочастотної спектральної густини. Задача виявлення дефектів зводиться до пошуку корельованості в частотній області. Такий підхід вимагає громіздких обчислень і важко піддається статистичному аналізу, зокрема, при отриманні оцінок статистичної похибки обробки даних. Ми в своїх дослідженнях виходимо з оригінальних результатів теорії і статистики ПКВП, отриманих у часово-частотній області. Такі дослідження проведені з використанням комплексу ймовірнісних характеристик першого та другого порядків: математичного сподівання, кореляційної функції, змінної у часі спектральної густини та коефіцієнтів їх розкладу у ряди Фур'є. У даній статті коротко охарактеризовані ймовірнісні та статистичні основи підходу, розробленого у ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. Наведено основні дані про розроблені інформаційно-вимірювальні системи для відбору сигналів вібрації та визначення їх діагностичних параметрів. Методична та діагностична база таких систем ґрунтується на використанні сучасних методів кореляційного та спектрального аналізу вібраційних сигналів як у стаціонарному наближенні, так і з використанням періодично нестаціонарних властивостей сигналів, що дає змогу виявляти дефекти обертових вузлів на ранніх етапах їх зародження.

Перший етап обробки вібраційних сигналів полягає у їх розділенні на детерміновану та стохастичну складові. Аналіз детермінованої складової базується на оригінальних методах виявлення та аналізу прихованих періодичностей. З детермінованою складовою вібраційних сигналів, як правило, пов'язані макродефекти механічних систем, такі, як дисбаланс, ексцентриситет, неспіввісність, биття, зачеплення і т. п. Висновки про дефектність обертового вузла приймаються на основі аналізу амплітудного та фазового спектрів цієї складової. Випадкова складова містить інформацію про нестаціонарні та нелінійні властивості вібраційного сигналу, які пов'язані з силами тертя, зміною в'язкості мастил, шорсткістю поверхні і т. п. Аналіз випадкової складової, у тому числі характеристик її періодичної нестаціонарності, дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку. Періодична нестаціонарність випадкової складової зумовлена стохастичною модуляцією гармонік, яка спричиняє корельованість гармонічних складових спектру [1, 2, 6–9]. Ця корельованість є однією з найчутливіших ознак появи дефектів.

Модель вібраційного сигналу $\zeta(t)$ складних машинних комплексів задається у вигляді:

$$\zeta(t) = s(t) + \eta(t),$$

де $s(t)$ – детермінована складова сигналу; $\eta(t) = \xi(t) + \varepsilon(t)$ – випадкова складова сигналу, де $\xi(t)$ – пері-

одично нестаціонарна складова; $\varepsilon(t)$ – стаціонарний фоновий шум, при цьому випадкові процеси $\varepsilon(t)$ та $\eta(t)$ є некорельованими. Детермінована складова $s(t)$ описується майже періодичною функцією:

$$s(t) = \sum_{k=-M}^M c_k e^{i\omega_k t},$$

де M – число гармонічних складових; c_k – їх комплексні амплітуди; ω_k – частоти. Моделлю нестаціонарної складової $\xi(t)$ є ПКВП, для якого справедливе гармонічне представлення:

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \xi_k(t) e^{ik\omega_0 t}, \quad (1)$$

де $\xi(t)$ – стаціонарно стохастично зв'язані випадкові процеси, які описують стохастичну амплітудну та фазову модуляції основних гармонічних складових ПКВП. Саме кореляційні та спектральні характеристики модулюючих процесів $\xi_k(t)$ є носіями інформації про типи дефектів обертових вузлів. Діагностичні ознаки будуються безпосередньо на основі цих характеристик або з використанням ймовірнісних характеристик ПКВП, сформованого стаціонарними компонентами $\xi(t)$.

Математичне сподівання ПКВП $m(t) = E\xi(t)$ і кореляційна функція $b(t, u) = E\xi(t)\xi(t+u)$ $\xi(t) = \xi(t) - m(t)$, є періодичними функціями часу:

$$m(t) = m(t+T), \quad b(t, u) = m(t+T, u)$$

і можуть бути представлені рядами Фур'є:

$$m(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} m_k e^{ik\omega_0 t},$$

$$b(t, u) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k(u) e^{ik\omega_0 t}.$$

Періодично змінюється за часом і миттєва спектральна густина ПКВП – перетворення Фур'є кореляційної функції:

$$f(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} b(t, u) e^{-i\omega u} du = \sum_{k \in \mathbb{Z}} f_k(\omega) e^{ik\omega_0 t},$$

де

$$f_k(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_k(u) e^{-i\omega u} du.$$

Величини $B_k(u)$ та $f_k(\omega)$ відповідно називають кореляційними і спектральними компонентами. Нульові компоненти $B_0(u)$ і $f_0(\omega)$ описують властивості стаціонарного наближення ПКВП, тобто усереднені кореляційні зв'язки та усереднену за часом спектральну густину потужності флуктуаційних коливань.

Коефіцієнти Фур'є математичного сподівання ПКВП m_k є математичними сподіваннями модулюючих процесів $\xi_k(t)$ у поданні (1), тобто $m_k = E\xi_k(t)$, а кореляційні та спектральні компо-

ненти визначаються авто- та взаємкореляційними функціями та відповідними спектральними густинами цих процесів:

$$\begin{aligned} B_k(u) &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} R_{n-k,n}(u) e^{in\omega_0 u}, \\ f_k(u) &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} f_{n-k,n}(\omega - n\omega_0), \end{aligned} \quad (2)$$

де $R_{kl}(u) = E \xi_k(t) \xi_l(t+u)$, $\xi_k(t) = \xi_k(t) - m_k$, « $\bar{\cdot}$ » – знак спряження, а

$$f_{k,l}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{kl}(u) e^{-i\omega u} du.$$

Як впливає зі співвідношення (2), випадковий процес (1) є ПКВП тоді і тільки тоді, коли процеси, що модулюють різні гармонічні складові, є корельованими. Це означає, що їхні спектри повинні перекриватися.

Для виявлення стохастичної модуляції та ідентифікації типу можливого дефекту на початковому етапі досліджень використовуються діагностичні параметри, які описують періодичну нестационарність першого та другого порядків. Для визначення ступеня цієї нестационарності вибрані коефіцієнти Фур'є математичного сподівання m_k та кореляційні компоненти $B_k(u)$ і введені в розгляд наступні дві діагностичні ознаки:

$$I_1 = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_1} |m_k|^2}{\hat{B}_0(0)}, \quad I_2 = \frac{\sum_{k=1}^{N_2} |B_k(0)|}{B_0(0)}.$$

Перша величина визначає відношення потужності регулярних змін вібросигналу до середньої потужності його флуктуаційних змін, а друга – відношення коливної потужності флуктуацій до їх середньої потужності. Введені ознаки періодичної нестационарності мають властивості міри, вони монотонно зростають при збільшенні потужності регулярних і флуктуаційних коливань вібраційного сигналу. У випадку стаціонарного центрованого випадкового сигналу, коли $m_k \equiv 0$ і $B_k(u) \equiv 0$ для всіх $k \neq 0$, параметри I_1 та I_2 дорівнюють нулю.

Очевидно, що дефекти механізмів також можуть позначатися на характері зникання кореляційних зв'язків модулюючих стохастичних процесів. Для відображення цього ефекту запропоновано третю ознаку:

$$I_3^{(k)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |B_k(u)| du}{\int_{-\infty}^{\infty} |B_0(u)| du}, \quad k = \overline{1, N_2},$$

яку називають мірою періодичної корельованості. Для стаціонарного випадку також маємо $I_3^{(k)} = 0$.

Подібні властивості вібраційних сигналів, але вже в частотній області, описує функція спектральної когерентності:

$$C_k(\omega) = \frac{|f_k(\omega)|}{f_0(\omega)}, \quad k = \overline{1, N_2}.$$

Використане тут нормування спектральних компонентів дає можливість підкреслити зв'язок між енергетично слабкими компонентами від незначних дефектів на фоні компонентів, які не мають відношення до ідентифікації дефекту, однак мають значно більшу потужність.

Доцільним є також використання функціоналу спектральної когерентності, котрий визначається у спектральній смузі $[\omega_1, \omega_2]$:

$$I_4^{(k)} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} C_k(\omega) d\omega,$$

однак його визначення вимагає великого обсягу обчислень.

Для класифікації дефектів ефективними є ознаки, сформовані на основі кореляційних і спектральних характеристик стаціонарних компонентів ПКВП-моделі вібраційних сигналів, у тому числі нормовані взаємкореляційні функції:

$$r_{kl}(u) = \frac{R_{ll}(u)}{R_{nk}(0) R_{ll}(0)}$$

та функції когерентності:

$$\gamma_{kl}^2(\omega) = \frac{|f_{kl}(\omega)|^2}{f_{kk}(\omega) f_{ll}(\omega)}.$$

Загальна методологічна схема, що використовується для аналізу стану підшипникових вузлів обертових механізмів, є наступною:

- отримують вібраційний сигнал від механічної системи та подають у персональний комп'ютер;

- аналізують отриманий вібраційний сигнал класичними методами теорії статистики стаціонарних випадкових процесів, роблять висновки про загальну структуру вібрації, ідентифікують спектральні піки (особливості) відповідно до структури механізму та частот обертання його елементів;

- наявні піки спектральної густини описують детермінованими складовими вібраційного сигналу та вузькосмуговими процесами, для розділення детермінованої та випадкової складових використовують методи статистики ПКВП і адаптивної фільтрації;

- після вилучення детермінованої складової досліджують її амплітудні та фазові характеристики та на їх основі встановлюють типи дефектів механізму;

– методами сліпого розділення джерел виділяють періодично нестаціонарну складову вібраційного процесу;

– на основі аналізу нестаціонарної складової виявляють часові зміни статистик другого порядку, які вказують на модуляційну природу випадкового процесу, що свідчить про наявність у механізмі дефектів, що розвиваються;

– описують стан підшипникових вузлів обертових механізмів з використанням імовірнісних характеристик періодичної нестаціонарності, зокрема кореляційної функції у ПКВП-наближенні, її амплітудно-фазових характеристик, спектральної густини та її компонентів;

– для уточнення типу дефекту виділяють стаціонарні компоненти періодично нестаціонарної складової вібраційного сигналу, проводять його авто-, взаємо-кореляційний та спектральний аналіз.

Поставлені задачі відбору вібраційних сигналів, їх статистичного аналізу, оцінки ймовірності результатів статистичної обробки, формування діагностичних ознак вирішуються за допомогою розроблених і створених у відділі методів і засобів відбору та обробки діагностичних сигналів ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України вібродіагностичних систем ВЕКТОР, ПУЛЬС та КОМПАКТ-ВІБРО [17–23] (див. рис.).

Теоретичною основою для принципів побудови цих систем, обґрунтування алгоритмів обробки та створення відповідного програмного забезпечення стали оригінальні результати в області теорії та аналізу стохастичних коливань [24–28], у тому числі і виявлення прихованих періодичностей [29, 30]. Для обчислення оцінок характеристик коливань використовуються когерентний [24] і компонентний [25] методи, метод найменших квадратів [26], методи лінійної гребінчастої та смугової фільтрації [27, 28].

Когерентний метод полягає в усередненні відліків сигналу, відібраних через період T :

$$\hat{m}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \xi(t+nT), \quad (3)$$

$$\hat{b}(t,u) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \xi(t+nT) \xi(t+u+nT) - \hat{m}(t) \hat{m}(t+u+nT) \quad (4)$$

Компонентні оцінки мають вигляд тригонометричних поліномів:

$$\hat{m}(t) = \sum_{k=-N_1}^{N_1} \hat{m}_k e^{ik \frac{2\pi}{T} t}, \quad (5)$$

$$\hat{b}(t,u) = \sum_{k=-N_2}^{N_2} \hat{B}_k(u) e^{i\omega_0 t}, \quad (6)$$

де N_i , $i=1,2$ – номери найвищих гармонік. Коефіцієнти поліномів $\hat{m}_k$ і $\hat{B}_k(u)$ визначаються на основі статистик:

$$\hat{m}_k = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) e^{-ik \frac{2\pi}{T} t} dt, \quad (7)$$

$$\hat{B}_k(u) = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta [\xi(t) - \hat{m}(t)] [\xi(t+u) - \hat{m}(t+u)] e^{-ik \frac{2\pi}{T} t} dt, \quad (8)$$

де θ – довжина відрізка реалізації вібраційного сигналу. Компонентні оцінки формулюються на основі апріорних даних про число гармонічних складових, що містить ряд Фур'є для кожної імовірнісної характеристики, яка обчислюється. Вони є ефективнішими від когерентних, особливо за умови швидкого загасання кореляційних зв'язків зі збільшенням зсуву.

Оцінки найменших квадратів [26] знаходять, мінімізуючи функціонали:

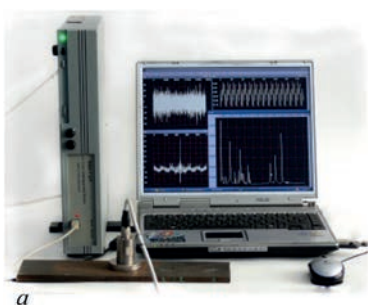
$$F_1[\hat{m}_0^c, \hat{m}_1^c, \dots, \hat{m}_{N_1}^c, \hat{m}_1^s, \dots, \hat{m}_{N_1}^s] = \int_0^\theta [\xi(t) - \hat{m}(t)]^2 dt, \quad (9)$$

$$F_2[\hat{B}_0(u), \hat{B}_1^c(u), \dots, \hat{B}_{N_2}^c(u), \hat{B}_1^s(u), \dots, \hat{B}_{N_2}^s(u)] = \int_0^\theta [\xi(t) \xi(t+u) - \hat{b}(t,u)]^2 dt \quad (10)$$

Особливістю таких оцінок є відсутність ефектів просочування при всіх значеннях θ .

Для побудови статистик спектральних характеристик використаний корелограмний метод Блекмана-Т'юкі. Для цього вибирають точку усереднення корелограми u_m і відповідне згладжувальне вікно $k(u)$. Тоді оцінки миттєвої спектральної густини $f(\omega, t)$ і спектральних компонентів $f_k(\omega)$ знаходять за формулами:

$$\hat{f}(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-u_m}^{u_m} \hat{b}(t, u) k(u) e^{-i\omega u} du, \quad (11)$$



а



б



в

Вібродіагностичні системи: ВЕКТОР (а), ПУЛЬС (б), КОМПАКТ-ВІБРО (в)

$$\hat{f}_k(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-u_m}^{u_m} \hat{B}_k(u) k(u) e^{-i\omega u} du, \quad (12)$$

де $k(-u) = k(u)$, $k(0) = 1$, $k(u) \equiv 0$, при $|u| \geq u_m$. Вибір параметрів обробки реальних сигналів θ і u_m здійснюється на основі статистичних характеристик оцінок (3)–(12) та отриманих аналітично критеріях якості [1, 24, 25].

Наведені вище методи кореляційно-спектрального аналізу ПКВП потребують попереднього знання періоду корельованості T . У багатьох випадках основні періоди збудження механічної системи можуть бути обчислені на основі їх кінематичних схем за умови, коли відомим є період обертання вала двигуна, що приводить у дію машину. Однак обчислені в такий спосіб величини мають недостатню точність і в реальних ситуаціях можуть змінюватися. Тому для ефективного застосування ПКВП-підходу величини періодів слід знаходити на основі отриманої реалізації сигналу. Визначення періоду T і дослідження на основі ПКВП-моделі структури стохастичних коливань можна розглядати як розвиток відомої проблеми про виявлення прихованих періодичностей. Оскільки властивості прихованих періодичностей не завжди проявляються в пікових значеннях спектральної густини стаціонарного наближення, то для оцінювання періоду були розроблені спеціальні методи, які ґрунтуються на виявленні періодичних часових змін імовірнісних характеристик [31–33]. Для цього були застосовані функціонали, що мають вигляд оцінок (3)–(9) з тією різницею, що замість істинного значення періоду T в них була використана деяка пробна величина τ . Оцінки періоду T тоді знаходяться як точки екстремальних значень таких функціоналів. Так, наприклад, компонентні оцінки періоду знаходяться на основі екстремальних значень функціоналів:

$$\hat{m}_k^{c,s}(\tau) = \frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \xi(t) \left\{ \begin{array}{l} \cos k \frac{2\pi}{\tau} t \\ \sin k \frac{2\pi}{\tau} t \end{array} \right\} dt,$$

$$\hat{B}_k^{c,s}(u, \tau) = \frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \xi(t) \xi(t+u) \left\{ \begin{array}{l} \cos k \frac{2\pi}{\tau} t \\ \sin k \frac{2\pi}{\tau} t \end{array} \right\} dt.$$

Визначені в такий спосіб оцінки періоду мають велику точність. Величина їх зміщення має порядок $O(N^{-2})$, а дисперсія – $O(N^{-3})$.

Для виділення модулюючих стаціонарних компонентів сигналів розроблені два методи. Перший з них полягає в частотному зсуві сигналу на величину $-k\omega_0$ і подальшій низькочастотній фільтрації, а саме використанні перетворення:

$$\xi_k(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) \xi(\tau) e^{-ik\omega_0\tau} d\tau,$$

де $h(\tau)$ – імпульсний відгук низькочастотного фільтра:

$$h(\tau) = \frac{\sin\left(\frac{\omega_0\tau}{2}\right)}{\pi\tau}.$$

У другому методі за допомогою смугової фільтрації виділяються складові, спектри яких зосереджені в діапазонах $\left[k\omega_0 - \frac{\omega_0}{2}, k\omega_0 + \frac{\omega_0}{2}\right]$, а далі з використанням перетворення Гільберта знаходяться їх обвідні. Такі перетворення сигналів дають можливість провести аналіз імовірнісних характеристик як самих обвідних основних гармонік ПКВП, так і дослідити їх взаємкореляційні та взаємспектральні характеристики.

Розроблені методи оцінювання періодів детермінованої та стохастичної складових вібраційних сигналів були використані при створенні програм-

Технічні характеристики вібродіагностичних систем

Назва системи	ВЕКТОР	ПУЛЬС	КОМПАКТ-ВІБРО
Кількість каналів	12 (32)	4	2 (8)
Тип давача	електронний, ємнісний, ADXL001	п'єзокерамічний, ABC117	п'єзокерамічний, ABC117-03
Чутливість давача, мВ/г	24	1	1, 5, 10
Розрядність АЦП	14	16	12
Частота дискретизації, кГц	400	1000...10000	150
Смуга частот вхідного сигналу, кГц	0,001...30	0,005...100	0,0003...12
Робочий діапазон, м/с ² , (мм/с)	0,5...700	0,2...500	0,2...400 (0,5...30)
Живлення В/Гц	220/50	220/50	шина USB
Габарити, мм	370×310×70	483×290×90	160×140×30
Вага, кг	5,2	5,6	0,8

ного забезпечення для згаданих вище вібродіагностичних систем (див. табл.).

На основі отриманих оцінок періодів у подальшому обчислюються кореляційно-спектральні характеристики вібраційного сигналу, формуються діагностичні ознаки, які виводяться на екран персонального комп'ютера в табличній та графічній формах. Віброакустична система ВЕКТОР дає можливість здійснювати відбір, попередню обробку та архівувати інформацію по 12-х каналах (з можливістю розширення до 16) від електронних одно- та трьохкомпонентних датчиків вібрації на базі сенсорів ADXL фірми Analog Devices чи п'єзокерамічних датчиків промислового та еталонного типів фірми Брюль і К'єр (Данія). Додатково передбачений канал синхронізації (для балансування валів чи знаходження місцеположення дефекту) та мікрофонні входи (для визначення місць витоків рідин з підземних трубопроводів).

Новизна розробки та алгоритмічно-програмні засоби захищені патентами України № 99358 і № 102759. Модернізований варіант вібродіагностичної системи підвищеної надійності під назвою ВЕКТОР-А розроблений, випробуваний та впроваджений на одному з підприємств міністерства оборони України для діагностування підшипникових вузлів турбоагрегатів літальних апаратів.

Для обробки високочастотних вібраційних сигналів з метою виявлення та попередження аварійних ситуацій на турбогенераторах, нафтоперекачувальних станціях, бурових установках, а також діагностики тіл обертання на порталних кранах та електрогенеруючих установках (у тому числі високовольтних трансформаторів) було розроблено діагностичну систему ПУЛЬС. В якості датчиків віброприскорення використані акселерометри ABC 117, власна резонансна частота яких не менше 100 кГц. Частота квантування аналого-цифрового перетворювача задається програмно в межах 1...10 МГц. Вібродіагностична система ПУЛЬС використовувалась для діагностики турбогенераторів ТГВ-200 на Бурштинській ТЕС та редукторів порталних кранів ДП «Морський торговельний порт ЮЖНИЙ».

Вібродіагностична система КОМПАКТ-ВІБРО представляє собою портативну систему для відбору та обробки вібраційних сигналів з метою виявлення та попередження аварійних ситуацій на механізмах з обертним або обертано-поступальним рухом. Діапазон вимірювання віброприскорення 0,2...400 м/с² та віброшвидкості 0,5...30 мм/с забезпечується п'єзокерамічним акселерометром ABC 117-03. Смука частот вхідного вібраційного сигналу розділяється на піддіапазони, межі яких встановлюється програмно та вибираються з ряду значень, рекомендованих стандартами міжнародних нормативних документів МЕК-1

та ISO 266. Для запобігання спотворень спектру вібраційного сигналу передбачено антиаліазингові фільтри. Створене прикладне програмне забезпечення призначене для реалізації управління системою, запису оцифрованих вібраційних сигналів на жорсткий диск персонального комп'ютера, візуального відображення сигналів з датчиків і збереження на жорсткому диску даних, математичної обробки вібраційних сигналів, генерування графічно-текстових звітів та виконує такі функції: обчислення середньоквадратичних значень віброшвидкості або віброприскорення для даних у кожному з каналів у режимі реального часу; обчислення кореляційної функції та спектральної густини потужності вібраційних сигналів.

Вібродіагностична система КОМПАКТ-ВІБРО використовувалась для дослідження вібраційного стану головних механізмів приводу контейнерних перевантажувачів та механізмів кабельних барабанів спредерів причальних контейнерних перевантажувачів «ЗРМС» на базі причалів №№ 42-43 ДП «Одеський морський торговельний порт»; визначення технічного стану підшипникових вузлів електродвигунів і редукторів стрічкового вугільного конвеєра ДП «Морський торговельний порт ЮЖНИЙ». Систему захищено Патентом України № 117957, вона пройшла метрологічне калібрування та готова до використання.

Висновки

Використання методів ПКВП відкриває якісно нові можливості статистичного аналізу вібраційних сигналів підшипникових вузлів обертних механізмів. Методи виділення детермінованої складової у вібраційному сигналі дозволяють проводити детальний аналіз фазових змін процесів в обертних механізмах. Розроблені адаптивні методи оцінювання параметрів сигналів мінімізують втручання людини в процес обробки, що дозволяє застосовувати їх в автоматизованих діагностичних системах. Методи виділення періодично нестаціонарної складової дають можливість виділяти характеристики сигналу, що відповідають відгукам дефектів механічної системи, мінімізуючи вплив шумів. Розроблені методи та засоби дозволяють аналізувати стан підшипникових вузлів механізмів обертання, виявляти та класифікувати їх дефекти на ранніх стадіях зародження.

Список літератури

1. Яворський І.М. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів, ФМІ НАНУ.
2. (2001) *Механіка руйнування та міцність матеріалів. Довідн. посібник. Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика*. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
3. Яворський І.Н., Юзефович Р.М., Мацько І.Й., Семенов П.А. (2015) Стохастические модели вибросигналов и их анализ для исследования состояния механических систем. *Управляющие системы и машины*, 6(260), 34–42.

