

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

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 металознавства ім. Г.В. Курдюмова

НАН України, м. Київ

А.Г. Протасов, С.К. Фомічов

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

В.О. Стороженко

Харківський національний університет радіоелектроніки

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка

НАН України, м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і

природокористування України, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2021

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

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

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

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

Пам'яті Бориса Євгеновича Патона	3
Останнє інтерв'ю Бориса Євгеновича Патона.....	5

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ВАСИЛЕНКО І.В., ГРАБОВА Н.В., ЛИТВИНЕНКО А.С., ПАВЛИЩУК В.В., КОЛОТІЛОВ С.В., КАЗАКЕВИЧ М.Л. Композити на основі магнітних наночастинок для неруй- нівної магнітної та магнітно-люмінесцентної дефектоскопії	11
МУРАВСЬКИЙ Л.І., ВОРОНЯК Т.І., ІВАНИЦЬКИЙ Я.Л., ГВОЗДЮК М.М., МАКСИМЕНКО О.П., КУЦЬ О.Г., СТАСИШИН І.В., ГАСЬКЕВИЧ Г.І., СУРЯДОВА О.Д. Нові методики та технічні засоби контролю і підвищення ресурсу роботи метало-композитних з'єднань авіаційної техніки.....	16
ХВОРОСТЯНИЙ В.В., РОДІЧЕВ Ю.М., СОРОКА О.Б. Опір руйнуванню та пошкодженості лінійно-пружної кераміки в умовах локального крайового навантаження: статис- тичний підхід.....	23
ГОПКАЛО О.П., ЮХИМЕЦЬ П.С., БЕЗЛЮДЬКО Г.Я., СОЛО- МАХА Р.М., НЕХОТЯЩИЙ В.О. Із досвіду використання неруйнівних методів контролю для оцінки технічного стану аварійної ділянки трубопроводу.....	30

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

НЕДОСЕКА А.Я., НЕДОСЕКА С.А., ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А. Системи акустико-емісійного моніторингу при технічному діагностуванні промислових об'єктів	37
ТРОЇЦЬКИЙ В.О., КАРМАНОВ М.М., МИХАЙЛОВ С.Р., ШАЛАЄВ В.О., ПАСТОВЕНСЬКИЙ Р.О. Скануючі рент- генівські системи на основі мініатюрних твердотільних перетворювачів	43
БАГЛАЙ А.В., КІПІН М.М., ДУБІНА М.О. Впровадження автоматичної системи контролю та діагностики технічного стану вентиляторів газоочищення мартенівських печей	48
ШУЛЬЖЕНКО М.Г., ПОЛИЩУК О.Ф., ЄФРЕМОВ Ю.Г., АВРАМОВ К.В. Спеціалізовані пристрої неруйнівного контролю для оцінки технічного стану обертових та необер- тових частин механізмів	53

КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

БАГЛАЙ А.В., ВЕРЕНЕВ В.В. Динаміка та діагностика зазорів в клітках з багатонитковою прокаткою.....	58
---	----

ХРОНІКА

Л.М. Лобанову – 80!	61
В.О. Цечалю – 90!	62
Міжнародна конференція «Неруйнівний контроль та моні- торинг технічного стану».....	63

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

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

In memory of Borys Evgenovych Paton	3
The last interview of Borys Evgenovych Paton	5

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

VASYLENKO I.V., GRABOVA N.V., LYTVYNNENKO A.S., PAVLISHCHUK V.V., KOLOTILOV S.V., KAZAKEVYCH M.L. Composites based on magnetic nanoparticles for nondestructive magnetic and magnetic-luminescent flaw detection	11
MURAVSKIY L.I., VORONYAK T.I., IVANYTSKI Ya.L., GVOZDYUK M.M., MAKSYMENKO O.P., KUTS O.G., STASYSHYN I.V., GASKEVYCH G.I., SURIADOVA O.D. New procedures and technical means of control and extension of service life of metal-composite joints of aviation equipment	16
KHVOROSTIANYI V.V., RODICHEV Y.M., SOROKA O.B. Fracture resistance and damageability of linear-elastic ceramics under the conditions of edge local loading: a statisti- cal analysis	23
GOPKALO O.P., YUKHYMETS P.S., BEZLYUDKO G.Ya., SOLOMACHA R.M., NEKHOTIASHCHIIY V.O. From the experience of using non-destructive control methods to assess the technical condition of the pipeline emergency section	30