4. Яворський І.М., Сторожук Я.В., Юзефович Р.М. та ін. (2014) *Дослідження причин підвищеної вібрації турбогенераторів № 4 та № 5 типу ТГВ-200 Буритинської. Матеріали V міжнародної конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій»*. Львів, Національний університет «Львівська політехніка», 829–834.
5. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Мацько І.І. 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.org/10.37434/tdnk2020.04.02.
6. Яворський І.М., Ісаєв І.Ю., Кравець І.Б. та ін. (2009) Методи підвищення ефективного статистичного аналізу сигналів вібрації підшипникових опор турбоагрегатів теплоелектростанцій. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **3**, 49–59.
7. Яворський І.М., Драбич П.П., Ісаєв І.Ю. та ін. (2009) Розробка інформаційно-вимірювальної системи для вібродіагностики підшипників великих стаціонарних агрегатів. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона, 113–122.
8. Яворський І.М., Драбич П.П., Кравець І.Б. та ін. (2010) Методи і засоби ранньої діагностики оберткових механізмів. *Праці Міжнар. наук.-техн. конференції «Ресурс, надійність та ефективність використання енергетичного обладнання»*, Харків, 31–38.
9. Яворський І.М., Драбич П.П., Кравець І.Б., Мацько І.І. (2011) Методи вібраційної діагностики початкових стадій пошкодження оберткових систем. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **2(47)**, 134–140.
10. Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary Processes: Application in Gear Fault Early Diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **14(3)**, 371–385.
11. Antoni, J., Bonnardot, F., Raad, A., El, Badaoui (2004) Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **18**, 253–265.
12. Zhu, Z., Kong, F. (2005) Cyclostationary Analysis for Gearbox Condition Monitoring: Approaches and Effectiveness. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **19(3)**, 467–482.
13. Antoni, J. (2009) Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23**, 987–1036.
14. (1994) Cyclostationarity in Communications and Signal Processing. Ed. by Gardner W.A., New York, IEEE Press.
15. Hurd, H.L., Mamee, A. (2007) *Periodically Correlated Random Sequences Spectral Theory and Practice*. New Jersey, Wiley-Interscience.
16. Napolitano, A. (2020) *Cyclostationary Processes and Time Series: Theory, Applications and Generalizations*. Elsevier, Academic Press.
17. Яворський І.М., Юзефович Р.М., Кравець І.Б. та ін. (2012) Інформаційно-вимірювальна система ранньої вібраційної. *Матеріали 7-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»*. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, 373–377.
18. Яворський І.М., Юзефович Р.М., Кравець І.Б. та ін. (2015) Розробка вібродіагностичної системи для визначення дефектів промислового обладнання з використанням методів нестационарної статистичної обробки вібраційних та акустичних коливань. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 36–41.
19. Юзефович Р.М., Дзерин О.Ю., Стецько І.Г., Яворський І.М. (2017) Розробка інформаційно-вимірювальних пристроїв для неруйнівного контролю та методи нестационарного аналізу вібраційних сигналів. *Праці XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи»*. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 142.
20. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Варивода М.З. та ін. (2019) Застосування спеціалізованих пристроїв неруйнівного контролю для вібраційної діагностики. *Праці XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи»*. Там само, 53–154.
21. Яворський І.М., Юзефович Р.М., Стецько І.Г., Трохим Г.Р., Мацько І.І. (2019) Методи нестационарного аналізу вібраційних сигналів оберткових вузлів у спеціалізованих пристроях неруйнівного контролю. *Матеріали 9-ї Національної науково-технічної конференції і виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»*. Там само, 75–80.
22. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Дзерин О.Ю. та ін. (2020) Застосування спеціалізованого пристрою неруйнівного контролю для аналізу вібраційних сигналів підшипникових вузлів методами взаємного нестационарного аналізу. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 17–27. doi.org/10.37434/tdnk2020.01.02.
23. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Семенов П.О., Стецько І.Г. (2020) Система неруйнівного контролю для встановлення технічного стану оберткових механізмів. *Збірка тез доповідей двадцять третьої міжнародної конференції «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану»*. Одеса, 65.
24. Javorskyj, I., Isayev, I., Zakrzewski, Z., Brooks, S. (2007) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes. *Signal Processing*, **87**, 13–32.
25. Javorskyj, I., Isayev, I., Majewski, J., Yuzefovych, R. (2010) Component covariance analysis for periodically correlated random processes. *Ibid*, **90**, 1083–1102.
26. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Kravets, I., Zakrzewski, Z. (2011) Least squares method in the stochastic analysis of periodically correlated random processes. *Radioelectronics and Communications Systems*, **54(1)**, 45–49.
27. Javorskyj, I., Leśkow, I., Kravets, I. et al. (2012) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Part I: Coherent and component methods and their generalization. *Signal Processing*, **92**, 1559–1566.
28. Javorskyj I., Leśkow I., Kravets I., Isayev I., Gajacka E. (2011) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Part II: Harmonic series representation. *Ibid*, **91**, 2506–2519.
29. Яворский И.Н. (1984) Применение схемы Бью-Балло при статистическом анализе ритмических сигналов. *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*, **27**, 31–37.
30. Javorskyj, I., Kravets, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. (2017) Periodically correlated random processes: Application in early diagnostics of mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **83**, 406–438.
31. Javorskyj, I., Matsko, I., Yuzefovych, R., Zakrzewski, Z. (2016) Discrete estimators of characteristics for periodically correlated time series. *Digital Signal Processing*, **53**, 25–40.
32. 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*. Eds. F. Chaari, J. Leskow, A. Sanches-Ramirez, New York, Springer International Publishing Switzerland, 73–93.
33. Javors'kyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I. et al. (2017) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes for unknown non-stationarity period. *Digital Signal Processing*, **65**, 27–51.

References

1. Javorskyj, I.M. (2013) *Mathematical models and analysis of stochastic oscillation*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
2. (2001) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. book, Vol.5: Non-destructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, PMI [in Ukrainian].
3. Javorskyi, I.N., Yuzefovich, R.M., Matsko, I.J., Semenov, P.A. (2015) Stochastic models of vibrosignals and their analysis for investigation of mechanical system state. *Upravlyayushchie Sistemy i Mashiny*, **6(260)**, 34–42 [in Russian].
4. Javorskyj, I.M., Storozhuk, Ya.V., Yuzefovych, R.M. et al. (2014) Investigation of the causes for increased vibration of turbogenerators No. 4 and No. 5 of TGV-200 type at Burshyn plant. In: *Proc. of Vth Int. Conf. on Fracture Mechanics and Strength of Structures*. Lviv, NU «Lvivska Politekhnik», 829–834.
5. Yuzefovych, R.M., Yavorskyj, I.M., Matsko, I.Y., Lychak, O.V. et al. (2020) Devices for detection of defects at early stages of their initiation at determination of technical condition of mechanisms. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **4**, 8–16 [in Ukrainian]. doi.org/10.37434/tdnk2020.04.02.
6. Javorskyj, I.M., Isayev, I.Yu., Kravets, I.B. et al. (2009) Methods to increase the efficiency of statistical analysis of vibration signals from bearing supports of turbine units of

- thermal power plants. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **3**, 49–59 [in Ukrainian].
7. Javorskyj, I.M., Drabych, P.P., Isayev, I.Yu. et al. (2009) Development of an information-measurement system for vibro-diagnostics of bearings of large stationary units. In: *Problems of service life and safety of structures, constructions and machines*. Kyiv, PWI, 113–122 [in Ukrainian].
 8. Javorskyj, I.M., Drabych, P.P., Kravets, I.B. et al. (2010) Methods and means of early diagnostics of rotating mechanisms. In: *Proc. of Sci.-Techn. Conf. on Service Life, Reliability and Effectiveness of Application of Power Equipment*, Kharkiv, 31–38.
 9. Javorskyj, I.M., Drabych, P.P., Kravets, I.B., Matsko, I.J. (2011) Methods of vibration diagnostics of early stages of damage of rotating systems. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **2(47)**, 134–140 [in Ukrainian].
 10. Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary processes: Application in gear fault early diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **14(3)**, 371–385.
 11. Antoni, I., Bonnardot, F., Raad, A., El Badaoui (2004) Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **18**, 253–265.
 12. Zhu, Z., Kong, F. (2005) Cyclostationary analysis for gear-box condition monitoring: Approaches and effectiveness. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **19(3)**, 467–482.
 13. Antoni, I. (2009) Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23**, 987–1036.
 14. (1994) *Cyclostationarity in Communications and Signal Processing*. Ed. by W.A. Gardner, New York, IEEE Press.
 15. Hurd, H.L., Mamee, A. (2007) *Periodically Correlated Random Sequences Spectral Theory and Practice*. New Jersey, Wiley-Interscience.
 16. Napolitan, A. (2020) *Cyclostationary Processes and Time Series: Theory, Applications and Generalizations*. Elsevier, Academic Press.
 17. Javorskyj, I.M., Yuzefovych, R.M., Kravets, I.B., Matsko, I.J., Stetsko, I.G. (2012) Information-measurement systems of early vibration diagnostics. In: *Proc. of 7th Nat. Sci.-Tech. Conf. on Non-destructive Testing and Technical Diagnostics*. Kyiv, PWI, 373–377 [in Ukrainian].
 18. Javorskyj, I.M., Yuzefovych, R.M., Kravets, I.B., Matsko, I.J., Stetsko, I.G. (2015) Development of vibrodiagnostic system for determination of industrial equipment defects with application of methods of non-stationary statistical treatment of vibration and acoustic oscillations. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 36–41 [in Ukrainian].
 19. Yuzefovych, R.M., Dzeryn, O.Yu., Stetsko, I.G., Javorskyj, I.M. (2017) Development of information-measurement devices for non-destructive testing and methods of nonstationary analysis of vibration signals. In: *Proc. of 16th Int. Sci.-Tech. Conf. on Instrument Engineering: State-of-the-art and Prospects*. Kyiv, NTUU KPI, 142.
 20. Yuzefovych, R.M., Javorskyj, I.M., Varyvoda, M.Z., Stetsko, I.G., Trokhym, G.R. (2019) Application of specialized non-destructive testing devices for vibration diagnostics. In: *Proc. of 17th Int. Sci.-Tech. Conf. on Instrument Engineering: State-of-the-art and Prospects*. Kyiv, NTUU KPI, 53–154.
 21. Javorskyj, I.M., Yuzefovych, R.M., Stetsko, I.G., Trokhym, G.R., Matsko, I.J. (2019) Methods of nonstationary analysis of vibration signals of rotating assemblies in specialized non-destructive testing devices. In: *Proc. of 9th Nat. Sci.-Tech. Conf. on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics*. Kyiv, PWI, 75–80 [in Ukrainian].
 22. Yuzefovych, R.M., Javorskyj, I.M., Dzeryn, O.Y., Trokhym, G.R. et al. (2020) Application of specialized nondestructive testing device for analysis of vibration signals of bearing assemblies by the methods of mutual nonstationary analysis. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 17–27 [in Ukrainian] doi.org/10.37434/tdnk2020.01.02
 23. Yuzefovych, R.M., Javorskyj, I.M., Semenov, P.O., Stetsko, I.G. (2020) System of non-destructive testing for determination of technical state of rotary mechanisms. In: *Abstr. of Papers of 23rd Int. Conf. on Non-destructive Testing and Monitoring of Technical State*. Odessa, 65 [in Ukrainian].
 24. Javorskyj, I., Isayev, I., Zakrzewski, Z., Brooks, S. (2007) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes. *Signal Processing*, **87**, 13–32.
 25. Javorskyj, I., Isayev, I., Majewski, J., Yuzefovych, R. (2010) Component covariance analysis for periodically correlated random processes. *Signal Processing*, **90**, 1083–1102.
 26. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Kravets, I., Zakrzewski, Z. (2011) Least squares method in the stochastic analysis of periodically correlated random processes. *Radioelectronics and Communications Systems*, **54(1)**, 45–49.
 27. Javorskyj, I., Leškow, I., Kravets, I., Isayev, I., Gajecka, E. (2012) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Pt I: Coherent and component methods and their generalization. *Signal Processing*, **92**, 1559–1566.
 28. Javorskyj, I., Leškow, I., Kravets, I., Isayev, I., Gajecka, E. (2011) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Pt II: Harmonic series representation. *Signal Processing*, **91**, 2506–2519.
 29. Javorskyj, I.N. (1984) Application of Bui-Ballo scheme in statistical analysis of rhythmic signals. *Izv. Vuzov. Radioelektronika*, **27**, 31–37 [in Russian].
 30. Javorskyj, I., Kravets, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. (2017) Periodically correlated random processes: Application in early diagnostics of mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **83**, 406–438.
 31. Javorskyj, I., Matsko, I., Yuzefovych, R., Zakrzewski, Z. (2016) Discrete estimators of characteristics for periodically correlated time series. *Digital Signal Processing*, **53**, 25–40.
 32. 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*. Ed. by F. Chaari, J. Leskow, A. Sanches-Ramirez, New York, Springer Int. Publish. Switzerland, 73–93.
 33. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Zakrzewski, Z., Majewski, J. (2017) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes for unknown non-stationarity period. *Digital Signal Processing*, **65**, 27–51.

METHODS AND MEANS OF EARLY VIBRODIAGNOSTICS OF BEARING UNITS OF ROTARY MECHANISMS

I.M. Yavorskyi^{1,2}, R.M. Yuzefovych^{1,3}, O.V. Lychak¹, M.Z. Varyvoda¹, I.H. Stetsko¹

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

²University of Science and Technology, Institute of Telecommunications and Computer Science. 7 prof. S. Kaliskiego al., 85796, Bydgoszcz, Poland.

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

The characteristics of methods and tools for vibration diagnostics of rotating units of mechanisms on the basis of models of vibration signals in the form of periodically correlated random processes (PKVP) are given. Those models make it possible to detect and analyze the relations of repeatability and stochasticity in the properties of vibration that allows defining appearance of defects. Such an approach significantly increases the efficiency of early detection of defects and establishment of their types. The main stages of statistical processing of vibration signals to determine the diagnostic features are described. Technical characteristics of developed vibration diagnostic systems VECTOR, PULSE and COMPACT-VIBRO are given. 33 Ref., 1 Tabl., 1 Fig.

Keywords: vibrodiagnostics, non-destructive testing, vibration signal, periodically correlated random process, specialized devices, defect, bearing

Надійшла до редакції 24.05.2021

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ В МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ НА РОБОТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИЛАДІВ ДІАГНОСТИКИ

Е.В. Деменчук¹, В.П. Шайда², Л.В. Шилкова², О.Ю. Юр'єва²

¹ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча». 87504, м. Маріуполь, вул. Левченка, 1.

E-mail: eduard.demenchuk@metinvestholding.com

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

E-mail: viktor.shaida@khp.edu.ua

Розглядаються питання впливу гармонік струму мережі живлення на роботу асинхронних двигунів в умовах сучасного енергоємного підприємства. Запропоновано використовувати динамічне тестування для діагностування роботи електричних двигунів змінного струму при живленні від загальної мережі. Визначено вплив роботи частотно-регульованих електроприводів на загальну мережу живлення. Відбувається спотворення синусоїдної форми струму мережі. Отримано гармонічний склад та величини амплітуд вищих гармонік в розподілах фазних напруг та струмів досліджуваних асинхронних двигунів. Проаналізовано роботу електричних двигунів змінного струму при живленні від загальної мережі з вимкненими та ввімкненими частотно-регульованими електроприводами. Виявлено наслідки роботи електричних двигунів змінного струму при роботі з несинусоїдним розподілом фазних струмів у часі. Виявлено відхилення в параметрах загальної мережі, від якої працюють електродвигуни, які можуть призвести до виходу з ладу електричних машин. Доведено, що при живленні електричних двигунів змінного струму від мережі з частотно-регульованими електроприводами в спектрі крутного моменту з'являються пульсації на частотах, не притаманних нормальній роботі. Виявлено особливості здійснення балансування обертових частин агрегатів при роботі частотно-регульованих електроприводів в загальній електричній мережі. Запропоновано способи вирішення цієї проблеми. Бібліогр. 11, рис. 17.

Ключові слова: асинхронний двигун, динамічне тестування, живлення від загальної мережі, частотно-регульовані електроприводи, вищі гармоніки напруги і струму, несинусоїдність розподілу фазних струмів у часі, спектр крутного моменту, балансування обертових частин

Безсумнівно найбільшу частку електричних машин, які використовуються в промисловості, становлять асинхронні двигуни (АД). Тому важливим є забезпечення їх ефективної роботи та вчасне виявлення причин, які можуть призвести до їх виходу з ладу. Відомо, що в АД найбільше зношуються та пошкоджуються підшипникові опори, обмотки і осердя магнітопроводу [1, 2].

Дефекти складових частин електромагнітної системи АД (дефекти осердь статора та ротора, нерівномірності повітряного проміжку) проявляються безпосередньо в спектрах струму, напруги і, як наслідок, обертового моменту. Отже, дефекти електромагнітної системи призводять до асиметрії та спотворення синусоїдного розподілу струму.

Натепер є велика кількість публікацій, присвячених методам контролю технічного стану та діагностування АД [3, 4]. Але мало які з методів контролю можуть точно визначити та вказати на відхилення та дефекти, що виникають при роботі двигуна. Зокрема, найпрогресивніший метод для електричних машин – вібродіагностика – не може точно і впевнено визначити місце виникнення дефекту.

Але не тільки дефекти самого АД призводять до спотворення синусоїдного розподілу напруги

та струму. Нестабільність величини напруги в мережі живлення, наявність супутнього електрообладнання та вмикання до мережі живлення великої кількості частотно-регульованих приводів – все це також призводить до того, що напруга мережі та струм мають спотворену синусоїду і містять значну кількість вищих гармонік з досить великими амплітудами [5]. Тобто крім внутрішніх причин є і зовнішні. Відхилення величини напруги та пульсації її гармонік в мережі живлення загального призначення нормовано відповідним стандартом [6], при цьому напруги інтергармонік поки не лімітуються взагалі через недостатнє дослідження їхнього впливу (рівень інтергармонік збільшується через зростання кількості перетворювачів частоти).

Основою системи частотного керування є перетворювач частоти, який формує напругу потрібної частоти, тобто впливає на якість напруги та струму живлення. І якщо АД з частотним керуванням мають певний захист від цього, то звичайні АД живляться тим, що є.

Метою роботи є оцінка впливу вищих гармонік струму, які виникають в мережі живлення, від роботи іншого електрообладнання, на роботу звичайного АД, який не має спеціальної системи живлен-

В.П. Шайда – <https://orcid.org/0000-0002-4281-5545>, Л.В. Шилкова – <https://orcid.org/0000-0003-0009-3502>,

О.Ю. Юр'єва – <https://orcid.org/0000-0002-4156-8087>

© Е.В. Деменчук, В.П. Шайда, Л.В. Шилкова, О.Ю. Юр'єва, 2021

ня і керування, в умовах сучасного енергоємного підприємства. Завданням роботи є надання рекомендацій щодо експлуатації двигунів в різних режимах їхньої роботи – ввімкнених та вимкнених до мережі живлення частотно-регульованих приводів.

Вплив вищих гармонік струму на роботу електричного обладнання. Метод визначення несправностей за допомогою аналізу спектрів струмів і обертового моменту заснований на тому, що несправності в роботі електричної та механічної частин електричного двигуна і пов'язаного з ним пристрою призводять до змін магнітного потоку в повітряному проміжку електричної машини, а отже, до модуляції вхідного струму [7]. Вимірювання напруги та струмів дозволяє визначити несиметрію, несинусоїдність і гармоніки, які виникають при роботі з частотно-регульованими електроприводами (ЧРЕ), тобто факторів, які впливають на строк служби двигуна. Вимірювання можуть виконуватись при підключенні датчиків струму і напруги вимірювального комплексу безпосередньо в щиті живлення без зміни режиму роботи електричної машини, тобто в будь-якому динамічному режимі під навантаженням.

При несинусоїдності, несиметрії напруги і струму відбувається прискорене старіння ізоляції електричних машин, а також трансформаторів, конденсаторів і кабелів. При цьому в ізоляційних матеріалах при робочих температурах протікають хімічні реакції, що призводять до поступової зміни їх ізоляційних і механічних властивостей. Зі збільшенням температури ці процеси прискорюються, скорочуючи строки служби обладнання. Основними наслідками впливу вищих гармонік на обладнання є:

- зміна форми кривих (синусоїди) напруги та струму в мережі електропостачання;
- зниження ефективності процесів генерації, передачі, використання електроенергії;
- зміна теплових режимів, старіння ізоляції електрообладнання та скорочення внаслідок цього строку його служби;
- некоректна робота обладнання.

Крім цього, вищі гармоніки напруги та струму, що мають велику амплітуду, призводять до збільшення додаткових втрат в обмотках статора, а також в осердях статора та ротора. Додаткові втрати – одне з найбільш негативних явищ, що викликається гармоніками в обертових машинах. Вони призводять до підвищення загальної температури машини, до місцевих перегрівів в статорі і роторі [8]. Додаткові втрати в провідниках статора і ротора також можуть бути викликані збільшенням вихрових струмів (струмів Фуко). Втрати на вихрові струми обумовлені тим, що магнітні поля індукують ЕРС в сталевому осерді та провідни-

ках. Під дією цих ЕРС за наявності електричних кіл замикання по елементах електричних двигунів протікають струми. Саме ці струми викликають появу додаткових втрат. Вихрові струми створюють свої магнітні потоки, які при взаємодії з основним магнітним потоком призводять до додаткових механічних моментів на валу електричної машини. В результаті створюються пульсації крутного моменту на валу двигуна. В екстремальних випадках може виникнути вібрація на резонансній частоті обертової маси ротора, що призведе до накопичення втоми металу і згину або зламу вала електродвигуна.

Принципи проведення динамічного тестування електричних двигунів. Для оцінки наслідків несинусоїдності напруг і струмів через зовнішні причини (відхилення по напрузі та струму живлячої мережі в результаті роботи іншого електрообладнання) було проведено динамічне тестування звичайних АД для двох граничних випадків – при ввімкнених та вимкнених ЧРЕ до тієї самої мережі живлення.

Дослідження проводились для АД типу 4AMU225M4 номінальною потужністю 55 кВт приводу вентилятора нагнітання повітря та АД типу FCMP3155-4 номінальною потужністю 110 кВт приводу насоса головної гідравлічної системи (рис. 1).

Тестування проводилось динамічним аналізатором Explorer4000 (MeggerBaker) [9]. Вимірювались фазні напруги та струми обмотки статора в реальному часі. Зафіксовані миттєві значення вимірюваних величин надаються у вигляді таблиць, залежностей, осцилограм через інтерфейс динамічного аналізатора. Відхилення розподілів напруг та струмів в часі від синусоїдної форми розраховуються програмним забезпеченням приладу на підставі технічних характеристик електричного двигуна. Залежності крутного моменту від частоти (спектри моментів) та часу отримуються через розв'язання математичної

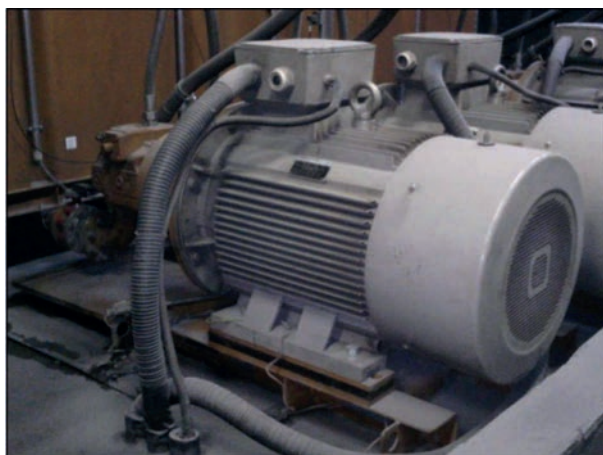


Рис. 1. Асинхронні двигуни насосів головної гідравлічної системи

моделі електричної машини з використанням програмного забезпечення динамічного аналізатора.

Поеднання з'єднувальної та пускової апаратури здійснювалось на щиті живлення для кожної системи керування (рис. 2).

Для визначення ступеня впливу роботи ЧРЕ на роботу вказаних АД було виконано низку тестів: при вмиканні ЧРЕ до однієї з досліджуваним двигуном мережі; при вимиканні ЧРЕ на час роботи двигуна; при приєднанні ЧРЕ та досліджуваного двигуна до різних мереж. Динамічне тестування проводилось в умовах реальної експлуатації, тобто режим роботи і навантаження АД визначались функціонуванням (циклом роботи) агрегатів.

Результати динамічного тестування асинхронного двигуна 4АМУ225М4 при вимкнених ЧРЕ. При вимкнених ЧРЕ тестування АД показало, що при синусоїдній формі розподілу напруги розподіл струму дещо спотворюється (рис. 3). В розподілі струму спостерігаються вищі гармоніки, які додаються до першої основної. Вищі гармоніки струму обумовлюються явищами перетворення енергії в самому двигуні. Аналіз гармонічного складу фазних напруг і струмів (рис. 4) показує, що найбільшими є гармоніки 3-го, 5-го, 7-го та 11-го порядку.

Відносні амплітуди гармонік фазних напруг знаходяться в межах допустимого стандартом відхилення [6]. Так, для гармонік 3-го порядку середня (поміж трьох фазних) відносна амплітуда напруги становить 0,223 % (при нормованому максимальному значенні 3 %), 5-го – 0,173 % (при 5 %), 7-го – 0,387 % (при 4 %), 11-го – 0,176 % (при 3 %). Такі відхилення свідчать про однаковість та синусоїдність фазних напруг. Середні значення коефіцієнтів нелінійних спотворень на-

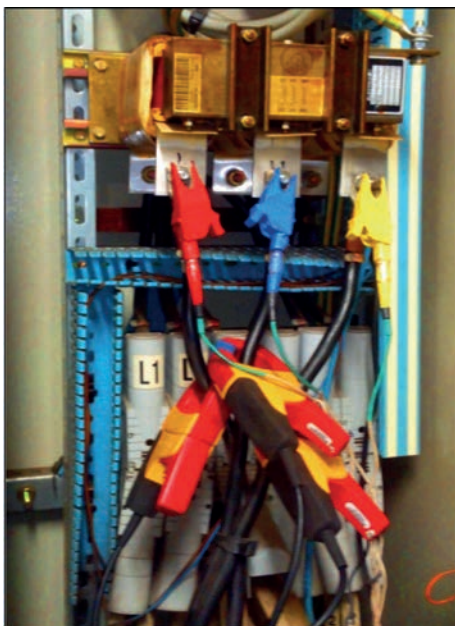


Рис. 2. Підключення датчиків напруги та струму в щиті живлення

пруги (THD V) становлять 0,5 %, струму (THD I) – 3,1 % (рис. 5). Отже, якість напруги за гармонічним складом є задовільною.

За відсутності впливів з боку мережі розподіл фазних струмів асинхронного двигуна визначається властивостями самого двигуна. Поява вищих гармонік в розподілі струму в часі свідчить про несинусоїдність розподілу МРС в повітряному проміжку асинхронного двигуна. Ця несинусоїдність обумовлена як будовою двигуна, так і дефектами, які виникли при експлуатації або ремонті, що призводить до електричної та магнітної несиметрії фазних обмоток статора. Наявність парних гармонік обумовлюється магнітною несиметрією асинхронного двигуна через різну кількість витків фазних обмоток статора або ексцентриситет ротора. Якщо фазні струми асинхронного двигуна однакові, то електрична та магнітна несиметрія від обмотки статора відсутня. Стосовно досліджуваного асинхронного двигуна можна зробити такі висновки: через те, що амплітуда парних гармонік не перевищує 0,25 % від амплітуди першої гармоніки, ексцентриситет ротора знаходиться в межах допустимого. Непарні гармоніки існують в розподілі фазних струмів через особливості конструктивного виконання обмоток статора машин змінного струму – обмотки розподілені по пазах. Амплітуда гармонік зменшується зі збільшенням номеру гармоніки і після одинадцятої стає зникаюче малою. Гармоніки струму третього і кратного трьом порядку знищуються повністю при з'єднанні фазних обмоток статора за схемою «зірка» і не передаються до мережі. Для досліджуваного двигуна середні значення гармонік 3-го порядку для фазних струмів становить 1,446, 5-го – 2,375, 7-го – 1,228, 11-го – 0,399 %. Наявність вищих гармонік в розподілах фазних напруг і струмів спричиняє пульсації крутного моменту, що в свою чергу призводить до підвищеної вібрації асинхронного двигуна та всього агрегату в цілому. За спектром крутного моменту асинхронного двигуна виявляються причини вібрації.

У спектрі крутного моменту спостерігаються піки, які мають електромагнітну або електродинамічну природу походження, тобто пов'язані з принципом дії електричної машини, завжди супроводжують її роботу і не завжди є ознакою дефектів [10]. На частоті 50 Гц, тобто частоті мережі живлення, пік моменту відповідає пульсації електромагнітного моменту двигуна. Піки моментів, які спостерігаються на частотах, кратних подвійній частоті мережі живлення, тобто 100, 200, 300 Гц і т. д., пов'язані з магнітострикцією – явищем, яке відбувається при обертанні магнітного поля електричної машини. При кожному оберті магнітного поля відбувається подвійне змінювання просторової орієнтації доменів (елементарних намагнічених

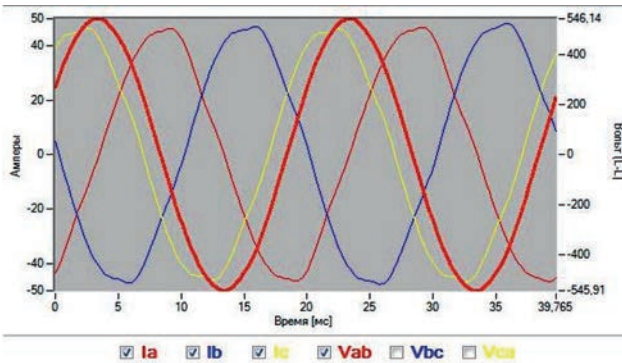


Рис. 3. Розподіли фазних напруг і струмів для асинхронного двигуна номінальної потужності 55 кВт при вимкнених ЧРЕ

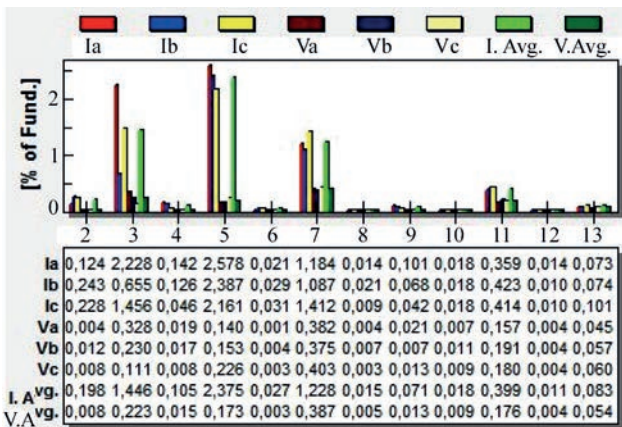


Рис. 4. Гармонічний склад розподілу напруг і струмів асинхронного двигуна номінальної потужності 55 кВт при вимкнених ЧРЕ

	A	B	C	Average
THD v [%]	0,6	0,5	0,5	0,5
THD I [%]	3,6	2,8	3,0	3,1

Рис. 5. Коефіцієнти нелінійних спотворень напруги та струму (за фазами та середній) асинхронного двигуна номінальної потужності 55 кВт при вимкнених ЧРЕ

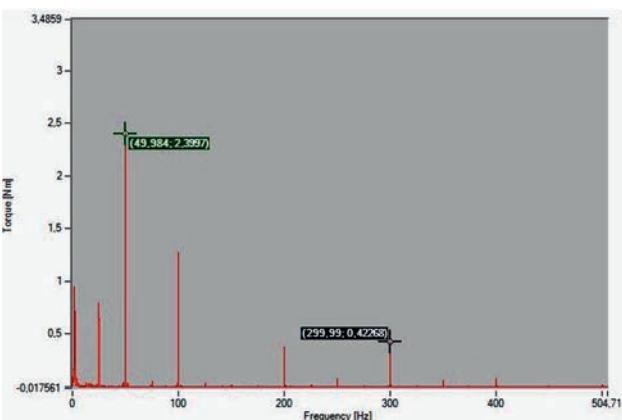


Рис. 6. Спектр моменту асинхронного двигуна номінальної потужності 55 кВт при вимкнених ЧРЕ

феромагнітних частинок матеріалів осердь), що й викликає вібрації осердь електричної машини.

Пік моменту на частоті до 10 Гц виникає в асинхронних двигунах через наявну різницю між частотами обертання магнітного поля статора та саме ротора. Ця частота отримала назву «частота ковзан-

ня». Пік моменту на частоті 25 Гц спостерігається в чотирьохполюсних електричних машинах.

Ознакою наявності дефекту в електричній машині є збільшення амплітуди піків в спектрі крутного моменту вище деякого рівня, який є межею нормального стану обладнання.

При роботі асинхронного двигуна 4AMУ225М4 при вимкнених ЧРЕ в спектрі моменту спостерігаються піки, які обумовлюються принципом дії двигуна (рис. 6). Значення піків моментів на частотах, які не дорівнюють частоті мережі, не перевищують піку електромагнітного моменту. Так, пік моменту на частоті 50 Гц становив 2,4 Н·м, на частоті 300 Гц – 0,4 Н·м.

На підставі аналізу спектра моменту можна виявити ознаки незбалансованості агрегату або дефекти електричного двигуна. Піки моменту на певній частоті свідчать про можливу наявність конкретного виду дефекту. Але впевнено про наявність дефекту можна говорити тільки при наявності серій тестів, виконаних за деякий проміжок часу при однакових режимах роботи обладнання та електромережі. Наявність вищих гармонік у розподілі фазних струмів, піків у спектрі моменту АД призводять до появи пульсацій крутного моменту. Саме ці пульсації викликають вібрацію електричної машини та підвищений нагрів. Величина пульсацій крутного моменту визначається як різниця максимального та усталеного моментів. Для відносного значення пульсацій використовується відсоткове відношення різниці моментів до усталеного моменту.

Для асинхронного двигуна 4AMУ225М4 при вимкнених ЧРЕ пульсації крутного моменту упродовж часу роботи сягають 164 % від робочого моменту (рис. 7).

Результати динамічного тестування асинхронного двигуна 4AMУ225М4 при ввімкнених ЧРЕ. Для виявлення впливу працюючих ЧРЕ

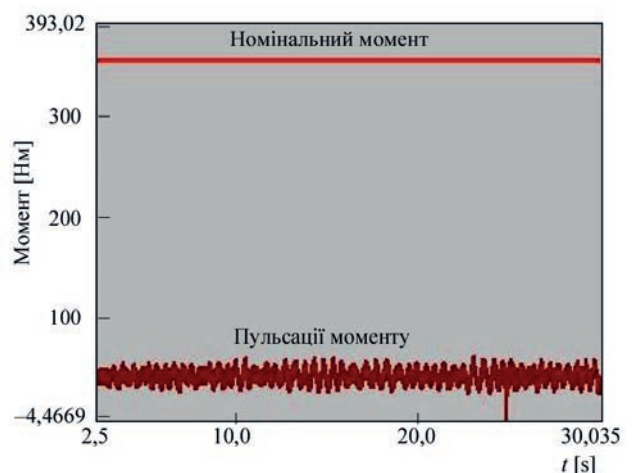


Рис. 7. Графік нерівномірності крутного моменту асинхронного двигуна номінальної потужності 55 кВт при вимкнених ЧРЕ. Нерівномірність крутного моменту 164,24%, завантаження 11,4%, ефективність 0,11

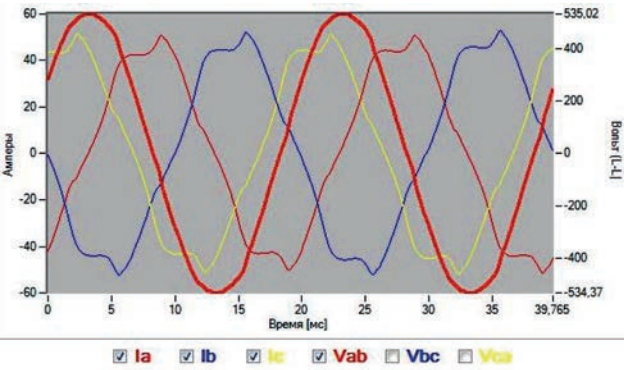


Рис. 8. Розподіли фазних напруг і струмів для асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ

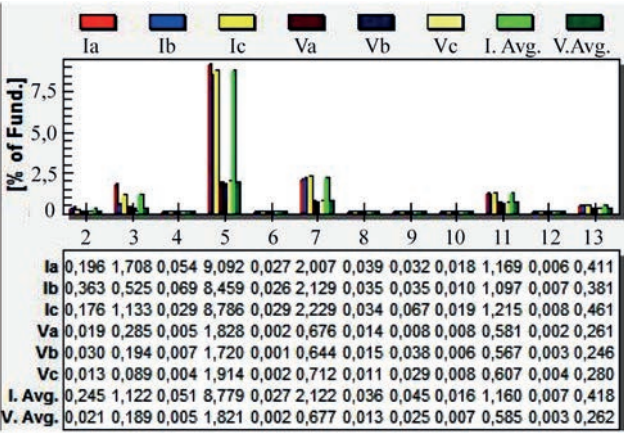


Рис. 9. Гармонічний склад розподілу напруг і струмів асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ

	A	B	C	Average
THD v [%]	2,1	2,0	2,2	2,1
THD I [%]	9,6	8,8	9,2	9,2

Рис. 10. Коефіцієнти нелінійних спотворень напруги та струму (за фазами та середній) асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ

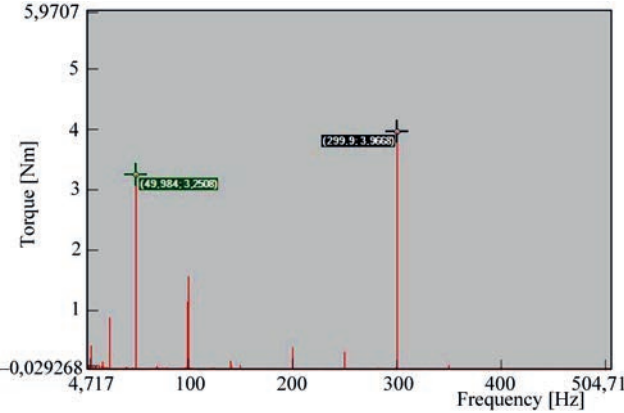


Рис. 11. Спектр моменту асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ

на роботу електричних двигунів асинхронний двигун 4AMУ225М4 тестувався при всіх ввімкнених у спільну мережу ЧРЕ. Синуsoїдна форма розподілу напруги зберігалася, що свідчило про правильність влаштування трифазної електричної

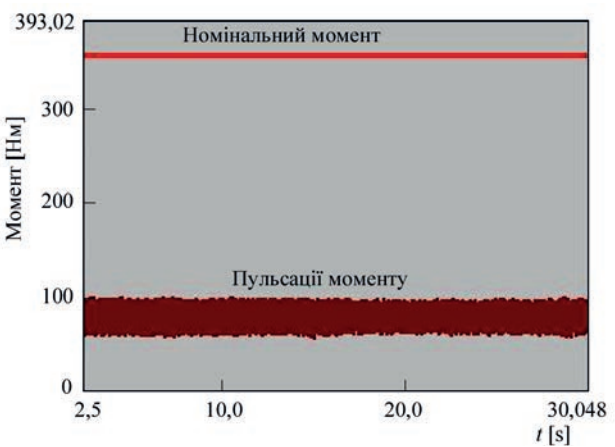


Рис. 12. Графік нерівномірності крутного моменту асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ. Нерівномірність крутного моменту 60,69%, завантаження 22,1%, ефективність 0,22

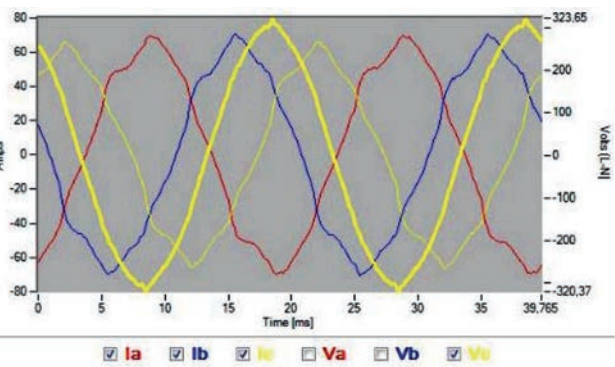


Рис. 13. Розподіли фазних напруг і струмів для асинхронного двигуна номінальною потужністю 110 кВт

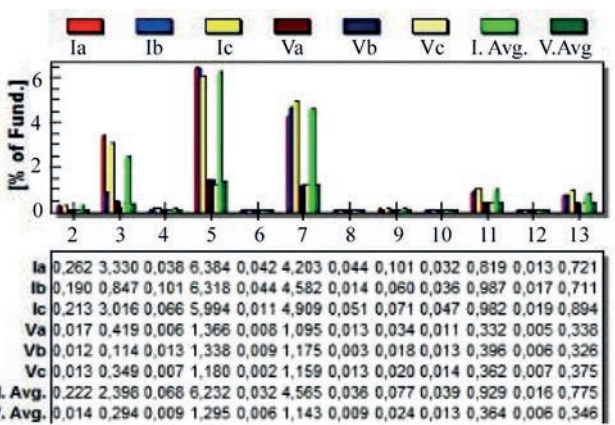


Рис. 14. Гармонічний склад розподілу напруг і струмів асинхронного двигуна номінальною потужністю 110 кВт

мережі. Розподіл струму (рис. 8) спотворюється значно сильніше, ніж при вимкнених ЧРЕ.

За гармонічним складом розподілу фазних струмів було виявлено збільшення номерів та амплітуд вищих гармонік (рис. 9). Так, 5-а гармоніка збільшилась у 3,7, 7-а – у 2,9, 11-а – у 2,9, 13-а – у 2,8 разів.

Середні значення коефіцієнтів нелінійних спотворень напруги (THD V) збільшуються в 4 рази, струму (THD I) – у 3 рази (рис. 10) у порівнянні з вимкненими ЧРЕ.

Таке збільшення порядків та амплітуд вищих гармонік призвело до підвищення значень піків моментів в спектрі (рис. 11). Показовим було значення піку моменту на частоті 300 Гц, яке становило 4 Н·м, що перевищувало в 10 разів пік моменту на тій самій частоті при вимкнених ЧРЕ. Крім того, це значення перевищило пік моменту на частоті 50 Гц на 23 %.

Пульсації крутного моменту упродовж часу роботи становили 61 % від робочого моменту (рис. 12).

Особливості балансування обертових частин агрегатів з електричними двигунами, які живляться від мережі з ввімкненими та вимкненими ЧРЕ. Зменшення пульсацій крутного моменту при ввімкнених ЧРЕ порівняно з вимкненими пояснюється тим, що балансування робочого колеса насоса нагнітання повітря (установки, де працює досліджуваний двигун) здійснювалось при ЧРЕ, ввімкнених у загальну мережу в тому самому складі та в тих самих режимах роботи, при яких відбувалось динамічне тестування асинхронного двигуна.

Роботи по балансуванню робочого колеса такого агрегату досить складні, бо вимагають балансування окремо колеса і лише потім остаточне балансування всього агрегату. При проведенні робіт з балансування робочого колеса в складі агрегату з'ясувалося, що кут зсуву фаз гармонічних складових коливань постійно змінюється в часі, спостерігається нестаціонарний дисбаланс [10]. Виявлено прямий вплив режимів роботи сусідніх електричних машин з ЧРЕ (пуск або зупинка). Отже, при таких умовах роботи мережі досить складно виконувати балансування обладнання через істотні відхилення параметрів електромережі.

При ввімкненні ЧРЕ амплітуди вищих гармонік зростають в декілька разів. Так, значення піку моменту на частоті 300 Гц зросло в 10 разів в порівнянні з тестом при вимкнених ЧРЕ. В той самий час при вимкненні ЧРЕ пульсації крутного моменту протестованого асинхронного двигуна збільшуються в 2,7 рази (з 61 до 164 %). Такий рівень пульсацій, а, отже, й вібрації, неприпустимий та є руйнівним для агрегату. Але цей вплив залежить від балансування робочого колеса вентилятора, тобто не від параметрів системи живлення. При балансуванні усуваються або компенсуються наслідки спотворення розподілу фазних струмів у часі та пульсацій в спектрі моменту. Але при зміні режиму роботи ЧРЕ, їх вмиканні або вимикання пульсації крутного моменту збільшуються і стають непередбачуваними.

Результати динамічного тестування асинхронного двигуна типу FCMP3155-4 при ввімкнених ЧРЕ. Динамічне тестування асинхронного двигуна відбувалось при вимкнених та ввімкнених ЧРЕ. При вимкнених ЧРЕ зафіксова-

но середнє значення коефіцієнту THD V 0,5 %, що свідчить про задовільний стан мережі електропостачання. При ввімкнених ЧРЕ спостерігалось погіршення якості напруги мережі, про що свідчить форма розподілу фазної напруги у часі (рис. 13).

Несинусоїдність фазної напруги та вплив ЧРЕ призвела до збільшення порядків та амплітуд вищих гармонік (рис. 14).

Спостерігалась поява 13-ї гармоніки та збільшення амплітуди 3-ї, 5-ї та 7-ї гармонік. Середнє значення гармоніки струму п'ятого порядку становила 6,232, сьомої – 4,565, одинадцятої – 0,929, тринадцятої – 0,775 %. Середнє значення коефіцієнту THD V становило 1,9 %, THD I – 8,3 % (рис. 15).

У спектрі моменту спостерігався пік моменту 6,24 Н·м при частоті 300 Гц, що є співмірним з піком моменту на основній частоті (рис. 16). Це підтвердило результати, отримані при тестуванні АД типу 4АМУ225М4. Там теж зростала величина піку на частоті 300 Гц. Пульсації крутного моменту для АД типу FCMP3155-4 становили 126,24 %.

Негативний вплив несинусоїдності фазних струмів дозволяє виявити тепловізійна зйомка. Кількісний аналіз термограм дозволяє оцінити ступінь відхилень за тепловим режимом електродвигунів. Термографія одних і тих самих асинхронних двигунів, які працювали з однаковим навантаженням в однаковому робочому середовищі і при однаковому охолодженні, дозволила підтвердити вплив несинусоїдності фазних струмів на тепловий стан двигунів (рис. 17).

Спостерігалось підвищення загальної температури асинхронного двигуна, збільшення площі поверхні нагрівання корпусу при роботі з відхиленнями якості електроенергії. Температури кон-

	A	B	C	Average
THD v [%]	1,9	1,9	1,8	1,9
THD I [%]	8,4	8,0	8,4	8,3

Рис. 15. Коефіцієнти нелінійних спотворень напруги та струму (за фазами та середній) асинхронного двигуна номінальною потужністю 110 кВт при ввімкнених ЧРЕ

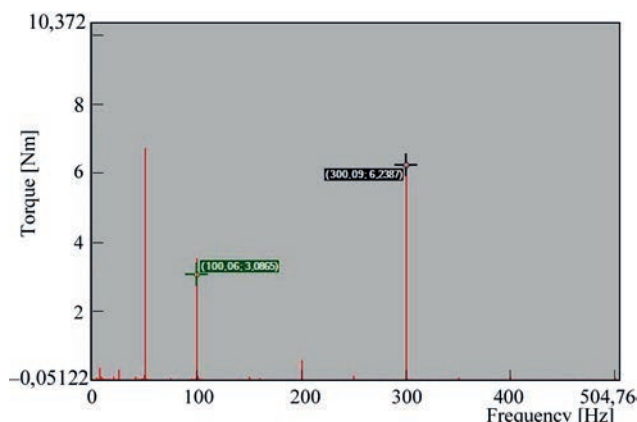


Рис. 16. Спектр крутного моменту асинхронного двигуна номінальною потужністю 110 кВт

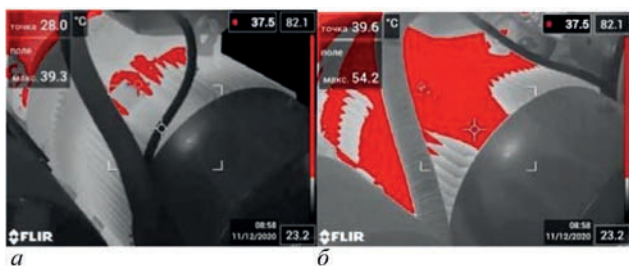


Рис. 17. Термограми корпусу асинхронного двигуна потужністю 110 кВт: а – з вимкненими ЧРЕ; б – з ввімкненими ЧРЕ

Висновки

В останні кілька десятиріччів відбуваються зміни характеру навантаження електромереж. Впровадження на підприємствах частотно-регульованих електроприводів, перетворювальних установок, електронних регуляторів частоти обертання двигунів призводить до різкого збільшення вищих гармонік струму в електромережі. Потужність гармонік, що віддаються навантаженням до електромережі, в найближчі роки буде тільки збільшуватися. Виникає необхідність контролю гармонік напруги та струмів і їхнього впливу на електричні машини.

Рівень гармонік повинен постійно перебувати в допустимих межах згідно з стандартами та вимогами експлуатації обладнання. Порушення допустимого рівня призводить до перебоїв у роботі та відмов обладнання: згоряння обмоток електродвигунів, непередбачуваної вібрації та виходу з ладу підшипників електричних машин, хибних спрацьовувань захисної апаратури.

Метод динамічного тестування найбільш ефективно дозволяє виявляти відхилення в якості споживаної електроенергії, дефекти електричних машин при працюючому обладнанні. З наведених результатів динамічного тестування видно, що перешкоди, які виникають в мережі живлення, мають високочастотні складові – гармоніки третього, п'ятого, сьомого, одинадцятого та навіть тринадцятого порядків. Додаючись до основної гармоніки, вищі гармоніки обумовлюють підвищення діючого значення напруги на електричних двигунах та спотворення синусоїдного розподілу напруги в часі.

Найуразливішими в АД є кола обмоток статора та ротора, де виникають додаткові електричні втрати. Несинусоїдний розподіл магнітного поля в асинхронному двигуні обумовлює виникнення додаткових магнітних втрат в осердях статора та ротора. При наявності цих негативних факторів збільшується вібрація в опорах електричних двигунів, пошкоджуючи підшипникові вузли.

Поліпшення якості електричної енергії дозволить збільшити строк служби електричних машин, підвищити їхню надійність і економічну ефективність через зниження втрат електроенергії. Зниження впливу вищих гармонік струму та напруги є однією з важливих задач підвищення якості електроенергії.

Для зниження рівня вищих гармонік в електричних мережах, особливо при наявності частотно-регульованих електроприводів, необхідно створювати раціональну схему електропостачання із застосуванням фільтрокомпенсуючих пристроїв, антигармонічних реакторів, лінійних дроселів, активних та пасивних фільтрів та конденсаторів гармонік, LC-фільтрів [11].

Слід зауважити, що головна особливість сучасних фільтрів – це їхня багатофункціональність, тобто позитивний вплив на кілька параметрів якості електроенергії систем електропостачання.

Список літератури

1. Губаревич О.В. (2016) *Надійність і діагностика електрообладнання: підручник*. Северодонецьк, Вид-во ЧНУ ім. В. Даля.
2. Zagirnyak M., Mamchur D., Kalinov A. (2012) Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, **12b**, 221–224.
3. Sapena-Bano, A., Burriel-Valencia, J., Pineda-Sanchez, M. et al. (2017) The Harmonic Order Tracking Analysis Method for the Fault Diagnosis in Induction Motors Under Time-Varying Conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **32(1)**, 244–256.
4. Сьомка О.О., Прус В.В. (2015) Комп'ютеризований діагностичний комплекс для випробувань електричних машин на надійність. *Електротехніка і Електромеханіка*, **3**, 27–30.
5. Park, B., Lee, J., Yoo, H., Jang, G. (2021) Harmonic Mitigation Using Passive Harmonic Filters: Case Study in a Steel Mill Power System. *Energies* **14**, 2278.
6. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2007, IDT) (2014) *Характеристики напруги електроживлення, постачаної розподільчими мережами загальної призначеності*. Київ, Мінекономрозвитку України.
7. ДСТУ ISO 17359:2019 *Моніторинг стану та діагностика машин*. Загальні настанови.
8. Осташевський М.О., Юр'єва О.Ю. (2017) *Електричні машини і трансформатори: навч. Посібник*. Міліх В.І. (ред.). Харків, ФОП Панов А.М.
9. Офіційний сайт Megger. Режим доступу : <https://megger.com/dynamic-motor-analyzer-baker-exp4000>.
10. Русов В.А. (2012) *Діагностика дефектів вращающегося оборудования по вибрационным сигналам*. Пермь, РФ.
11. Волков И.В., Курильчук М.Н., Пентегов И.В., Рымар С.В. (2005). Улучшение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий посредством фильтров высших гармоник тока. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць. Ч. 2. Енергетика*, **15**, 15–19.

References

1. Hubarevych, O.V. (2016) *Reliability and diagnostics of electrical equipment: Textbook*. Severodonetsk, Vyd-vo SNU [in Ukrainian].
2. Zagirnyak, M., Mamchur, D., Kalinov, A. (2012) Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, **12b**, 221–224.
3. Sapena-Bano, A., Burriel-Valencia, J., Pineda-Sanchez, M., Puche-Panadero, R., RieraGuasp, M. (2017) The harmonic

- order tracking analysis method for the fault diagnosis in induction motors under time-varying conditions. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 32(1), 244–256.
4. Somka, O.O., Prus, V.V. (2015) Computerized diagnostic system for testing electrical machines for reliability. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 3, 27–30 [in Ukrainian].
 5. Park, B., Lee, J., Yoo, H., Jang, G. (2021) Harmonic mitigation using passive harmonic filters: Case study in a steel mill power system. *Energies* 14, 2278.
 6. DSTU EN 50160:2014 (EN 50160:2007, IDT) *Characteristics of power supply voltage supplied by general purpose distribution networks*. Kyiv, Ministry of Economic Development of Ukraine [in Ukrainian].
 7. DSTU ISO 17359:2019: *Machine condition monitoring and diagnostics. General guidelines* [in Ukrainian].
 8. Ostashevskiy, M.O., Yurieva, O.Yu. (2017) *Electric machines and transformers: Textbook*. Ed. by V.I. Milykh. Kharkiv, IE Panov A.M. [in Ukrainian].
 9. Megger official site. <https://megger.com/dynamic-motor-analyzer-baker-exp4000>.
 10. Rusov, V.A. (2012) *Diagnosis of defects of the rotating equipment on vibration signals*. Perm, RF [in Russian].
 11. Volkov, I.V., Kurlchuk, M.N., Pentegov, I.V., Rymar, S. (2005). Improvement of power quality in the industrial enterprise networks by means of current filters of the supreme harmonics. *Visnyk Pryazov. DTU, Pt.2: Energetyka*, 15, 15–19 [in Russian].

DIAGNOSIS OF INDUCTION MOTORS BY USING THE INFLUENCE OF HIGHER CURRENT HARMONICS

E.V. Demenchuk¹, V.P. Shaída², L.V. Shilkova², O.Yu. Yurieva²

¹PJSC «Ilyich Iron and Steel Works». 1 Levchenko str., 87504, Mariupol, Ukraine.

E-mail: eduard.demenchuk@metinvestholding.com

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

E-mail: viktor.shaída@khp.edu.ua

The questions of the influence of current harmonics of a power supply network on the work of induction electric motors in the conditions of the modern energy-intensive enterprise are considered. It is proposed to use dynamic testing to diagnose the operation of AC motors powered by the general network. The influence of frequency-regulated electric drives on the general power supply network is determined. The sinusoidal shape of the network current is distorted. The harmonious composition and magnitudes of the amplitudes of higher harmonics in the distributions of phase voltages and currents of the studied induction motors are obtained. The operation of AC motors, when powered from the general network with connected and unconnected frequency-regulated electric drives, is analyzed. The consequences of the operation of AC motors when working with the non-sinusoidal distribution of phase currents in time are revealed. Deviations in the parameters of the general network, powering the electric motors, which can lead to failure of electric machines, are determined. It is proved that when AC motors are powered from a network with frequency-regulated electric drives, there appear pulsations in the torque spectrum at frequencies that are not inherent in normal operation. Peculiarities of balancing the rotating parts of the units during operation of frequency-regulated electric drives in the general electric network are revealed. Ways to solve this problem are suggested. 11 Ref., 17 Fig.

Keywords: induction motor, dynamic testing, general power supply network, frequency-regulated electric drives, higher harmonics of current and voltage, non-sinusoidal distribution of phase currents in time, torque spectrum, balancing of rotating parts

Надійшла до редакції 22.03.2021

ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ НАЯВНОСТІ ТРІЩИН В НАРІЗНИХ З'ЄДНАННЯХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ

Призначення: вихорострумовий портативний пристрій індикаторного типу, для виявлення дефектів в металевих виробках.

Область застосування: енергетика, машинобудування, транспорт, видобувна промисловість.

Прилади комплектуються датчиками, що забезпечують контроль деталей різної конфігурації, в тому числі пристосуваннями для виявлення дефектів в металевих виробках. Залежно від виду об'єкта та умов контролю (наприклад, виявлення тріщин в деталях нарізних з'єднань або відшарування бабіту у підшипниках ковзання, теплових канавках роторів), пристрій оснащується датчиками відповідної конструкції та чутливості.

Основні технічні характеристики та переваги:

Мінімальна глибина реєстрованого дефекту, мм... 0,5;
Товщина ізолюючого покриття, мм, не більше 3;
Виявлення дефектів у різі глибиною до 4 мм для феромагнітних та до 10 мм для неферомагнітних металів.
Габаритні розміри, мм..... 63 x 83 x 30;
Вага, кг 0,2;
Живлення автономне напругою, В..... 1,5.



Інститут проблем машинобудування
НАН України ім. А.М. Підгорного

РОЗРОБКА ЄДИНОЇ ГАЛУЗЕВОЇ БАЗИ ДАНИХ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВУГІЛЬНИХ ШАХТНИХ КОПРІВ

В.А. Куліш, Е.С. Крилов

ДП «Інститут «УкрНДІпроект» Мінерально-вугільної України. 03142, м. Київ, просп. Академіка Паладіна, 46/2.
E-mail: post.unp@ukr.net

В ДП «Інститут «УкрНДІпроект» проведено науково-технічні дослідження, за результатами яких розроблено єдину галузеву базу даних (БД) технічного стану вугільних шахтних копрів, метою якої є забезпечення надійної та безпечної експлуатації копрів за рахунок введення системної паспортизації та оцінки їх працездатності за фактичним технічним станом. Пробне опрацювання БД з використанням інформації, отриманої від вугільних підприємств щодо діагностично-технічних показників технічного стану копрів, показало її ефективність та дозволило висвітлити напрямки подальшого удосконалення. Бібліогр. 13, рис. 8.

Ключові слова: технічний стан, науково-технічне дослідження, база даних, шахтний копер, діагностично-технічний показник, моніторинг, програмне забезпечення

Одними з найбільш відповідальних гірничотехнічних споруд є металеві та залізобетонні шахтні копри, тому що вони забезпечують вертикальний транспорт і пов'язані з системами вентиляції гірничих виробок і безпекою підйому.

В теперішній час на вугільних підприємствах України експлуатуються 436 копрів, з яких 356 металевих і 80 залізобетонних (в т.ч. 49 баштових), більшість з яких побудовані 50–60 років тому, в результаті чого спрацювання їх становить 50...70 % і має тенденцію до зростання. При цьому останнім часом мали місце випадки небезпечних руйнувань цих об'єктів, які супроводжувались людськими жертвами [1].

В період з 1993 р. до теперішнього часу фахівцями галузевих інститутів «УкрНДІпроект», НДІГМ ім. М.М. Федорова та спеціалізованого науково-виробничого центру «СНВЦ «Надшахтні споруди» при ДонНАБА було проведено обстеження шахтних копрів, які експлуатуються на вугільних підприємствах України. В результаті було виявлено споруди з ознаками небезпечного технічного стану, на яких було здійснено заходи по забезпеченню їх нормальної експлуатації. В той же час виявлено, що існуючі результати оглядів і обстежень копрів, які здійснювались в минулі роки, в багатьох випадках проводились нерегулярно за різними методами, паспорти копрів складені в довільній формі і часто не містять інформацію про фактичний технічний стан несучих будівельних конструкцій. Крім того, результати контролю та оцінка технічного стану копрів фіксувались в основному на паперових носіях у вигляді протоколів, висновків і т. ін., які не систематизовані в часі, по підприємствах, регіонах і т. ін.

Зважаючи на вищезазначене, в останні роки проведено науково-дослідні роботи та розроблено державні та галузеві нормативні документи по об-

стеженню та паспортизації копрів, які сприяють систематизації інформації про їх фактичний технічний стан [2–7].

Характеристика фонду шахтних копрів України (рис. 1) показує, що залізобетонні копри в загальній кількості складають 20 %, що не в останню чергу пояснюється більш пізнішими, порівняно з металевими, строками початку їх масового будівництва (перший баштовий копер в СРСР був побудований в 1958 р.). Цим може пояснюватись те, що пріоритети по статистиці про технічний стан діючих копрів і досліджень в цій області стосуються металевих копрів. Крім того, специфіка конструкції, технології виготовлення і умов експлуатації дають підставу вважати, що металеві шахтні копри більш ефективно піддаються різним видам руйнувань і пошкоджень порівняно з залізобетонними.

На рис. 2 наведені дані про технічний стан металевих копрів, які були обстежені НДІГМ ім. М.М. Федорова, на вугільних підприємствах України протягом п'яти років.

Аналіз цих даних показує, що більшість металевих копрів, які експлуатуються на вугільних підприємствах, мають термін служби 35–55 років. Цей термін залежить від призначення ствола, на якому змонтована споруда, призначення підйому, агресивності шахтного середовища та багатьох інших

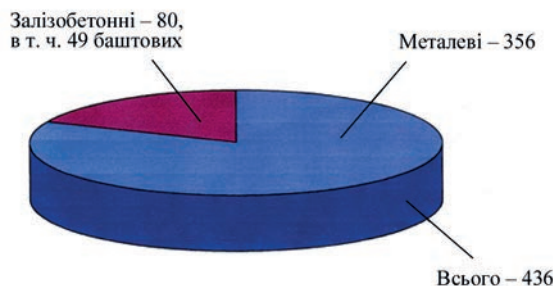


Рис. 1. Характеристика фонду шахтних копрів [1]

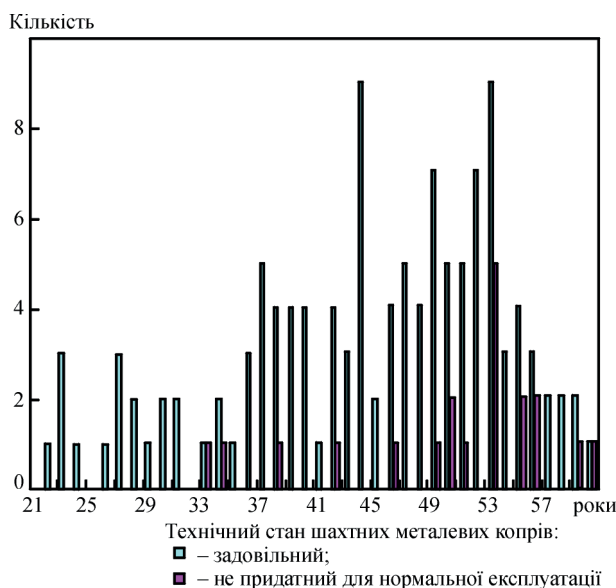


Рис. 2. Залежність технічного стану металевих шахтних копрів від терміну експлуатації [1]

факторів. Копри, які відпрацювали вказаний термін, мають суттєві дефекти та пошкодження, потребують ремонту або повної заміни. Незначна кількість копрів, які експлуатувались 50 і більше років, за цей час піддавались багаторазовому ремонту та реконструкції або їх замінили на нові. За результатами експертної оцінки технічний стан 50 % металевих копрових споруджень, які прослужили 40 і більше років, вимагає виконання ремонтно-відбудовчих робіт зі значними капітальними витратами, а близько 30 % – дорогої повної заміни. Як показує статистика аварій несучих металевих споруд, які експлуатуються в різних галузях промисловості, основні чинники аварій однакові (рис. 3) і левова частка їх виникає на об'єктах, що знаходяться в експлуатації.

У цілому для шахтних копрів можна виділити чотири основні стадії фізичного зношення, що відповідають різним ступеням зниження несучої здатності та типовим якісним змінам технічного стану:

I стадія руйнування лакофарбового покриття (3–5 років) і суцільної корозії (10–15 років), середні втрати перетинів конструктивних елементів (5...15 %). Загальний технічний стан – «задовільний».

II стадія (25–30 років) прогресуючої суцільної корозії в місцях, важкодоступних і недоступних для ремонтного фарбування, утворення ділянок корозії в конструктивних зазорах і під настилами

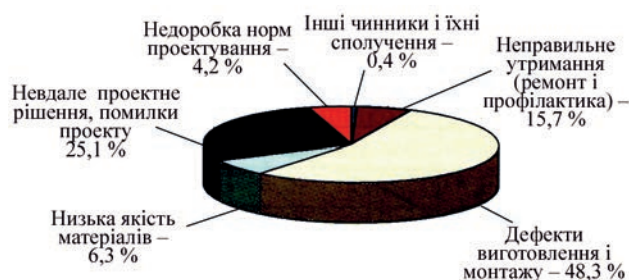


Рис. 3. Чинники аварій металевих конструкцій [8]

робочих площадок, утворення місцевих наскрізних корозійних поразок обшивки станка, з'являються вигини та загальні деформації окремих конструктивних елементів станка, підшківних конструкцій та укосин; середні корозійні втрати перетинів конструктивних елементів 10...20 %, місцеві втрати – до 30 %. У зонах абразивного зношення втрати перетинів від 50...70 % до наскрізних поразок. Загальний технічний стан – «непридатний до нормальної експлуатації».

III стадія порушення зв'язків між елементами грат і стінками станка (40–45 років) внаслідок прогресуючої корозії в конструктивних зазорах, утворення наскрізних місцевих поразок, утворення тріщин в зварних швах кріплення елементів грат до вузлових фасонки, відриву голівок заклепок, нагромадження механічних ушкоджень, які можуть призвести до загальних залишкових деформацій споруди. Оцінка технічного стану – «аварійний». Потрібне обстеження режиму експлуатації, підсилення основних несучих конструкцій методом внутрішнього або зовнішнього дублювання.

IV стадія прогресуючої зміни конструктивної схеми (55–60 років), середні втрати перетинів конструктивних елементів основних несучих конструкцій перевищують 50 %, множинні наскрізні корозійні поразки, зміни конструктивної схеми внаслідок корозійного руйнування вузлів. Оцінка технічного стану – «аварійний». Подальша експлуатація споруди не можлива.

Залежність несучої здатності конструкцій від строку експлуатації, яка наведена на рис. 4, отримана шляхом узагальнення даних обстеження 57 шахтних копрів з різними термінами експлуатації, конструктивними схемами і технологічними характеристиками.

Питання надійності експлуатації металевих конструкцій нерозривно пов'язані з величиною їхнього зносу та залишковим ресурсом (запасом функціональної здатності). Маючи такі показники, можна робити висновки про ступінь експлуатаційної надійності і передбачати заходи для її збільшення (ремонт та підсилення).

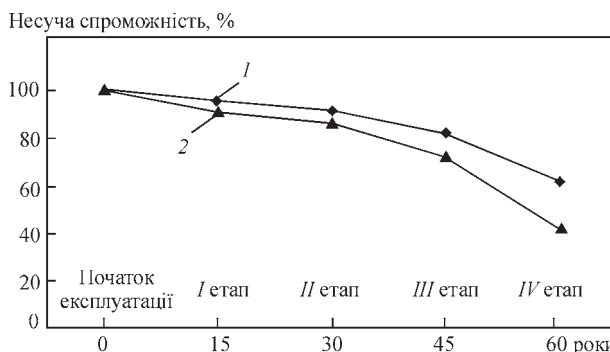


Рис. 4. Залежність несучої здатності конструкцій шахтних укосин від їх фізичного зносу [9]; 1 та 2 – відповідно верхня і нижня границі узагальненої несучої здатності конструкцій

Досить загальним показником зносу може бути вартість ремонтно-відновлювальних робіт відносно до початкової вартості об'єкта. Проведена обробка статистичних даних виявила, що залежність вартості ремонту S від ступеня фізичного зносу F є залежністю логарифмічного типу (рис. 5), яка може вважатися досить універсальною. Таким чином, при фізичному зносі, більшому за 68 %, вартість ремонту та відбудови копра перевищує початкову вартість.

Загальний знос при цьому можна подати, як:

$$F = \frac{C_{\text{рем}}}{C_{\text{поч}}} + kt$$

де $C_{\text{рем}}$ – вартість ремонтно-відновлювальних робіт; $C_{\text{поч}}$ – вартість нового об'єкта; k – коефіцієнт швидкості зростання зносу; t – час експлуатації.

Виходячи з такого уявлення, було розроблено закономірності зростання зносу будівельних конструкцій копрів протягом терміну експлуатації в залежності від режимів експлуатації.

Аналіз сучасного технічного стану більшості шахтних копрів України, проведений інститутом «УкрНДІпроект», і нормативно-технічних документів, за якими він визначається за результатами обстеження, оцінки та паспортизації, показав:

– в теперішній час розроблено державні та галузеві нормативно-технічні документи стосовно вимог до обстеження, оцінки та паспортизації технічного стану копрів;

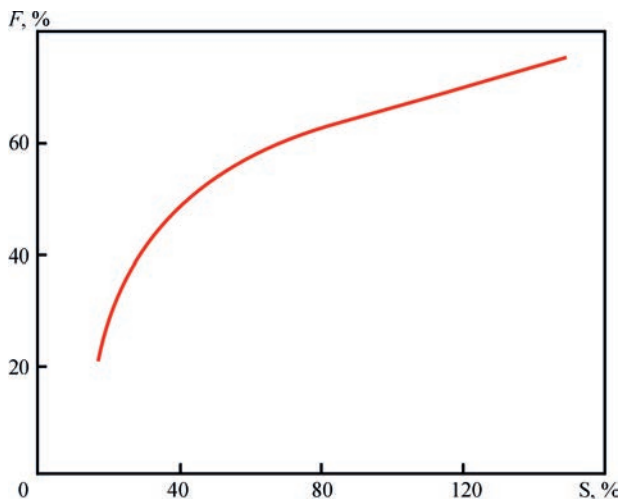


Рис. 5. Залежність вартості ремонту від зносу [9]

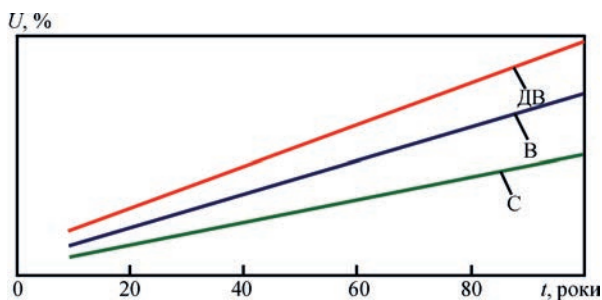


Рис. 6. Зростання зносу металевих конструкцій виробничих будівель різних режимів роботи [9]; ДВ – дуже важкий; В – важкий; С – середній

– визначено перелік вугільних підприємств і шахтних копрів, які на них експлуатуються;

– проведено обстеження та паспортизація більшості шахтних копрів, які експлуатуються на вугільних підприємствах України;

– визначено основні елементи та вузли металевих і залізобетонних копрів, які характеризують категорію їх технічного стану відповідно до кваліфікаційних ознак (нормальний, задовільний, непридатний до нормальної експлуатації, аварійний) [10];

– існуючі комп'ютерні системи обміну інформацією між вугільними підприємствами Міненерговугілля України та галузовими інститутами, що проводять обстеження, дозволяють оперативно отримувати вихідну звітну інформацію для моніторингу технічного стану копрів.

Отримана інформація дозволила інституту «УкрНДІпроект» розробити єдину галузеву БД технічного стану копрів, метою якої є забезпечення надійної та безпечної експлуатації копрів за рахунок введення системної паспортизації та оцінки їх працездатності за фактичним технічним станом. Основні функції БД передбачають проведення моніторингу зміни значень критеріїв (ознак) технічного стану копрів та виконання термінів і регламентів обстежень (оглядів) копрових споруд. Первинна інформація для проведення моніторингу надається підприємством згідно початкових (первинних) форм (таблиць) запису, які дозволять простежити динаміку змін технічного стану копрів.

Таблиця 1 – Загальні відомості про підприємство. Таблиця містить відомості про підприємство, його власника, а також осіб, відповідальних за технічний стан копрів.

Таблиця 2 – Технічні характеристики копра та підйомної установки. Таблиця містить основні паспортні дані про копер і підйомну установку, а також відомості про конструкцію окремих частин споруди та експлуатаційні відомості, пов'язані з проведенням обстежень, реконструкцій, ремонтів, аварій копрів і витрати на усунення дефектів і пошкоджень металоконструкцій.

Таблиця 3 – Технічний стан конструктивних елементів укісних металевих копрів. Таблиця містить для кожного конструктивного елемента (вузла) наступні відомості про їх технічний стан:

– категорія технічного стану: нормальний, задовільний, непридатний до експлуатації, аварійний;

– дефекти та пошкодження, які вимагають усунення;

– термін усунення пошкоджень (квартал, рік).

Таблиця 4 – Технічний стан конструктивних елементів (вузлів) баштових копрів з несучим сталевим каркасом. Таблиця містить для кожного конструктивного елемента (вузла) відомості про їх технічний стан аналогічно табл. 3.

Таблиця 5 – Технічний стан конструктивних елементів (вузлів) баштових копрів з монолітного залізобетону. Таблиця містить для кожного конструктивного елемента (вузла) відомості про їх технічний стан аналогічно табл. 3.

Таблиця 6 – Діагностичні показники металевих копрів, які визначають категорію їх технічного стану. Таблиця містить перелік діагностичних показників основ, фундаментів і несучих металокопрукцій, які найбільш поширені та характерні для металевих копрів.

Таблиця 7 – Діагностичні показники баштових і залізобетонних копрів, які визначають їх технічний стан. Діагностичні показники, наведені в таблиці, стосуються наступних складових частин: основ і фундаментів металевих копрукцій споруди; міжповерхових перекриттів і покриття; огорожувальних копрукцій.

Аналіз даних, отриманих від підприємств, дозволяє визначатись про достатність їх інформативності та необхідності в коригуванні. На основі інформації, отриманої з первинних форм запиту, розробляються кінцеві форми облікових документів, які входять в БД у вигляді двох таблиць: «Технічні характеристики шахтного копра» та «Технічний стан шахтних копрів». Зафіксовані в БД паспортні технічні характеристики копрів та їх технічний стан актуалізуються при отриманні офіційних даних про їх зміни.

Показники БД шахтних копрів згруповані по таких групах:

- загальні відомості про підприємство, до якого належить копер;
- технічні характеристики копра та підйомної установки;
- технічний стан копра, у тому числі:
 1. основи та конструктивних елементів;
 2. дефекти та пошкодження;
 3. терміни усунення дефектів та пошкоджень;

4. пропозиції щодо подальшої експлуатації.

В результаті проведеної роботи були розроблені функціональна та структурна схеми БД, які наведені відповідно на рис. 7 і 8.

Розроблена структурна схема передбачає, що БД формується як у часовому аспекті, так і у просторовому, а саме по областях розташування, об'єднанням підприємств та відособленим об'єктам – шахтам, шахтоділеньцям. Система управління БД забезпечує можливість обробки даних та оперування ними в багаторівневому режимі. Показники групуються за напрямками інформативності. Структура БД передбачає можливість ведення документації у табличному вигляді та діалоговому режимі, а саме забезпечує створення:

- форм бланків вхідних (початкових) та вихідних (кінцевих) документів;
- файлів з інформацією по підприємствах;
- файлів для агрегованих даних та їх взаємозв'язків;
- словників і службових файлів (найменування і розмірність всіх показників, розмірність для агрегованих форм, словник підприємств, перелік областей, інші службові та робочі файли).

БД реалізована у вигляді реляційної бази даних, призначеної для моніторингу технічного стану шахтних копрів підприємств вугільної галузі та розгорнутої в локальній обчислювальній мережі ДП «УкрНДІпроект». Програма створена за технологією «клієнт-сервер». Клієнтська частка написана на Delphi, а в ролі серверної частини виступає SQL-орієнтований сервер Inter base [11–13]. Програма встановлюється на кожному комп'ютері мережі та має можливість розмежування доступу до різних частин БД. Необхідні форми роботи з даними створюються після ідентифікації користувача. У своїй робочій формі кожен з користувачів може легко розташувати всі елементи у зручний для нього спосіб.

Пробне опрацювання БД, проведене на реальних повномасштабних даних показників 2012–2013 рр., показало її ефективність та дозволило висвітлити

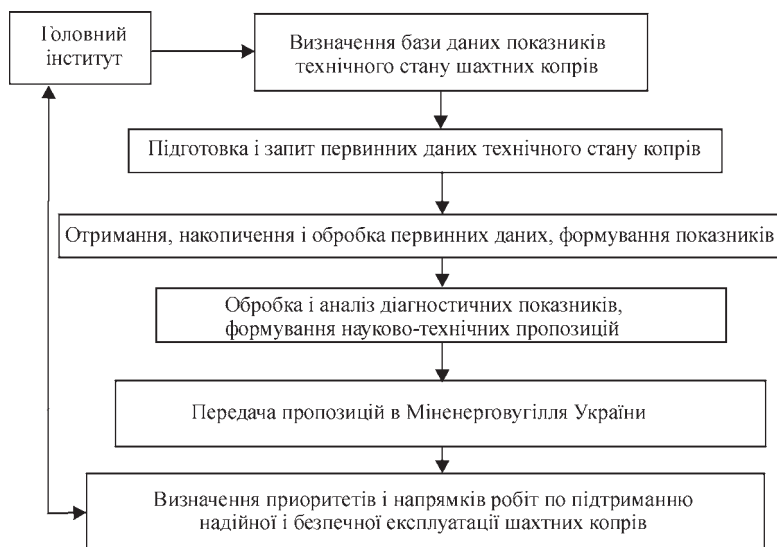


Рис. 7. Функціональна схема БД

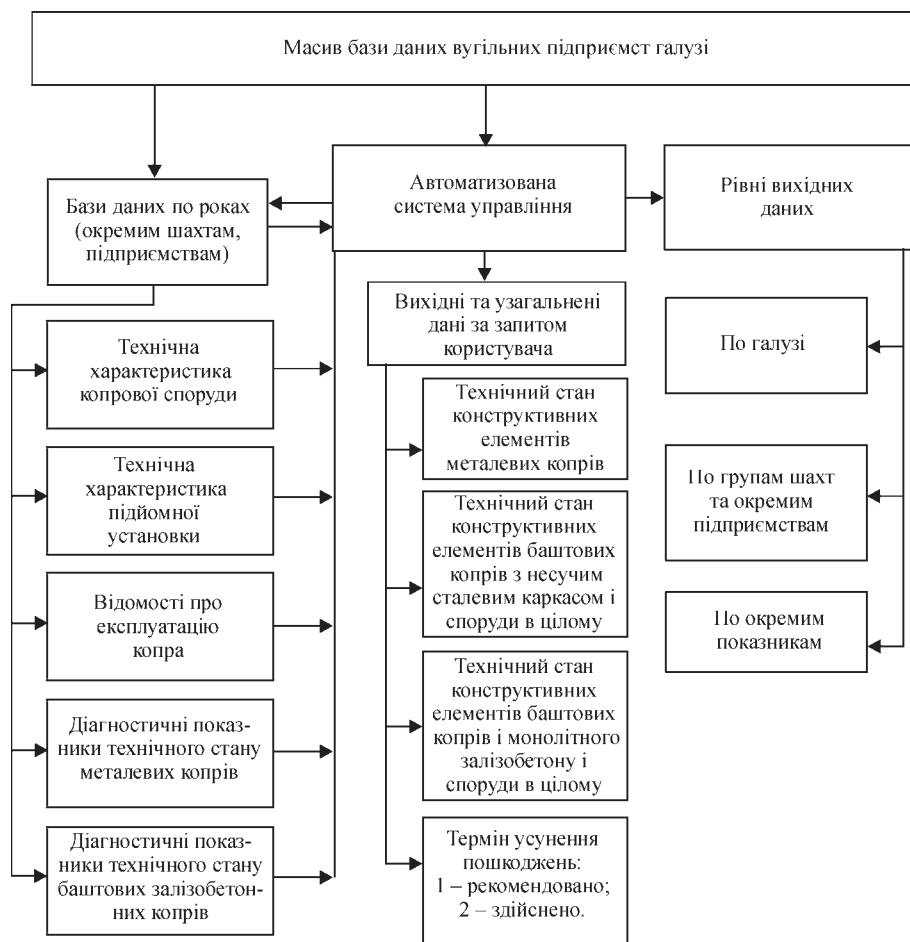


Рис. 8. Структурна схема БД

напрямки подальшого удосконалення програмного забезпечення та виведення функціонування БД на певний рівень надійності, достовірності та зручності користування.

В результаті проведеного аналізу даних про 313 копрів, які в теперішній час експлуатуються, було визначено наступне:

1. металевих копрів – 268 шт.;
2. залізобетонних баштових – 45 шт.;
3. 305 копрів мають задовільний або нормальний технічний стан, а 5 металевих і залізобетонних баштових віднесено до категорії «непридатний до нормальної експлуатації»;
4. терміни експлуатації шахтних копрів розподіляються наступним чином:
 - металеві копри: до 30 років – 50 шт.; 30–50 років – 108 шт.; 50 і більше – 110 шт.;
 - залізобетонні баштові копри: до 30 років – 12 шт.; 30–50 років – 28 шт.; 50 і більше – 5 шт.

Створення єдиної галузевої бази даних про технічний стан шахтних копрів дає можливість чітко відстежити:

- термін чергового обстеження та паспортизації технічного стану копрів;

- наявність необхідності технічної документації на копер;
- динаміку змін технічного стану копра від одного обстеження до наступного;
- дотримання регламенту обстежень стосовно методики та організації його проведення;
- виконання підприємствами рекомендацій стосовно усунення дефектів, які були виявлені під час обстеження.

Висновки

За результатами проведених науково-технічних досліджень інститутом «УкрНДІпроект» розроблено єдину галузеву БД технічного стану копрів, які експлуатуються на підприємствах вугільної промисловості України.

Розроблена база даних забезпечує:

- ведення щорічної реєстрації чи уточнення працюючих шахтних копрів та технічних характеристик копрової споруди та підйомної установки;
- постійний моніторинг фактичного технічного стану копрів галузі;
- регулярне поновлення та аналіз технічного стану конструктивних елементів (вузлів) металевих та залізобетонних копрів;
- оцінку в моніторинговому режимі наявності та наповнення паспорту технічного стану копрів;

- визначення тенденцій та напрямків можливих змін;
- своєчасне планування, розробку та виконання необхідних заходів.

Виконано пробне опрацювання БД з використанням інформації, отриманої від вугільних підприємств щодо діагностико-технічних показників технічного стану копрів за 2012–2013 рр., яке показало її ефективність та дозволило висвітлити напрямки подальшого удосконалення.

Список літератури

1. Кущенко В.М., Левин В.М., Кулиш В.А. и др. (2012) *Научные основы обеспечения и эффективности шахтных копров*. Makeevka.
2. ДБН В.1.2–14–2009. *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ*.
3. СОУ-Н10.1.00174125.001:2012. *Порядок і організація обстеження металевих копрів*. Стандарт Міненерговугілля України.
4. СОУ-Н10.1.00174125.002:2012. *Порядок і організація обстеження металевих копрів*. Стандарт Міненерговугілля України.
5. СОУ-Н10.1.00174.015:2008. *Несучі металеві конструкції гірничого устаткування і гірничотехнічних споруд. Оцінка технічного стану*. Стандарт Міненерговугілля України.
6. СОУ-Н10.1.00174094.007:2005. *Правила оцінки технічного стану металевих шахтних копрів*. Стандарт Міненерговугілля України.
7. СОУ-Н10.1.00174094.013:2010. *Копрові та поверхові споруди шахт. Паспортизація, терміни до перших експертних обстежень технічного стану і їхня періодичність*. Стандарт Міненерговугілля України.
8. Шимановський О.В., Гордєєв В.М., Микитаренко М.О та ін. (2001) Аналіз технічного стану та проблем експлуатації будівельних металевих конструкцій в Україні. *Будівництво України*, 3, 18–24.
9. Кущенко В.Н. (2006) *Обеспечение безопасности строительных конструкций укосных шахтных копров*. Москва.
10. Кулиш В.А., Крилов Е.С. (2020) Контроль технічного стану несучих конструкцій металевих шахтних копрів в процесі їх експлуатації. *Технічна діагностика та неруйнів-*

ний контроль, 2, 37–42. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.02.06>

11. Виейра Р. (2007) *Программирование базы данных. Microsoft SQL Server. Базовый курс*. Москва, Диалектика.
12. Гандерлой М., Джорден Д., Чанц Д. (2007) *Освоение Microsoft SQL Server 2005*. Москва, Диалектика.
13. Хендерсон К. (2006) *Профессиональное руководство по SQL Server: структура и реализация*. Москва, Вильямс.

References

1. Kushchenko, V.M., Levin, V.M., Kulish, V.A. et al. (2012) *Scientific fundamentals of assurance and effectiveness of shaft headgear*. Makeevka [in Russian].
2. DBN V.1.2-14-2009: *General principles of assurance of reliability and structural safety of buildings, constructions, building structures and foundations* [in Ukrainian].
3. SOU-N10.1.00174125.001:2012: *Procedure and organization of inspection of metal headgear. Standard of the Ministry of Energy and Coal of Ukraine* [in Ukrainian].
4. SOU-N10.1.00174125.002:2012: *Procedure and organization of inspection of metal headgear. Standard of the Ministry of Energy and Coal of Ukraine* [in Ukrainian].
5. SOU-N10.1.00174.015:2008: *Load-carrying metal structures of mine equipment and mining facilities. Evaluation of the technical condition. Standard of the Ministry of Energy and Coal of Ukraine* [in Ukrainian].
6. SOU-N10.1.00174094.007:2005: *Procedure and organization of inspection of metal headgear. Standard of the Ministry of Energy and Coal of Ukraine* [in Ukrainian].
7. SOU-N10.1.00174094.013:2010: *Headgear and surface structures of mines. Certification, time to first expert inspections of the technical condition and their periodicity. Standard of the Ministry of Energy and Coal of Ukraine* [in Ukrainian].
8. Shymanovskiy, O.V., Gordeiev, V.M., Mykytarenko, M.O. et al. (2001) Analysis of the technical condition and problems of operation of building metal structures in Ukraine. *Budivnytstvo Ukrainy*, 3, 18–24 [in Ukrainian].
9. Kushchenko, V.N. (2006) *Ensuring the safety of building structures of frame sloping mine headgear*. Moscow [in Russian].
10. Kulish, V.A., Krylov, E.S. (2020) Monitoring the technical state of load-carrying structures of metal shaft headgear in operation. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 37–42 [in Ukrainian].
11. Vieira, R. (2007) *Programming databases. Microsoft SQL Server. Basic course*. Moscow, Dialektika [in Russian].
12. Gunderloy, M., Jorden, J., Tschanz, D. (2007) *Mastering Microsoft SQL Server 2005*. Moscow, Dialektika [in Russian].
13. Henderson, K. (2006) *SQL Server Professional Guide: CD Structure and Implementation*. Moscow, Williams [in Russian].

DEVELOPMENT OF UNIFIED INDUSTRIAL DATABASE OF THE TECHNICAL CONDITION OF COAL MINE HEADGEAR

V.A. Kulish, E.S. Krylov

SC «Institute «UKRNDIProekt» of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. 46/2 Akademik Paladin Prosp., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: post.unp@ukr.net

SC «Institute «UKRNDIProekt» performed scientific-technical studies, the results of which were used to develop a unified industrial database of the technical condition of coal mine headgear (DB). Its purpose is ensuring the reliable and safe operation of headgear, due to introducing system certification and assessment of their performance by the actual technical condition. Trials of the DB using the information, obtained from coal enterprises on diagnostic-technical characteristics of the headgear technical condition demonstrated its efficiency and allowed highlighting the directions of its further improvement. 13 Ref., 8 Fig.

Keywords: technical condition, scientific-technical studies, database, mine headgear, diagnostic-technical characteristic, monitoring, software

Надійшла до редакції 30.05.2021



Нова книга

Электронно-лучевая сварка. Технологии. Оборудование. Материалы: Сб. статей под ред. чл.-кор. НАН Украины В.М. Нестеренкова. — Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2021. — 390 с.

Замовлення на книгу прохання надсидати до редакції журналу.

Тел.: (044) 200-82-77, E-mail: journal@paton.kiev.ua

З ІСТОРІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ В УКРАЇНІ

У наш час відбуваються істотні зміни в управлінні експлуатацією машин, обладнання, конструкцій та споруд. Вчені і розробники, які спеціалізуються в області створення високих технологій, приступили до практичної реалізації в промисловості проектів, що визначають нову, більш досконалу технологію контролю, коли, знаходячись на будь-якій відстані від контролюваного об'єкта, можна у будь-який момент часу знати його стан і передбачити його поведінку в майбутньому.

Початок цим процесам, підходам до вирішення інженерних завдань та їх реалізації закладено працями і діяльністю багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених. Минуло вже більше півстоліття з дня організації і початку робіт зі створення теорії, методів і засобів технічної діагностики зварних конструкцій і матеріалів у нашій країні. За цей час виконано величезний обсяг робіт, створена, по суті, нова технологія контролю стану конструкцій, розроблена і серійно випускається необхідна для цих цілей апаратура, створені відповідні організаційні структури для приведення в дію всього механізму забезпечення безпеки експлуатації конструкцій і споруд.

Роботи зі створення теорії і методів прогнозування працездатності конструкцій координувалися організованою Державним комітетом СРСР з науки і техніки в 1963 р. при Інституті електрозварювання (ІЕЗ) ім. Є.О. Патона АН України Науковою Радою «Нові процеси зварювання і зварні конструкції». У складі секції «Зварні конструкції» Наукової Ради почала функціонувати робоча група № 3 «Технічна діагностика і точність зварних конструкцій». Організував і почав дослідження і розробки по створенню і освоєнню нових діагностичних технологій академік Б.Є. Патон (рис. 1).

На початку своєї діяльності робоча група зосередила основну увагу на традиційному питанні технології виробництва зварних конструкцій – забезпеченні їх точності. Створення такої групи дик-

тувалося необхідністю координації та цільового фінансування науково-дослідних і конструкторських робіт вчених і фахівців зі створення способів обліку шкідливого впливу наслідків зварювання на геометрію конструкцій. Особливо великі неприємності зварювальні деформації доставляли при виготовленні великогабаритних листових конструкцій, зварних станин металорізальних верстатів, які почали приходити на зміну литим, при виготовленні рамних конструкцій, які тримають високоточні великогабаритні елементи (наприклад, дзеркала радіотелескопів).

Необхідно було проводити більш глибоке цілеспрямоване вивчення цих процесів з урахуванням розпочатого бурхливого розвитку електронно-обчислювальної техніки.

Вивчення механізму явищ, пов'язаних з процесом зварювання, і таких, що призводять до втрати конструкцією основної (розрахункової) форми рівноваги, дозволило отримати важливі теоретичні результати і засновані на них методи та засоби боротьби з викривленням зварних конструкцій. Не менш важливим досягненням цих досліджень стали роботи, що з'явилися спочатку як супутні основним, а потім стали самостійними – роботи з оцінки стану матеріалу конструкції. Останні базувалися на обчислювальній техніці, що дозволило зовсім по-новому поглянути на одну з найважливіших проблем техніки – проблему забезпечення безпеки експлуатації зварних конструкцій.

Результати перших досліджень показали, наскільки складна ця проблема. Назріла необхідність виділення цього напрямку в самостійне з тим, щоб можна було сконцентрувати зусилля вчених і розробників на вирішенні цілої низки проблем, що виникли при більш ретельному аналізі. Потрібно було скоротити час наукового пошуку і отримати більш якісні результати. В 1979 р. створюється нова секція в складі Наукової Ради – «Діагностика надійності зварних конструкцій», в роботі якої взяли участь великі академічні та галузеві науково-дослідні інститути, вузи та промислові підприємства, в діяльності яких істотне місце займали питання забезпечення безпеки експлуатації конструкцій і споруд; підприємства і організації, що випускають або причетні до випуску конструкцій, аварії на яких могли призвести до серйозних екологічних наслідків. Це, в першу чергу, Інститут атомної енергії ім. І.В. Курчатова (ІАЕ), ЦНДІМАШ, КБ «Південне», ЦНДІ ім. акад. О.М. Крилова, ЦНДІ конструкційних матеріалів «Прометей», Центральний аерогідродинамічний інститут (ЦАГІ), ЦНДІМАШ, Хабаровська філія ВНДІФТРВ Держстандарту СРСР, НДІ технології машинобудування, ЦНДІ Матеріалів, НДІ «Квант», Чорноморський суднобудівний завод, Севмаш, ВНДІНК, які представили майже всі



Рис. 1. Фахівці на чолі з академіком Б.Є. Патоном знайомляться з впровадженням систем АЕ моніторингу на Одеському припортовому заводі



Рис. 2. Голова Державного комітету з науки і техніки СРСР академік В.О. Кирилін знайомиться з роботами ІЕЗ ім. Є.О. Патона в області точності і технічної діагностики зварних конструкцій, 1977 р.

основні галузі народного господарства країни, а також МВТУ ім. Н.Е. Баумана, МІФІ, НДІ математики і механіки при Ростовському-на-Дону державному університеті.

Україну представляли як академічні, так і вищі навчальні заклади: Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного, ІЕЗ ім. Є. О. Патона, Інститут гідродинаміки, КПП та КДУ ім. Т.Г. Шевченка (м. Київ), ХПІ і ХДУ (м. Харків).

Аналізуючи проблему оцінки стану матеріалів конструкцій, вчені звернули увагу на значні можливості методу акустичної емісії (АЕ), який інтенсивно розвивався в різних країнах як метод неруйнівного контролю. Такі організації, як Донецько-Ендовецький, Фізикал Акустик Корпорейшн, Вейв Діджитал (США), деякі фірми в Англії, Японії, Фінляндії досить активно займалися вирішенням цієї проблеми. Центральний інститут фізичних досліджень Угорської АН (м. Будапешт), Празький політехнічний інститут (Чехословаччина), Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАНУ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона (м. Київ), Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ (м. Львів), ХФТІ (м. Харків), ІАЕ, ЦАГІ, ЦНДІТМАШ (м. Москва), ВНДІ-ФТРВ (м. Хабаровськ) також вже мали суттєві досягнення в застосуванні АЕ як засобу неруйнівного контролю. Дещо пізніше до них підключилися Інститут надтвердих матеріалів (м. Київ), Київський інститут інженерів цивільної авіації, Технологічний університет «Поділля» (м. Хмельницький).

Необхідно було створити методику і розробити таку технологію, які могли б не тільки визначати координати місць підвищеної АЕ активності, але і розшифровувати інформацію, яка несе відомості про зміни цілісності структури матеріалів, що руйнуються, навчити апаратуру прогнозувати залишковий ресурс матеріалів конструкцій. Така

функція методу і апаратури на його основі була значно складнішою за функцію визначення координат і була вирішена значно пізніше.

Активізація робіт в напрямку технічної діагностики конструкцій вимагала вживання необхідних заходів для більш чіткої їх організації та планування, для контролю ходу їх виконання. В 1983 р. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона на базі лабораторії з технічної діагностики зварних конструкцій створюється структурний відділ того ж напрямку, а незабаром при Президії АН створюється Наукова Рада «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», в складі якої почали працювати більше 20 інститутів і організацій. З цього моменту роботи в області технічної діагностики конструкцій, що експлуатуються, починають носити цільовий планований характер.

У 1982 р. створена робоча група при РЕВ (Рада економічної взаємодопомоги, 1947–1991 рр.) для виконання нової спільної теми «Розробка, дослідження і застосування засобів акустичної діагностики зварних конструкцій», що об'єднала зусилля фахівців з Болгарії, Угорщини, Радянського Союзу, Польщі, Румунії, Чехословаччини та Югославії. Центром робочої групи стає ІЕЗ, що вже очолив на той час роботи з цього напрямку в країні (рис. 3).

Інтенсивний розвиток робіт вимагав і більш інтенсивних обмінів результатами досліджень. З 1986 р. починають працювати Всесоюзний методологічний семінар з питань технічної діагностики, створений при Президії АН України, і міжнародна школа «Акустична емісія в діагностиці передруйнівного стану і прогнозуванні руйнування зварних конструкцій», перше засідання якої відбулося в жовтні 1986 р. у м. Варна (Болгарія) на базі комбінату контрольно-зварювальних робіт (рис. 4).

Одним з істотних досягнень методологічного семінару став прогноз розробок в області створення методів і засобів діагностики на промисловій основі. Розглядалися два методи діагностування матеріалів – на основі глибоких фундаментальних досліджень і на основі статистичних даних. В першому випадку на базі застосування методів квантової механіки руйнування, апаратура і



Рис. 3. Засідання робочої групи РЕВ з технічної діагностики. У засіданні беруть участь представники Болгарії, Угорщини, Польщі, України, Чехословаччини та Югославії (листопад, 1983 р., м. Київ)

методику її застосування могли бути створені до 2010 р. В другому – у 1995 р. Вже у 1993 р. з'явився перша діагностична система ЕМА-1. Таким чином, досить складний механізм прогнозу все ж правильно передбачив появу серійних діагностичних систем, що працюють за другим методом.

Складність прогнозу полягала в тому, що необхідно було передбачити розвиток не тільки власне теорії діагностування, але і розвиток суміжних галузей знань і відповідної техніки, на базі яких здійснювалися розробки. Це – можливості обчислювальної техніки, здатної обробити в стислий час досить великі потоки інформації, що надходить з контрольованої поверхні виробів, і вимірювальної техніки, такої, як датчики і вимірювальні прилади, яка була б здатна надати на вхід обчислювальної машини достатню, за вимогами теорії і точності вимірювання, інформацію. Також особливій уваги потребувала і недостатня кількість фахівців в області діагностики матеріалів.

Розглядаючи цю проблему як одну зі складових частин проблеми забезпечення надійності та безпеки експлуатації конструкцій і враховуючи, що переважна більшість їх виготовляється із застосуванням зварювання, необхідно було організувати підготовку фахівців в області технічної діагностики на базі великих навчальних центрів країни. Починаючи з 1990 р., спільними зусиллями секції ТД, ІЕЗ і КПП при ряді вузів країни, в тому числі КПП, на базі спеціальності «Обладнання і технологія зварювального виробництва» створюється нова спеціалізація 12.05.04 «Діагностика і міцність зварних конструкцій» для підготовки фахівців в області діагностики технічного стану і прогнозування ресурсу зварних конструкцій. У 2007 р. ВАК України створює Вче-

ну раду із захисту кандидатських і докторських дисертацій за спеціальністю 05.02.10 «Діагностика матеріалів і конструкцій». З кінця 1994 р. на базі ІЕЗ успішно діють курси підготовки фахівців з технічної діагностики для осіб, які вже мають досвід з контролю та працюють в різних галузях промисловості (рис. 5). З 1998 р. ці курси почали працювати спільно з Навчально-методичним центром Держнаглядохоронпраці України (потім – Держгірпромнагляд України, з 2015 р. підпорядковується Держпраці України). Вже до жовтня 2007 р. було підготовлено 2139 фахівців, до теперішнього часу – близько 5 тисяч (рис. 5).

Більш широкому обміну думками в області розробок з технічної діагностики сприяла поява республіканського міжвідомчого збірника «Діагностика і прогнозування руйнування зварних конструкцій» (1985–1989 рр.). У 1989 р. почав видаватися періодичний щоквартальний всесоюзний науково-теоретичний журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», який з 1993 р. стає міжнародним. Журнал широко відомий як в Україні, так і за кордоном. Уже перший номер журналу був перевиданий у повному обсязі у Великобританії, що дозволило залучити до його тематики фахівців, які спілкуються англійською мовою. Журнал почали випускати бібліотеки і організації Західної Європи, США і Японії.

Значна увага приділялась і розробці обладнання для проведення досліджень в області технічної діагностики. Перший дослідний прилад для діагностики матеріалів на базі методу АЕ був розроблений у 1988 р. Це ще не була діагностична система, хоча прилад виконував досить багато діагностичних функцій. Перший чотирьохканальний прилад конструкції Угорського інституту ядерних



Рис. 4. Перша міжнародна школа з технічної діагностики (м. Варна, Болгарія, жовтень 1986 р.)



Рис. 5. Перший випуск слухачів курсів підготовки фахівців з технічної діагностики, грудень 1994 р. (А.Я. Недосека – перший ряд в центрі)

досліджень ЦІФІ з математичним забезпеченням розробки ІЕЗ ім. Є.О. Патона з'явився у 1989 р. Випробування цього приладу здійснювалися при дослідженні зародження і розвитку дефектів в процесі навантаження трубчастих елементів морських стаціонарних платформ (рис. 6).

Випробування показали високу ефективність приладу. Дефекти, що зароджувались, виявлялися на мікрорівні, коли скупчення дислокацій тільки починали утворювати область, де в подальшому мала з'явитися і привести до руйнування конструкції тріщина. Це було підтверджено при продовженні випробувань. Апаратура стала залучатись до робіт на підприємствах та в організаціях нашої країни.

Проте час ішов і з'явилися додаткові дані про процеси, що протікають в матеріалах при їх деформації. Необхідно було створювати більш досконалі методи і апаратуру для діагностики стану матеріалів конструкцій і споруд.

У 1993 р. з'являється нова, більш досконала модель діагностичної апаратури – система діагностики сімейства ЕМА (Evaluation of Material Ability). Серед переваг цієї апаратури є робота не тільки з датчиками АЕ, а й, за необхідністю, з іншими типами датчиків.

Апаратура реалізувала запропоноване фахівцями ІЕЗ нове комплексне поняття в оцінці матеріалу при його деформації – вектор стану матеріалу (ВСМ), що представляє до розгляду не окремі вимірювані величини, а їх зв'язний комплекс. З'явилася модифікована апаратура сімейства ЕМА – діагностичні системи ЕМА-2, ЕМА-3. На сьогодні

ні це системи ЕМА-4 і ЕМА-3Е – самонавчальна експертна система (рис. 7).

Підприємства України почали проявляти все більший інтерес до результатів розробок. Виникла потреба у створенні центру, який би став спеціалізованою перехідною ланкою між промисловістю та державними органами, що видають нормативну документацію по методам регламентних випробувань конструкцій. Для вирішення цього завдання, а також для координації робіт з контролю за станом конструкцій зусиллями трьох відомств – Держстандарту (Держспоживстандарт), Держнаглядохоронпраці (Держпраці) і Академії наук – у 1993 р. на базі ІЕЗ створюється Технічний комітет стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», який очолив академік Б.С. Патон. Створений ТК приступив до роботи в усіх галузях промисловості. У складі комітету були створені робочі підкомітети, до управління якими були залучені провідні фахівці галузей. Тепер випробування і оцінка стану матеріалів конструкцій і споруд в Україні знаходяться під наглядом і контролем ТК-78. Ми навели коротку характеристику розвитку робіт в області технічної діагностики матеріалів конструкцій і становлення організаційних структур, що направляють і координують ці роботи, за порівняно короткий проміжок часу, коли технічна діагностика зародилася і почала розвиватися як самостійний напрям. Зараз початкова стадія робіт завершена. На практиці використовується досить строга методологія, на її базі створена і успішно застосовується відповідна апаратура. Побудовано організаційні структури, що дозволяють комплексно вирішувати найбільшу проблему сьогодення

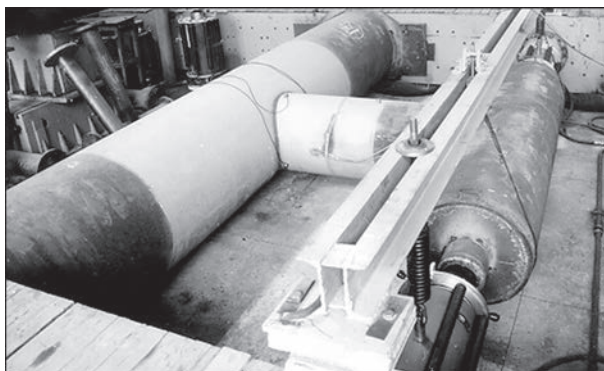


Рис. 6. Випробування елементів морських стаціонарних платформ акустико-емісійним методом



Рис. 7. Системи сімейства ЕМА

дня і, напевно, майбутнього – проблему забезпечення безпеки експлуатації конструкцій і споруд.

Створені і успішно застосовуються при контролі технологія і устаткування, що дозволяють здійснювати 100 % контроль і прогнозування залишкового ресурсу конструкцій без їх розбирання і попередньої підготовки. Створені в Україні та Угорщині діагностичні системи ЕМА-3, ЕМА-4 можуть оцінювати стан і визначати руйнівне навантаження посудин високого тиску, сховищ різного призначення, компресорних станцій, магістральних та технологічних трубопроводів, агрегатів котлів, котельних установок, рухливих деталей, роторів турбін, елементів мостів та інших конструкцій в процесі випробувань і експлуатації. Апаратне забезпечення такого обладнання виконує автоматизовані вимірювання, збір, обробку та зберігання діагностичної інформації. Програмне забезпечення формує і видає інформацію про стан конструкцій, попереджає про можливу небезпеку і прогнозує збереження їх працездатності (рис. 8).

Слід зазначити, що апаратне і програмне забезпечення систем проходять обов'язкову метрологічну перевірку на базі ДП «Укрметрестандарт». Державні стандарти України, інші нормативні документи забезпечують застосування систем для різних промислових конструкцій. На базі Держгіртехнагляду і ТК-78 здійснюється навчання і сертифікація спеціалістів із застосування придбаного обладнання. З'явилася нова спеціальність – експерт з АЕ діагностики. Існує сервісна служба, що здійснює обслуговування і супровід приладів в процесі їх експлуатації. Вирішені практично всі питання, пов'язані із застосуванням апаратури сімейства ЕМА в промисловості України.

В подальшому ІЕЗ ім. Є.О. Патона, МДП «Індпром» і АТ «ВІДЕОТОН» розробили стаціонарну систему безперервного моніторингу ЕМА-3S. Система призначена для забезпечення експлуатаційної безпеки відповідальних об'єктів промисловості і транспорту і побудована на базі методу АЕ з використанням сучасної апаратури і передових комп'ютерних технологій. Система дозволяє про-



Рис. 9. Кілометрова ділянка магістрального аміакороводу Тольятті–Одеса на мосту через р. Дніпро

водити оцінку фактичного стану об'єкта контролю без зупинок і втручання персоналу в повністю автоматичному режимі. Закладені технології прийняття рішення про небезпеку стану контрольованого виробу дозволяють своєчасно запобігти аварійним ситуаціям. Необхідна для контролю інформація прямо з контрольованого об'єкта по мережі Інтернет може бути передана в будь-яку необхідну для прийняття остаточного рішення точку. На рис. 9 представлено один з таких контрольованих об'єктів, коли кілометрова ділянка труби, що проходить по мосту через р. Дніпро, контролюється безперервно по всій своїй довжині з передачею інформації в м. Київ, де і відбувається її оцінка на центральному діагностичному посту. Контролююча апаратура розташована на обох берегах річки.

Системи сімейства ЕМА в різних конфігураціях застосовуються на багатьох підприємствах України. В даний час функціонують 8 комплексів безперервного моніторингу на великих хімічних виробництвах (6 – на різних об'єктах АТ «Одеський припортовий завод», 2 – на трубопроводах ДП «Укрхімтрансміак») і 2 – на об'єктах київських ТЕЦ. Також діють мобільні діагностичні лабораторії. Із застосуванням систем сімейства ЕМА випробувано понад 2,5 тис. об'єктів в Україні, Росії та Польщі. У цьому чимала заслуга відділу технічної діагностики ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України і МДП «Індпром», якими виконано величезний комплекс науково-дослідних і організаційних робіт, що дозволив зробити вагомий внесок у створення теоретичних передумов в області прогнозуючої діагностики і отримати значні результати в практичному застосуванні цих розробок.

Спільними зусиллями вчених і розробників контроль технічного стану конструкцій з трудомісткого і незручного процесу поступово перетворюється в автоматизований, більш доступний і ефективний.

*А.Я. Недоска, С.А. Недоска, М.А. Яременко,
М.А. Овсієнко, О.І. Бойчук, І.Г. Волошкевич*



Рис. 8. Складові BSM технології: обладнання, програми і супроводжуюча документація

МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ З'ЄДНАННЯ МАТЕРІАЛІВ»

31 травня – 2 червня 2021 р. в Києві в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона пройшла Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології з'єднання матеріалів», організована ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Товариством зварників України, Науково-дослідним інститутом спеціального обладнання в провінції Чжецзян (Китай) та Міжнародною Асоціацією «Зварювання». До початку роботи конференції були видані праці (за темами пленарних доповідей) у вигляді спеціальних випусків журналів «Автоматичне зварювання», «The Paton Welding Journal» № 5, 2021 р. та збірки тез пленарних і стендових доповідей.

В роботі конференції взяли участь вчені, викладачі та інженерно-технічні фахівці НДІ, вузів, промислових і комерційних підприємств ряду міст України, а також зарубіжні учасники з Польщі та Словаччини. Всього понад 70 осіб.

Учасники конференції представляли ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ТОВ «Патон Інтернейшнл», ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК», ТОВ «Суми-Електрод», НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Дніпропетровський національний університет, НТУ «Харківський політехнічний інститут», ТОВ «ПЛАН-Т», ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Інститут чорної металургії НАН України, ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ», Інститут проблем матеріалознавства ім. І.Ф. Францевича, ПрАТ «НВО «Червона Хвиля», Інститут зварювання в Глівіцах, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, ДП «Міжнародний центр електронно-променевих технологій», Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України та інші.

На відкритті конференції було зачитано вітання директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона академіка І.В. Кривцуна, в якому наголошено на важливості зустрічей вчених та фахівців, які сприяють підвищенню ефективності зварювального виробництва.

Заступник директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона академік Л.М. Лобанов в доповіді «Сучасний стан

і напрямки розвитку зварювального виробництва» зазначив, що базовим технологічним процесом з'єднання матеріалів залишається зварювання, яке в багатьох випадках не має альтернативних рішень для різних галузей промислового виробництва – машинобудування, суднобудування, енергетики, промислового і цивільного будівництва, газо- і нафтовидобувного виробництва та інших. Зварюванню піддаються практично будь-які метали і неметали в різних умовах – на землі, у морських глибинах і у космосі. Основою зварювального виробництва залишається зварювання плавленням. Лідируюче положення на ринку зварювального обладнання і матеріалів займають апаратура і витратні матеріали для дугового зварювання. Характерною тенденцією світових ринків зварювальної техніки є безперервне збільшення частки обладнання і матеріалів для механізованих і автоматизованих способів зварювання.

На конференції в пленарному режимі було заслухано 26 доповідей з багатьох актуальних тем сучасного зварювального виробництва. Ряд доповідей увійшли, як вище зазначалося, в травневий випуск журналів «Автоматичне зварювання» та «The Paton Welding Journal».

Серед доповідей, що викликали найбільший інтерес у слухачів, відзначимо: В.Ю. Білоуса «Аргонодугове зварювання високоміцного економнолегованого псевдо β -титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe»; І.М. Гречанюка «Сплави Ni(Co) CrAlYSi для захисних покриттів»; Д.В. Ковальчука «Технологія металевого 3D друку xBeam 3D Metal Printing на шляху до промислового впровадження»; В.М. Коржика «Розвиток та нові можливості плазмово-дугових технологій в з'єднанні та обробці матеріалів»; О.А. Мазура «Ринок зварювальних матеріалів у світі та в Україні».

На конференції були представлені 30 стендових доповідей, тези яких були опубліковані до початку роботи конференції. Тематика стендових доповідей охоплює широкий спектр питань для вирішення технологічних задач в області зварювального виробництва.

Під час конференції проведена виставка зварювального обладнання та технологій, зварювальних матеріалів, засобів неруйнівного контролю під назвою «Зварювання та споріднені технології» в демонстраційній залі ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

По завершенню конференції учасники відвідали ТОВ «Фроніус Україна» і ТОВ «Патон Інтернешнл».

Олександр Зельніченко,
Володимир Ліподаєв



Під час сесії стендових доповідей

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

(спогади В.О. Троїцького)

Я бував багато разів з Борисом Євгеновичем у різних відрядженнях – у Москві, Харцизьку, Донецьку, Висі, Копенгагені, Лондоні та інших містах, виконував його доручення.



Борис Євгенович був другом, цікавим співрозмовником і в той же час жорстким прагматиком, був не терплячим до невігластва. Саме завдяки його природній чарівності, а також розумінню проблем регулювання в силовій електротехніці я переїхав до Києва на його запрошення.

З благословення та за підтримки Бориса Євгеновича Патона в ІЕЗ було розвинене багато електротехнічних ідей (магнітна комутація, модуляція зварювального струму, резонансні джерела струму, плавне регулювання струму та напруги без силових напівпровідників в основних електричних ланцюгах і т.п.) і передові дефектоскопічні ідеї. Завдяки йому ІЕЗ був «меккою» не тільки зварювання та спеціальної електрометалургії, але й дефектоскопії!

Думаю, що мої спогади про довгі роки тісного спілкування з Борисом Євгеновичем доповнять портрет цього великого вченого, який зіграв важливу роль у розвитку науки, який був і залишиться назавжди головним дефектоскопістом країни. У мене з Борисом Євгеновичем склалися дуже теплі людські відносини. Нас поріднювала саме та обставина, що він був за освітою, як і я, електромеханіком. Борис Євгеновичу подобалися електротехнічні ідеї.

Було у нього багато і науково-фантастичних ідей, такі, як електростанції прибою (сила прибою, приливу та відливу), створення механічних акумуляторів для автомобілів та залізничного рухомого складу, в яких накопичується енергія під час гальмування за рахунок її рекуперації і т.п.

Тоді ще Ілона Маска з електромобілями не було, а ми вже обговорювали проблеми накопичення та витрати електроенергії при різних формах руху та їх рішення. Індивідуальний електротранспорт досі стримують світові нафтові магнати!

Ми обговорювали і багато інших електротехнічних ідей, наприклад, холодні джерела світла і т.п. Однак електродинаміку він приніс у жертву, перекинувши мене на іншу справу, з якою я був не знайомий. За проханням Бориса Євгеновича я був змушений зайнятися зовсім іншою наукою та витягати Держзамовлення. Понад п'ять років найкращі спеціалісти Інституту електрозварювання на чолі з його директором займалися пуском другого цеху Харцизького трубного заводу (ХТЗ). У жертву цій справі було принесено дуже багато чого, в тому числі і наш електротехнічний напрямок з всесвітньо визнаними досягненнями.

Наші успіхи з неруйнівного контролю якості зварних з'єднань при виробництві труб високого тиску для магістральних газопроводів на ХТЗ надихнуло Бориса Євгеновича поправити стан справ з дефектоскопією в інших галузях.

Мало кому відомо, що до 70-го року минулого століття поняття «дефектоскопія» в нашій країні відносилось до астрономії, оскільки основний фахівець з цієї професії – проф. Міхеев М.М. був чл.-кор. відділення астрономії. Я неодноразово їздив в закордонні відрядження (Англію, Німеччину, Югославію та ін.) саме від цього відділення і звітував перед астрономами про результати поїздки.

Організації Міністерства приладобудування, які розробляли дефектоскопічне обладнання, знаходились у Кишиневі, Мінську, Москві, Свердловську, Ленінграді, Нальчику. Цей науковий напрям, на жаль, повільно розвивався в Україні. Ці



Б.С. Патон з керівництвом ІЕЗ

та інші проблеми дефектоскопічного напрямку, непритаманні зварюванню, взявся виправляти Борис Євгенович. Для цього необхідно було підготувати відповідні Постанови Кабінету Міністрів, ДКНТ СРСР і України, а також провести колосальну роботу з реалізації цих Постанов (№№ 142 і 457), створити Програму з розвитку в Україні дефектоскопічного напрямку, вигадати гідну назву для цієї професії тощо. Тому нашому колективу разом з відповідними НДІ різних відомств країни довелося готувати спочатку Постанови ДКНТ і КМ СРСР, а потім всі ці положення відтворювати в Україні через Постанови НАНУ і КМ УРСР.

У 1984 р. в НАН України було затверджено Програму по ТДНК, яку виконували 26 НДІ різної відомчої приналежності. Ми почали періодично випускати збірник праць з ТДНК, на основі якого пізніше організували випуск журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», почали випускати в Росії журнали «Діагностика і контроль», «В світі НК», а пізніше журнал «Територія NDT» за участю 11 країн, включаючи Ізраїль. З подачі Бориса Євгеновича в ІЄЗ з'явилися нові дефектоскопічні напрямки, такі, як електрорентгенографія, електромагнітоакустичний УЗК, магнітографія.

Можливість появи зварних з'єднань низької якості, наявність специфічних зон термічного впливу, деградація структури металу до сих пір приводять до того, що найвідповідальніші конструкції (укриття на ЧАЕС, літаки і т.п.) виготовляють майже без зварювання. Тому не випадково наш інститут під керівництвом Б.Є. Патона став провідною організацією з розвитку дефектоскопії. З часом наш авторитет піднявся до такого рівня, що ми й досі на безоплатній основі отримуємо професійні журнали США, Німеччини, Англії, Італії, Японії та ін.

Б.Є. Патон так розворушив тему дефектоскопії, що в 1984 році було створено Наукову раду з назвою «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» при Президії НАНУ. Ця наукова рада підготувала Програму, що дало поштовх на консолідацію та розвиток НК в УРСР. На основі цієї Програми в січневому номері 1987 року «Вісник Академії наук Української РСР» було опубліковано основну статтю академіка Б.Є. Патона «Неруйнівний контроль і надійність технічних об'єктів». У назві цієї Програми та статті ще немає слів «технічна діагностика». Дані слова народжувалися у пошуках і з'явилися пізніше. Це особлива ідея Б.Є. Патона, який розумів, що дефектоскопія далеко не все, що необхідно. Потрібна ще діагностика. Багато розмов було про слово «технічна».

Протягом 1992-1993 рр. було сформовано нову Програму, яка вже мала назву «Технічна діагностика та неруйнівний контроль». Ця програма включала вже 263 проєктів і 160 організацій-викон

навців. Програма була затверджена ДКНТ і НАН України. Так, в переліку головних напрямків розвитку науки і техніки України з'явилася тема «Діагностичне забезпечення надійної та ефективної експлуатації енерго- і ресурсоемних машин» і, починаючи з 1995 р., з'явилася тема «Неруйнівний контроль та технічна діагностика».

Б.Є. Патон очолював комітет ТК-78 Держстандарту, який займався гармонізацією національної науково-технічної документації в області технічної діагностики та неруйнівного контролю та відповідності її міжнародним стандартам, які виробляються комітетом ТК-135 ISO. Так, нами видано більше 90 стандартів з різних методів НК.

З ініціативи Бориса Євгеновича у 1994 році спільним наказом № 172/64/106/221 від 7 липня 1994 р. Міністерства освіти України, Національної академії наук України, Комітету України по нагляду за охороною праці та Державного комітету України по нагляду в атомній промисловості в структурі УТНКТД був створений Національний атестаційний комітет (НАК) України з неруйнівного контролю. Головним завданням НАК є організація системи сертифікації персоналу, яка відповідає міжнародним стандартам.

Пригадую як наші співробітники – Демидко В.Г. і Кір'янова Н.А. чергували біля основних Кремлівських воріт (Спаських, Боровицьких), звідки виходили депутати Верховної Ради колишнього СРСР, для того, щоб привести Бориса Євгеновича в Московський НДІ інтроскопії (НДІН), де ми проводили численні наради з основними учасниками комісії Державного комітету з науки і техніки СРСР (ДКНТ), з відповідальними виконавцями підготовлених нами Постанов КМ і ДКНТ №№ 142 і 457.

Багато питань виконання і коригування Постанов вирішувалися телефонними дзвінками Бориса Євгеновича з кабінету академіка Ключова В.В.



Завдяки Б.Є. Патону, ми були першими в країні, хто створив власне республіканське науково-технічне суспільство з НК, яке об'єднало професіоналів. Одним з головних напрямків роботи УТНКТД є консолідація фахівців в області фізичних методів контролю якості зварних з'єднань, матеріалів і виробів.

Розповім кілька епізодів з нашої поїздки до Данії. Наш відділ багато років дружив з Данським товариством NDT, данськими фірмами «Migatronik», «Force», «Jom». Почалася ця дружба з часів, коли я займався регульованими джерелами струму для зварювання та інших технологічних процесів. Ця діяльність була близька основному виробнику подібного обладнання в Данії – фірмі «Migatronik».

У нас була загальна програма з виробництва джерел струму, регульованих магнітною комутацією, основні патенти по якій належать Україні. Трохи пізніше, коли у нас активізувався дефектоскопічний напрям, ми подружилися і з академічною організацією Данії – інститутом «Force», який за своєю структурою нагадує ІЕЗ ім. Є.О. Патона. В інституті «Force» розташовувалася і штаб-квартира Данського товариства неруйнівного контролю (DNDT).

Інститут «Jom» є аналогом міжнародного інституту зварювання (MIS). «Jom» – громадський інститут, яким керують англійці, проводить щорічні конференції. Конкуруючи з MIS, цей інститут об'єднував багато НДІ різних країн. Довгий час більшість заходів інституту «Jom» проходило за участю нашого відділу.

Борис Євгенович всіляко сприяв нашим контактам з данськими організаціями, підтримував наші тривалі відрядження до цієї країни, в тому числі і за участі технологів Дослідного заводу зварювального устаткування ІЕЗ. Так ми працювали багато років, поки особливі обставини, пов'язані з ЧАЕС, не змусили Бориса Євгеновича взяти особисту участь у черговій нашій поїздці в інститут «Jom», відвідати фірми «Migatronik» і «Force».

Борис Євгенович ніколи раніше не був на батьківщині своїх предків, що підігрівало його інтерес до цієї поїздки. Якщо минулі відрядження ми організовували самостійно по лінії Українського та Данського товариств НК, то цю поїздку міжакадемічного плану організував Білодід Р.М. саме як міждержавний візит.

У Данії існують кілька академій. Ми потрапили до Академії літератури, історії та пошти, в якій немає технічних НДІ. Проте, ми змогли побувати у всіх цікавих для нас організаціях і провели важливу для України роботу.

В інституті «Force» Борис Євгенович підписав всі необхідні папери про спільні роботи по запобі-

ганню наслідків аварії на ЧАЕС та спільних заходах щодо вдосконалення діагностики устаткування, що експлуатується на АЕС.

На фірмі «Migatronik», яка виробляє зварювальне обладнання, ми підвели підсумки по спільному виробництву зварювальних джерел, регульованих магнітною комутацією за нашими патентами.

Особливо цікавою було наша участь в роботі шостої сесії інституту «Jom», де я виступив з доповіддю по наших спільних роботах з фірмами «Migatronik» і «Force».

З великим натхненням присутні вітали Бориса Євгеновича Патона. Всі ці дні ми жили на базі інституту «Jom». По місту нас возив на власному автомобілі співробітник інституту «Force», однофамілець Бориса Євгеновича – Курт Патон. У Данії це дуже поширене прізвище.

З Данії ми відлітали так само непросто, так як наш літак через погані метеоумови змінив курс і був приземлений в аеропорту Хітроу (Англія), де ми очікували 9 годин на відкриття аеропорту Бориспіль. Тут нас знайшов посол України в Англії С. Комісаренко і українці, які мешкають в Англії. З усією цією публікою Борис Євгенович дуже швидко знайшов спільну мову. В результаті були і пісні, і вірші, які прекрасно читав Борис Євгенович. Як виявилось він добре знав і пам'ятав ранні ліричні вірші П.Г. Тичини.

Після цієї поїздки у нас активізувалися контакти з данськими науковими організаціями, в яких побував Борис Євгенович. В Україні мало хто знає про діяльність інституту «Jom». Правильна назва цієї міжнародної організації – Informational Institute of Welding (IIW). У 2019 р. ця організація проводила 20-ту конференцію на своїй базі в м. Helsingor, на якій свого часу працювали і ми з Борисом Євгеновичем.

Борис Євгенович гаряче підтримував створення міжнародної академії дефектоскопії (ANDTI), членом якої він був, установчі збори якого відбулися в м. Брешія (Італія) в Соборі Святого Павла. Не всі міжнародні наукові діячі були такими, як Борис Євгенович, здатними зрозуміти важливість створення ANDTI. Почалося цькування президента ANDTI проф. G. Nardony, яке він важко переносив.

До 2011 року серйозно зміцніла опозиція проти ANDTI, яка дорікала академікам ANDTI в дублюванні діяльності EFNDT і ICNDT, і це було схоже на правду. Статуту цих організацій були дуже схожі. На збори в Угорщині в м. Еґер приїхало досить багато академіків. На конференції була хороша виставка, на якій я зустрівся зі знаменитим Янишевим, постачальником АЕ обладнання в Україну, і багато чого дізнався про схему впровадження обладнання АЕ в Україні, якому Борис Євгенович надавав великого значення.

Напередодні будь-якого великого суспільного заходу зазвичай засідає Оргкомітет, на якому планується регламент, обговорюється порядок проведення майбутніх зборів. Для цього і зібрався Оргкомітет ANDTI. Його відкрив президент G. Nardony з сумним повідомленням, що погані люди сильно критикують ANDTI, необхідність існування такої Академії. Роль науково-технічних товариств EFNDT (Європи) і ICNDT (усієї планети) не може замінити і конкурувати зі зборами вчених NDT. Приклад діяльності Бориса Євгеновича викликав інтерес у академіків ANDTI. Усі вони чули про цю людину та поважали його.

Борис Євгенович був членом багатьох академій наук і надавав великого значення фундаментальним академічним наукам, які тільки за деякий час дають практичні результати. Він був членом і ANDTI, знав G. Nardony. Тому, коли ми Борису Євгеновичу розповіли про нашу перемогу в Угорщині, він був щасливий. Борису Євгеновичу зрозуміло було все людське, в тому числі і причини, через які діячі EFNDT і ICNDT намагалися провалити ANDTI.

Борис Євгенович умів дружити з «сильними світу цього». Цей його дар приносив велику користь всій нашій команді. На фото відображено його контакт з Л.Д. Кучмою, якого він просив сприяти УТНКТД в проведенні робіт на «Південмаші». Б.Є. Патон і Л.Д. Кучма зіграли важливу роль в становленні дефектоскопії. Якщо Борис Євгенович це робив, розуміючи, що без НК обійтися не можливо, а Леонід Данилович довгі роки дозволяв нам проводити конференції з дефектоскопії на його базі під м. Дніпро, підтримував нашу роботу з КБ «Південмаш».

Борис Євгенович дуже пишався цими досягненнями, в яких сконцентровані багаторічні роботи Інституту. Так, за допомогою тангенціального просвічування може бути визначено профіль

стілки труби, товщина ізоляції та її прилягання до труби. Цією технологією володіє тільки ІЕЗ.

Борис Євгенович придавав велике значення розвитку АЕС. Він з президентом Академії наук СРСР А.П. Александровим проводили великі наради на ЗАЕС, куди приїжджало багато фахівців різного профілю з усієї величезної країни, яка називалася СРСР, обговорювалися і замовлялися багато питань, у тому числі й неруйнівний контроль.

Свого часу в Харцизькому і Вискунському трубних цехах Борис Євгенович бував в камерах рентген-телевізійного контролю (РТК), який є остаточним в долі труби. У цих камерах стояли установки РТК. Тому особливою гордістю Бориса Євгеновича були наші досягнення в створенні мініатюрного портативного цифрового рентгено-телевізійного обладнання на основі високочутливих ПЗС-матриць, флуоресціюючих екранів і твердотільних мініатюрних R-перетворювачів, які на порядок менші ніж ті, що він бачив раніше.

Відсутність проміжних носіїв інформації (плівок, п/п пластин) на порядок підвищує продуктивність, дозволяє вести контроль в реальному часі і в кілька разів знижує вартість контролю. Борису Євгеновичу довелося перебувати в багатьох різних медичних центрах, багаторазово обстежуватися різними радіаційними методами, де він звернув увагу на відсутність там в останні роки плівкової радіографії. Я обіцяв йому, що цього ми доб'ємося і в зварювальній справі. Тому ми інтенсивно працюємо над безплівковою радіографією. Борис Євгенович допоміг нам придбати мініатюрний стоматологічний японський перетворювач і ми почали реалізувати для промисловості цифрові технології без плівки. Технологія на основі твердотільних або оптоелектронних перетворювачів. Такі технології після комп'ютерної обробки цифрових зображень дають можливість отримати чутливість до 0,1% і проводити вивчення об'єкта в русі.



СУЧАСНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СТАНДАРТІВ З НК

Роз'яснення Міністерства економічного розвитку і торгівлі України з питань застосування стандартів, у тому числі в зв'язку зі скасуванням міждержавних стандартів (ГОСТ)

Ціль щодо скасування міждержавних стандартів, розроблених до 1992 року (далі – ГОСТ), визначена Програмою діяльності Кабінету Міністрів України, затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 09.12.2014 № 695 та схваленою постановою Верховної Ради України від 11.12.2014 № 26-VIII (далі – Програма).

З метою зниження ризиків для суб'єктів господарювання Мінекономрозвитку завчасно було запропоновано зацікавленим сторонам зокрема опрацювати питання щодо:

- скасування ГОСТ, які втратили актуальність;
- розробки національних нормативних документів (стандартів, кодексів усталеної практики (далі – національні стандарти) на заміну відповідних ГОСТ;
- розробки стандартів, кодексів усталеної практики, технічних умов (далі – стандартів) підприємств, установ, організацій, що здійснюють стандартизацію (далі – підприємство), якщо підприємства застосовують положення цих ГОСТ.

Відповідна інформація 27.03.2015 розміщена на веб-сайті державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (далі – ДП «УкрНДНЦ»), яке виконує функції національного органу стандартизації (розпорядження Кабінету Міністрів України від 26.11.2014 № 1163-р «Про визначення державного підприємства, яке виконує функції національного органу стандартизації»).

На виконання Програми ДП «УкрНДНЦ» скасував усі чинні в Україні ГОСТ (із певними датами скасування, зокрема з 2016, 2017, 2018 та 2019 року). Відповідна інформація розміщена на веб-сайті ДП «УкрНДНЦ».

До Мінекономрозвитку та ДП «УкрНДНЦ» надходять запитання від виробників щодо умов застосування стандартів, у тому числі ГОСТ, які скасовано. Нижче наводимо запитання, з яким найбільш частіше зверталися виробники, та надаємо роз'яснення на них.

Чи можна виробникам користуватися скасованими ГОСТ?

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

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

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

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

Виробник має усвідомлювати переваги застосування чинного національного стандарту, який розроблено відповідним технічним комітетом стандартизації з дотриманням процедур стандартизації, який відповідає законодавству, до якого вчасно внесені зміни, який адаптований до сучасних досягнень науки і техніки, вимогам міжнародних, регіональних стандартів та сприяє підвищенню конкурентоспроможності продукції.

Що робити, якщо вимоги прийнятих на заміну ГОСТ стандартів нижчі, ніж були у скасованому? Чи варто знижувати якість?

ДСТУ 1.1:2015 (ISO/IEC Guide 2:2004, MOD) «Національна стандартизація. Стандартизація та суміжні види діяльності. Словник термінів» визначає термін «вимога», як положення, що містить критерії, яких потрібно дотримуватися. Якщо вимога стосується якості продукції, звісно не потрібно знижувати свої можливості, а навпаки використовувати свої переваги під час просування продукції на ринку та застосовувати також інші елементи конкурентної боротьби.

Який із стандартів вважати обов'язковим?

Перш за все слід розглянути питання, яке стоїть рівнів стандартизації, визначених Законом. Тобто Законом встановлено два рівні стандартизації залежно від рівня суб'єкта стандартизації, що приймає стандарти: національні стандарти, прийняті національними орга-

ном стандартизації та стандарти, прийняті підприємствами.

Статтею 23 Закону визначено, що національні стандарти застосовуються на добровільній основі, крім випадків, якщо обов'язковість їх застосування встановлена нормативно-правовими актами. Якщо розглядати питання обов'язковості стандартів у площині господарської діяльності суб'єктів господарювання, то відповідно до частини другої статті 15 Господарського кодексу України застосування стандартів чи їх окремих положень є обов'язковим для:

- суб'єктів господарювання, якщо обов'язковість застосування стандартів встановлено нормативно-правовими актами;
- учасників угоди (контракту) щодо розроблення, виготовлення чи постачання продукції, якщо в ній (ньому) є посилання на певні стандарти;
- виробника чи постачальника продукції, якщо він склав декларацію про відповідність продукції певним стандартам чи застосував позначення цих стандартів у її маркуванні.

Слід звернути увагу на положення, визначені пунктом 3 розділу VI «Прикінцеві та перехідні положення» Закону, які стосуються того, що ще 15 років (з дня набрання чинності Законом) будуть чинні галузеві нормативні документи (стандарти, кодекси усталеної практики та технічні умови, прийняті центральними органами виконавчої влади до набрання чинності цим Законом, а також галузеві стандарти (ОСТ) та прирівняні до них інші нормативні документи колишнього СРСР, галузеві стандарти України (ГСТУ)).

Галузеві нормативні документи також застосовуються на добровільній основі, крім випадків, якщо обов'язковість їх застосування встановлена нормативно-правовими актами. Під час застосування стандарту, який є обов'язковим, слід також врахувати те, що стандарти містять посилання на інші стандарти, положення яких становлять разом сутність цього стандарту, і вимог таких стандартів слід також дотримуватись.

Якими нормативними документами слід користуватись, якщо певний ГОСТ скасовано? Що робити, якщо не має стандарту на заміну скасованого ГОСТ?

Як було зазначено вище у роз'ясненні щодо першого питання, за умови добровільності застосування стандарту, але з метою мати будь-яку інструкцію, правила тощо, які упорядковують діяльність у той чи іншій сфері, може застосовуватися не чинний стандарт, якщо на нього не передбачається робити посилання у відповідній сфері діяльності.

У разі, якщо суб'єкт господарювання має наміри застосувати стандарт та використовувати його позначення, а потрібний йому ГОСТ скасо-

вано, необхідно знайти заміну такому документу. Для цього можна звернутися до Національного фонду нормативних документів (ДП «УкрНДНЦ», вул. Святошинська, 2, тел. 450-06-82). Каталог національних нормативних документів розміщено на офіційному веб-сайті ДП «УкрНДНЦ». Загальна кількість національних стандартів на сьогодні становить 15133 документи.

ДП «УкрНДНЦ» також має доступ до всіх міжнародних та європейських стандартів. Міжнародні стандарти можна придбати в ДП «УкрНДНЦ» або звернутися безпосередньо до міжнародних організацій стандартизації. Але тут потрібно звернути увагу на питання застосування цих стандартів на національних територіях, і самим швидким та дешевим способом їх застосування є прийняття міжнародного або європейського стандарту як національного (наприклад, мовою оригіналу, або методом перекладу).

Тобто законодавство передбачає низку механізмів для отримання необхідного стандарту, враховуючи те, що використавши право, надане підприємству вищезазначеною нормою Закону, суб'єкт господарювання має право отримати свій власний документ, розроблений за своїми власними правилами.

У завершенні цього блоку питань щодо застосування стандартів слід підкреслити переваги, які надають стандарти, враховуючи, що вони встановлюють вимоги, у разі дотримання яких, буде отримано визначений результат. Стандартизація надає можливість нарощування виробничого потенціалу підприємств, створення прогресивних технологій і нових видів високоякісної продукції для того, щоб у міру розвитку вітчизняного ринку та інтеграції у світову економіку розширювати частку української продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках.

Зокрема, застосування стандартів можна розглядати як частину ділової практики кожного суб'єкта господарювання, яка має допомогти:

- раціонально використовувати технічні та людські ресурси;
- враховувати та розвивати правила техніки безпеки та умови захисту природного довкілля;
- зменшувати невиправдане розмаїття, спростити роботу з оформленням замовлення чи підготовки контракту;
- звести до мінімуму витрати на розроблення конструкторської та технологічної документації;
- узгодити організаційні, виробничі та експлуатаційні процеси з економічною вигодою;
- забезпечити технічне обслуговування машин, устаткування, систем тощо;
- забезпечити сумісність продукції та процесів.

Джерело: сайт Мінекономрозвитку України

Міждержавні стандарти з НК, чинність яких в Україні скасовано

Позначення	Назва	Чинність скасовано з
ГОСТ 7512-82	Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод	2019-01-01
ГОСТ 14782-86	Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые	2019-01-01
ГОСТ 17410-78	Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные цилиндрические. Методы ультразвуковой дефектоскопии	2019-01-01
ГОСТ 18353-79	Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов	2019-01-01
ГОСТ 20415-82	Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения	2019-01-01
ГОСТ 20426-82	Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения	2019-01-01
ГОСТ 21104-75	Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод	2018-01-01
ГОСТ 21105-87	Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод	2021-01-01
ГОСТ 21397-81	Контроль неразрушающий. Комплект стандартных образцов для ультразвукового контроля полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов. Технические условия	2019-01-01
ГОСТ 22238-76	Контроль неразрушающий. Меры образцовые для поверки толщиномеров покрытий. Общие положения	2019-01-01
ГОСТ 23055-78	Контроль неразрушающий. Сварка металлов плавлением. Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля	2019-01-01
ГОСТ 23479-79	Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования	2019-01-01
ГОСТ 23480-79	Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. Общие требования	2018-01-01
ГОСТ 23483-79	Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования	2018-01-01
ГОСТ 23667-85	Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров	2019-01-01
ГОСТ 23702-90	Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний	2019-01-01
ГОСТ 23829-85	Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения	2019-01-01
ГОСТ 24034-80	Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения	2019-01-01
ГОСТ 24289-80	Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения	2019-01-01
ГОСТ 24450-80	Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения	2019-01-01
ГОСТ 24507-80	Контроль неразрушающий. Поковки из черных и цветных металлов. Методы ультразвуковой дефектоскопии	2021-01-01
ГОСТ 24521-80	Контроль неразрушающий оптический. Термины и определения	2019-01-01
ГОСТ 24522-80	Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения	2019-01-01
ГОСТ 25113-86	Контроль неразрушающий. Аппараты рентгеновские для промышленной дефектоскопии. Общие технические условия	2019-01-01
ГОСТ 25225-82	Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод	2018-01-01
ГОСТ 25313-82	Контроль неразрушающий радиоволновой. Термины и определения	2019-01-01
ГОСТ 25314-82	Контроль неразрушающий тепловой. Термины и определения	2019-01-01
ГОСТ 25315-82	Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения	2019-01-01
ГОСТ 25714-83	Контроль неразрушающий. Акустический звуковой метод определения открытой пористости, кажущейся плотности и предела прочности при сжатии огнеупорных изделий	2019-01-01
ГОСТ 25997-83	Сварка металлов плавлением. Статистическая оценка качества по результатам неразрушающего контроля	2019-01-01
ГОСТ 26114-84	Контроль неразрушающий. Дефектоскопы на базе ускорителей заряженных частиц. Основные параметры и общие технические требования	2019-01-01
ГОСТ 26126-84	Контроль неразрушающий. Соединения паяные. Ультразвуковые методы контроля качества	2019-01-01
ГОСТ 26170-84	Контроль неразрушающий. Приборы радиоволновые. Общие технические требования	2018-01-01
ГОСТ 26182-84	Контроль неразрушающий. Люминесцентный метод течеискания	2018-01-01
ГОСТ 26266-90	Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования	2019-01-01
ГОСТ 27333-87	Контроль неразрушающий. Измерение удельной электрической проводимости цветных металлов вихретоковым методом	2018-01-01
ГОСТ 27750-88	Контроль неразрушающий. Покрытия восстановительные. Методы контроля толщины покрытий	2019-01-01
ГОСТ 27947-88	Контроль неразрушающий. Рентгентелевизионный метод. Общие требования	2019-01-01
ГОСТ 28277-89	Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Электрорадиографический метод. Общие требования	2019-01-01
ГОСТ 28369-89	Контроль неразрушающий. Облучатели ультрафиолетовые. Общие технические требования и методы испытаний	2019-01-01
ГОСТ 28517-90	Контроль неразрушающий. Масс-спектрометрический метод течеискания. Общие требования	2019-01-01
ГОСТ 28702-90	Контроль неразрушающий. Толщиномеры ультразвуковые. Общие технические требования	2019-01-01
ГОСТ 29025-91	Контроль неразрушающий. Дефектоскопы рентгентелевизионные с рентгеновскими электронно-оптическими преобразователями и электрорадиографические. Общие технические требования	2018-01-01

Підготовлено А.Л. Шекероу
за сприяння ДП «УкрНДНЦ»

ПРИСТРІЙ «ВВК/ТВА-1» ДЛЯ ШВИДКОГО І ТОЧНОГО ВІЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПРОТЯЖНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Утворення тріщини, корозійна поразка та старіння металу є основними проблемами довго експлуатованих металоконструкцій. Наявність цих грубих поверхневих дефектів [1] може вказати на характер і місце можливого руйнування конструкції, з огляду на те, що різні дефекти мають певні домінуючі причини їх утворення.

Візуально-вимірювальний контроль (ВВК) є основним методом з усіх видів неруйнівного контролю (НК). Після цього формуються усі вимоги до подальших робіт, вирішуються організаційні питання виконання інших методів НК. ВВК є оперативним методом НК. За допомогою простого, на перший погляд, зовнішнього огляду контролюю-

ють усі зварні з'єднання, а також інші промислові об'єкти, які знаходяться в роботі. За результатами візуально-вимірювального контролю оцінюється якість і стабільність технологічного процесу, виготовлення або ремонту металоконструкцій та інших об'єктів. Перевагою візуального контролю є простота використання даного методу, а проблематика – фіксування результатів проведення робіт. Трапляються випадки, коли описуються дефектні зони без додавання фото або відео матеріалу у вигляді додатка замовнику [2, 3]. Подалі це може бути причиною непорозуміння між замовником та виконавцем або в випадку низької кваліфікації дефектоскопіста чи фізичної втоми людини, яка в результаті

наддасть недостовірні результати, це може привести до трагічних наслідків. Тому проблематика даного методу діагностики – висока залежність від людського фактору.

Наведений на рис. 1 прилад [4, 5] візуального контролю має веб-камеру і смартфон (планшет) в якості монітора для спостереження, відображення, запису та для передачі інформації через Інтернет. На сьогодні процедури візуальної діагностики пов'язані з монотонними однотипними діями, що призводить до пропусків дефектів. Достовірність візуального контролю в значній мірі залежить від людського фактору – уважності, стомленості, а також залежності, зацікавленості, тобто немає об'єктивності. Застосування даного пристрою [6] допоможе класифікувати шви за стандартами ISO 5817:2014 «Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів».

На рис. 2 в якості монітора та реєстратора показаний смартфон, який утримується на приладі за допомогою магнітної пластини, вмонтованої в його чохол. На рис. 2 позначено: 1а, 1б – світло-лазерне підсвічування ширини зварного шва околошовної зони; 2а, 2б, 2в – регулювальні гвинти для регулювання ширини та висоти світло-лазерного підсвічування;



Рис. 1. Пристрій для візуального контролю ВВК/ТВА-1

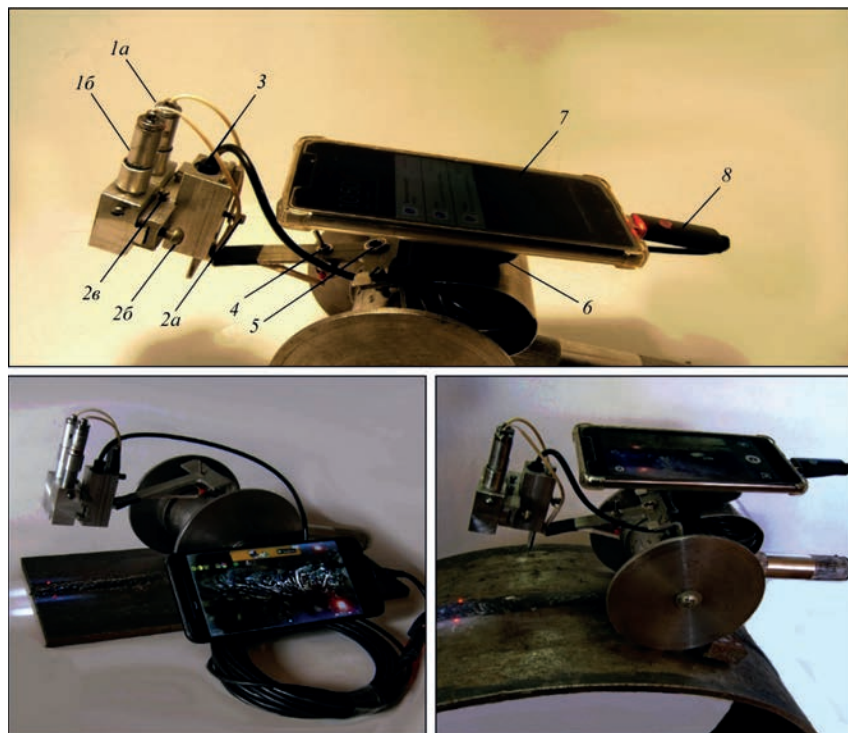


Рис. 2. Зовнішній вигляд ВВК/ТВА-1

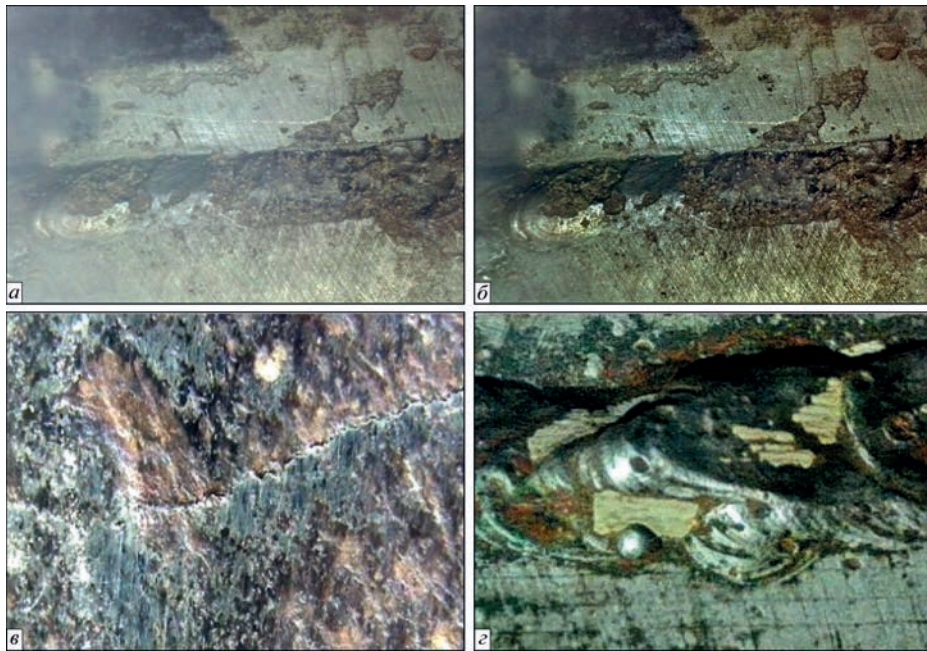


Рис. 3. Результати дослідження ВВК/ТВА-1: а – оригінал зображення зварного з'єднання; б – після обробки зображення; в – оригінал зображення дефекту типу тріщина; г – зварне з'єднання після обробки зображення. Роздільна здатність 1600×1200 пікселів

3 – відеокамера з підсвічуванням, розташування якої регулюється по висоті; 4 – тумблер включення світло-лазерного підсвічування; 5 – роз'єм для зарядки акумулятора; 6 – магнітний тримач для смартфона (планшета); 7 – смартфон; 8 – роз'єм USB/microUSB з підсвічуванням, що вмикається; 9 – ручка-контейнер, всередині якої знаходяться акумулятори. За допомогою запропонованого пристрою спрощується і прискорюється візуальний контроль. Цей пристрій легко переміщується вздовж зварного з'єднання. Конструкція платформи приладу може виготовлятися з урахуванням геометричних особливостей об'єкта. Прилад дозволяє записувати з коментарями всю інформацію про поверхні зварного шва з подальшим архівуванням і передачею цієї інформації замовнику.

Запис фото і відео процесу відбувається за допомогою стандартної програми виробника смартфона (планшета). При виконанні збору даних камера перебуває на відстані від поверхні зварного шва близько 5...8 см, при цьому зображення шва має дворазове збільшення. Відеозапис відбувається при швидкості не більше 3 м/хв. Роботу пристрою в фото режимі необхідно проводити при повній зупинці над передбачуваним дефектом. Результати проведення дослідження показані на рис. 3.

Застосування систем рухомих оптико-електронних перетворювачів, за допомогою яких легко встановлюється оцінка відповідності за ДСТУ ISO 5817, дає можливість:

– зменшити вплив людського фактора, присутнього при ВВК, за допомогою фото та відео запису в ручному варіанті;

– підвищити надійність і точність контрольно-діагностичного процесу на основі аналізу автоматизованого ВВК;

– забезпечити захист інформації, архівування та аналіз за допомогою цифрових комп'ютерних програм;

– здійснити бездротову передачу звітності по Wi-Fi, Bluetooth, Інтернет каналам і забезпечити розмітку на об'єкті контролю місць, де необхідно використовувати радіографічний та ультразвуковий НК.

Використані джерела:

1. ДСТУ EN ISO 17637:2017 *Неразрушающий контроль сварных швов. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением* (EN ISO 17637:2016, IDT; ISO 17637:2016, IDT).
2. ДСТУ EN ISO 6520-1:2015 *Сварка и родственные процессы. Классификация геометрических дефектов в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением* (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT).
3. ДСТУ ISO 5817:2016 *Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів*.
4. Троицкий В.А. (2018) Визуально-измерительный контроль протяженных металлоконструкций на основе подвижных магнитных систем. *Методы та прилади контролю якості*, 1(40), 5–14.
5. Троицкий В.А. (2013) *Подвижное намагничивающее устройство для дефектоскопии протяженных конструкций*. Украина, Пат. 82447 от 12.08.2013.
6. Троицкий В.А., Литвиненко В.А. (2019) Устройства для быстрого и точного визуального контроля протяженных металлоконструкций. *Сварщик*, 4, 38–40.

Троїцький В.О., Литвиненко В.А.,
ІЕЗ ім. С.О. Патона НАНУ, Київ, Україна

ДАТИ, ПОДІЇ, ФАКТИ З ІСТОРІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ*

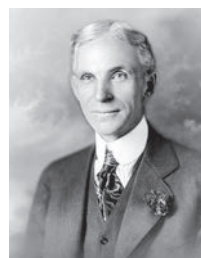
28 березня 1996 р. Олександр В'ячеславович Павлій зареєстрував Науково-виробничу фірму «Діагностичні прилади». Сьогодні це підприємство є одним з основних поставальників в Україну сучасного обладнання та матеріалів для багатьох видів технічного контролю. В складі фірми працює також випробувальна лабораторія з неруйнівного контролю та навчальний центр персоналу, що працює в галузі неруйнівного контролю

**Діагностичні
прилади**
НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА

4 квітня 1973 року закінчилося будівництво Всесвітнього торгового центру в Нью-Йорку, на зведення якого використано 140000 кг наплавленого металу. Комплекс з семи будівель спроектований архітектором Мінору Ямасакі. Архітектурною домікантою комплексу були дві вежі, кожна по 110 поверхів – Північна (висотою 417 м) і Південна (висотою 415 м). Проект будівель являє собою структурну систему «труба-каркас», яка використовувалася в баштах-близнюках. Принцип «труба-каркас» був новим підходом, який дозволив збільшити простір корисних площ на відміну від традиційного дизайну. При будівництві застосовано великий обсяг технічного контролю та механічних випробувань зварних з'єднань. Вежі торгового центру були зруйновані в 2011 р. в результаті теракту



7 квітня 1947 р. помер Генрі Форд (народився в 1863 р.) – американський промисловець, власник заводів з виробництва автомобілів по всьому світу, автор 161 патенту США. Генрі Форд організував масове виробництво автомобілів на конвеєрі, орієнтувався на застосування контактного, дугового та газового зварювання замість ковальського зварювання та клепа. Конструкції шасі, кузовів, вихлопних труб, баків і низки інших вузлів і деталей відразу проектували з урахуванням технологічних можливостей зварювання. Шасі у вигляді рамної конструкції спочатку зварювали ацетилено-кисневим полум'ям, потім дуговим зварюванням електродом, шовним і точковим зварюванням. Значну увагу Форд приділяв випробуванню зварних з'єднань



14 квітня 1929 р. у Києві при Всеукраїнській академії наук академік Євген Оскарович Патон заснував зварювальну лабораторію. Маючи значний досвід, він розробив комплексну програму досліджень в напрямку створення матеріалів і устаткування, перспективних засобів і технологій зварювання відповідальних інженерних споруд. Перші ж дослідження лабораторії викликали інтерес як в СРСР, так і за кордоном. У 1930 р. Е.О. Патон організував Електрозварювальний комітет – громадську організацію, основним завданням якої була координація робіт підприємств та установ, що займаються зварювальним виробництвом



22 квітня 1886 р. завершилося будівництво Статуї Свободи – однієї з найзнаменитіших скульптур в світі. Це подарунок французьких громадян до сторіччя американської революції. Металевий каркас статуї кріпився до центрального стрижня, звареного з чотирьох металевих колон за допомогою автогенного зварювання. Навколо цих колон було встановлено гвинтові металеві сходи, що складаються із 168 сходинок кожна. Металевий каркас статуї покритий трьомастами мідними листами, на закріплення яких пішло близько 300 тисяч мідних заклепок. Загальна вага міді, використаної для облицювання статуї, – 31 тис. т, а загальна вага її сталевих конструкцій – 125 тис. т. З часу установки споруди виконано кілька обстежень технічного стану та ремонтів несучих металоконструкцій та оболонки



26 квітня 1986 р. сталася катастрофа на Чорнобильській атомній електростанції – найбільша аварія в атомній енергетиці, що забрала життя сотень людей та спровокувала значні зміни в економічному та політичному житті суспільства. Одним із недоліків в конструкції станції були неякісно виконані зварювальні роботи. Ця аварія є прикладом того, наскільки важливим є дотримання всіх технічних норм і вимог при будівництві та експлуатації таких високотехнологічних об'єктів



3 травня 1973 р. за день до закінчення будівництва 108-поверхової будівлі Сірс-Тауер, хмарочоса, що знаходиться в м. Чикаго, США, вона стає найвищою будівлею в світі на той час (442,1 м) і візитною карткою Чикаго. Зведення такої будівлі – це серйозна робота для будівельних та інженерних компаній. При будівництві було використано близько 76000 тонн сталі. Компанія «Lincoln Electric» брала участь в проєкті в якості партнера, розробляючи технології зварювання (біля 300 км зварних швів), технічного контролю та численних видів випробувань



* Матеріал підготував Посипайко Ю.М.

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



5 травня 1961 р. відбувся перший пілотований суборбітальний політ в США. Астронавт Алан Шепард в ході п'ятнадцятихвилинного польоту за програмою «Меркурій» пілотував одномісний космічний корабель «Freedom 7», виконаний у вигляді капсули. Матеріал кабіни – титаново-нікелевий сплав. Об'єм кабіни – 1,7 м³. Астронавт розташовувався в ложементі та знаходився в скафандрі під час польоту. При виготовленні корпусу корабля застосовувалася контактне зварювання та різні методи неруйнівного контролю тонколистових немагнітних сплавів



7 травня 1950 р. під керівництвом Євгена Оскаровича Патона закінчено проектування конструкції та розробку технології будівництва найбільшого в Європі суцільнозварного мосту через р. Дніпро в Києві (нині міст ім. Є. О. Патона). Міст довжиною 1543 м і шириною 27 м балочної конструкції з суцільними головними балками двотаврового перерізу довжиною 58 м і висотою 3,6 м введено в експлуатацію 1 листопада 1953 р. В 2020 р. фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона виконали технічне обстеження несучих зварних металоконструкцій мосту. Результати обстеження передані інституту «Укрпроектстальконструкція», який є головним в розробці проекту ремонту мосту



9 травня 1981 р. у День Перемоги був відкритий монумент-скульптура «Батьківщина-мати», найбільша статуя в Україні (17-а в світі). Фігура жінки зі щитом і мечем в руках облицьована листами нержавіючої сталі. Висота статуї від п'єдесталу до кінчика меча – 62 м, абсолютна висота – 102 м, маса – близько 500 т. Скульптуру було виготовлено на Київському заводі ім. Паризької Комуни при технічному супроводі фахівцями ІЕЗ ім. Є.О. Патона. При виготовленні виконано понад 30 км зварних швів. Шви листових конструкцій, що мали бути під ґрунтовим покриттям, контролювались на герметичність накладними вакуумними камерами. В 2019 р. виконано діагностування внутрішніх несучих металоконструкцій, яке підтвердило їх хороший стан



13 травня 1940 р. здійснив перший політ вертоліт Vought Sikorsky VS-300 конструкції Ігоря Івановича Сікорського (1889-1972 рр.), видатного авіаконструктора, вченого та винахідника. У 1941 р. на замовлення армії США І. Сікорський спроектував двомісний вертоліт для зв'язку та спостереження, який був першим в світі вертольотом, запущеним в серійне виробництво, і єдиним вертольотом Другої світової війни. Всі основні несучі елементи конструкції корпусу були зварними та проходили повний цикл механічних і неруйнівних випробувань. Слід зазначити, що саме в Києві в 1908-1912 рр. І. Сікорський побудував свої перші шість літальних апаратів



15 травня 2006 р. відкрито скульптуру «Cloud Gate», яка розташована в діловому кварталі Чикаго, США. Автор – британський художник індійського походження Аніш Капур (народився в 1954 р). Скульптура складається з 168 пластин нержавіючої сталі, зварених разом, відполірованих до такої міри, що її зовнішня поверхня не має видимих швів. Розміри скульптури: 10 (висота), 20 (довжина) і 13 (ширина) метрів, вага близько 100 т. Зварювальники використовували гібридну лазерно-дугове зварювання. «Хмарні ворота» – один з найзнаменитіших і відомих пам'яток сучасності. Вважається, що образ скульптури був навіяний виглядом краплі ртуті. В процесі полірування зовнішньої поверхні застосовувались сучасні методи оптичного контролю



18 травня 1948 р. народився Учанін Валентин Миколайович, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка, Заслужений винахідник України (2020), лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (2017), дослідник та розробник засобів вихрострумового методу неруйнівного контролю виробів та матеріалів



19 травня 2018 р. Указом Президента України група вчених та інженерів (Лабур Т.М., Осташ О.П., Учанін В.М., Федірко В.М., Ющенко К.А.) одержала Державну премію України в галузі науки і техніки за 2017 р. за роботу «Матеріали і технології конструкцій сучасної авіаційної техніки». Однією із складових цієї роботи були дослідження вихрострумового методу для контролю матеріалів та виробів авіаційної техніки



21 травня 2007 р. Указом Президента України група вчених та інженерів (Девін Л.М., Куриляк Д.Б., Недосека А.Я., Півторак В.А., Троїцький В.О.) одержала Державну премію України в галузі науки і техніки за 2006 р. за роботу «Розробка і впровадження засобів неруйнівного контролю і технології технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового обладнання тривалої експлуатації»

21 – 24 травня 1996 р. Асоціація ОКО (керівники Луценко Г.Г. та Луценко Т.М.), до складу якої входили НВФ «Ультракон-Сервіс» та НВФ «Промприлад», провели першу виставку розробок в галузі неруйнівного контролю. З тих пір такі виставки проводились щорічно, за виключенням карантинних 2020-2021 рр.



22 травня 2012 р. в Токіо відбулось відкриття телевізійної вежі «Tokyo Skytree» (Токійське небесне дерево) – найвищої телевежі в світі висотою 634 м і другої по висоті споруди в світі після «Бурдж-Халіфа». Вся конструкція вежі складається з елементів «решітки», кожна з яких є комбінацією трикутників в складі інших складових. Всі конструкції з'єднувалися зварюванням безпосередньо до головної опори без використання будь-яких інших кріпильних систем. Конструкція вежі має дуже простий зовнішній вигляд і має високу сейсмостійкість. В складних умовах на висоті працювали не тільки зварники, а й дефектоскопісти



26 травня 1970 р. лайнер «Ту-144» подолав символічний рубіж у 2 Маха, здійснивши політ на висоті 16300 м зі швидкістю 2150 км/год. «Ту-144» став першим типом надзвукових лайнерів, який використовувався для комерційних перевезень і перевищив швидкість звуку. Конструкція лайнера була на 20% зроблена з титану. По всій задній кромці крила розташовувалися елерони, виконані з титанових сплавів. Застосування в конструкції титанових сплавів зажадало створення нових верстатів, зварювального устаткування, випробувального та контрольного обладнання.



1 червня 1925 р. заснована фірма «Chrysler» – американська автомобілебудівна компанія. Фірма з самого початку заснування використовувала зварювання при створенні машин. З 1930 р. «Chrysler» починає використовувати для автомобілів нові зварні конструкції, які збиралися з сталевих балок, приварених до панелей кузова. Висока надійність машин прославила «Chrysler» і його моделі 1930-х рр. стали одними з найбільш продаваних. Особливу увагу на фірмі приділяли контролю якості точкового контактного зварювання



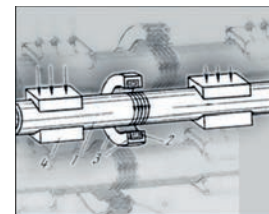
2 червня 1993 р. Геннадій Геннадійович Луценко та інші зареєстрували ТОВ «Ультракон-Сервіс». Сьогодні це підприємство є найбільшим розробником та виробником засобів неруйнівного контролю в Україні. Його продукцію знають в 60-и країнах світу. Особлива гордість підприємства – автоматизовані установки для контролю труб великого діаметру, залізничних коліс, осей та рейок



4 червня 1958 р. введено в експлуатацію перший радянський (третій в світі) атомний підводний човен. Ще на початку 1930-х рр. в СРСР і США приступили до створення принципово нових підводних човнів з силовими установками на атомній енергії. У переліку необхідних якостей нового підводного човна вказувалася глибина занурення 300 м. Занурення на таку глибину перевершувало в кілька разів всі досягнуті раніше рекорди. Після багаторічних експериментів було отримано необхідні властивості та необхідну якість зварних з'єднань

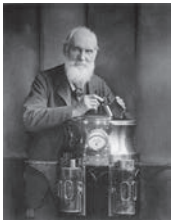


8 червня 1946 р. ідея застосування струмів високої частоти для зварювання металів вперше була запропонована радянськими фахівцями на чолі з А. В. Улітовським. У 1950-і рр. в Радянському Союзі і за кордоном почалися інтенсивні дослідження зі створення технології та обладнання для високочастотного зварювання труб, а дещо пізніше і для оболонок кабелів і профілів. Новий вид швидкісного зварювання вимагав нового підходу до створення способів електромагнітного неруйнівного контролю



9 червня 1959 р. на воду спущено перший атомний стратегічний підводний човен ВМС США типу «Джордж Вашингтон» з балістичними ракетами на борту. У корпус підводного човна за рубкою був «вставлений» 40-метровий ракетний відсік, в якому були розміщені 16 пускових ракетних установок. Після монтажу ракетної секції всі частини човна зварювалися воедино. Загальна компоновка човнів типу «Джордж Вашингтон» з вертикальними шахтами, розміщеними позаду рубки, виявилася дуже вдалою і стала класичною схемою для підводних стратегічних ракетноносців. При створенні таких унікальних технічних об'єктів було поєднано методи технічного діагностування та випробувань, притаманних суднобудуванню, атомній енергетиці та ракетній техніці





14 червня 1952 р. почалося будівництво першого в світі атомного підводного човна ВМС США типу «Наутілус» (SSN-571), який був прийнятий на озброєння 30 вересня 1954 р. 3 серпня 1958 р. «Наутілус» досяг Північного полюса, ставши першим кораблем в історії людства, який пройшов в цю точку Землі своїм ходом. У США для виготовлення першого атомного підводного човна «Наутілус» фірма «Дженерал Дайнемікс» використовувала різні технології з'єднання, головним чином дугове зварювання під флюсом, киснево-ацетиленове зварювання та велику кількість випробувальних та діагностичних операцій

16 червня 1965 р. з космодрому Байконур успішно здійснений перший запуск ракети-носія «Протон-К». Ракета-носіє «Протон-К» відноситься до важкого класу і стала основним засобом виведення вантажів на орбіту. В конструкції двигуна широко застосовувалося зварювання. Зокрема, в основних магістралях ракети налічується 11 роз'ємів. Бак окислювача ракети зварний, виконаний з алюмінієвого сплаву. Він складається з гладкої циліндричної обичайки секційного типу, посиленої шпангоутами, і двох сферичних днищ. Обичайки бака окислювача гладкі, зварені з трьох секцій. Робота над ракетою вимагала, крім іншого, створення нових методів контролю герметичності великогабаритних тонкостінних ємностей

20 червня 1939 р. здійснено перший в історії політ німецького реактивного літака «Heinkel-176». Це перший в світі літак, що приводився в рух рідинним реактивним двигуном. У конструкції апарату широко застосовувалося зварювання. В ході робіт з'ясувалося, що під час зварювання конструкцій крила виникають серйозні технологічні проблеми. Тоді було виготовлено інше крило, виконане за схемою з двома лонжеронами, а зварювання на відповідальному місці вирішили прибрати. Консолі крила площею всього по 5,4 м² з розмахом 5 м мали дуже високе навантаження, що становила при злітній вазі 1620 кг майже 300 кг/м². З цього літака розпочинається історія розвитку технічного контролю в реактивній авіації

20 червня 1977 р. в США запущено Трансальєскінський нафтопровід, призначений для перекачування нафти з родовища Прадхо-Бей на півночі Аляски в порт Валдіз на її півдні. В його будівництві брали участь десятки тисяч зварників та дефектоскопістів, що робить його одним з наймасштабніших зварювальних і будівельних проектів. Стиги труб з'єднувались в траншеї ручним зварюванням. Якість зварних швів перевірялась за допомогою рентгенівських апаратів. Нафтопровід було побудовано в умовах вічної мерзлоти, полярної ночі, в суровому і легко вразливому краю з високою сейсмічністю, але він став найбільш захищеним трубопроводом в світі

26 червня 1824 р. в Ірландії народився Вільям Томсон, лорд Кельвін (помер 17 грудня 1907 р.) – британський фізик і механік. Він відомий своїми роботами в області термодинаміки, механіки, електродинаміки, газової динаміки, термоелектрики та ін. Запропонував абсолютну шкалу температур (1848), дав одне з формулювань другого початку термодинаміки (1851) і ввів поняття розсіювання енергії. Пізніше ці закони лягли в основу багатьох розробок вимірювального обладнання. Вільям Томсон був піонером технічної фізики

27 червня 1940 р. був закладений лінійний корабель американських збройних сил «Айова». Всього планувалося побудувати шість кораблів такого типу. Слід зазначити, що будівництво лінкорів велося небувалими темпами. Використовувалася електричне зварювання, що для того часу було нетипово. Застосовуючи при будівництві зварювальні автомати, будівельникам вдалося прискорити і спростити процес побудови кораблів. Перша пара кораблів цієї серії («Айова» та «Нью-Джерсі») стала до ладу в 1943 р. В 1940-х рр. будівництво лінкорів поклало початок розвитку методів технічного контролю в суднобудуванні, зокрема рентгенографічного та ультразвукового, та методів механічних випробувань металу і зварних з'єднань

30 червня 1961 р. одна з найбільших американських хімічних компаній «DuPont» зареєструвала перший в історії патент на зварювання вибухом. В 1961 р. одночасно в СРСР і США з'явилися повідомлення про зварювання металів вибухом. Цей технологічний процес дозволив отримувати біметалеві заготовки і вироби практично необмежених розмірів з різних металів і сплавів, в тому числі і тих, зварювання яких іншими способами склало або неможливе. Новий спосіб зварювання вимагав нових способів технічного контролю