INDUSTRIAL

NEDOSEKA A.Ya., NEDOSEKA S.A., YAREMENKO M.A., OVSIENKO M.A. Systems of acoustic emission monitoring at technical diagnostics of industrial facilities	37
TROITSKIY V.O., KARMANOV M.M., MIKHAILOV S.R., SHALAEV V.O., PASTOVENSKIY R.O. Scanning X-ray systems based on miniature solid-state transducers	43
BAGLAY A.V., KIPIN M.M., DUBINA M.A. Introduction of automatic system for control and diagnostics of technical condition of gas cleaning fans for open-hearth furnaces	48
SHULZHENKO M.G., POLISHCHUK O.F., IEFREMOV Yu.G., AVRAMOV K.V. Specialized non-destructive testing devices for evaluation of the technical condition of rotary and non- rotary parts of mechanisms	53

BRIEF INFORMATION

BAGLAY A.V., VERENEV V.V. Dynamics and diagnostics of clearances in multi-stand rolling	58
---	----

NEWS

L.M. Lobanov is 80!	61
V.O. Tsechal is 90!	62
International Conference «Non-destructive control and monitoring of technical condition»	63

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

Пам'яті Бориса Євгеновича Патона

Національна академія наук України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона з глибоким сумом повідомляють, що 19 серпня 2020 р. світову і вітчизняну науку спіткала велика втрата — на 102-му році життя зупинилося серце видатного українського вченого в галузі металургії, технології металів, електрозварювання та матеріалознавства, організатора науки, державного та громадського діяча, президента Національної академії наук України, директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, двічі Героя Соціалістичної Праці, першого Героя України академіка Бориса Євгеновича Патона.



Борис Євгенович Патон народився 27 листопада 1918 р. в Києві в родині професора Київського політехнічного інституту Євгена Оскаровича Патона.

Його інженерна і наукова діяльність розпочалася в 1942 р. в Інституті електрозварювання, який тоді в евакуації розміщувався на території «Уралвагонзаводу» в Нижньому Тагілі. Відтоді протягом 11 років Борис Євгенович працював разом із батьком, який очолював інститут. Це були роки його становлення як науковця та дослідника, а згодом і як керівника великого науково-виробничого колективу. Він продовжив і блискуче розвинув справу, розпочату Євгеном Оскаровичем, разом з яким

створив всесвітньо відому патонівську наукову школу, та 67 років очолював широковідомий у всьому світі науково-технічний комплекс — Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Світове визнання Б.Є. Патон здобув своєю різнобічною і надзвичайно плідною науковою та інженерною діяльністю, прагненням спрямувати фундаментальні наукові дослідження на розв'язання актуальних проблем науково-технічного прогресу. Своїми працями він заклавав підґрунтя дугового зварювання, зокрема, теорії автоматів для дугового зварювання, яку потім розвивали багато фахівців у галузі автоматичного управління процесами зварювання.



Під керівництвом Б.Є. Патона було здійснено дослідження в галузі зварювальних джерел живлення, створено процеси дугового, електрошлакового, контактного, електронно-променевого та багатьох інших видів зварювання і споріднених технологій; виконано великий комплекс фундаментальних і прикладних досліджень у галузі статичної та циклічної міцності зварних з'єднань, їхнього опору крихким і втомним руйнуванням, працездатності в умовах низьких температур. Уперше в Україні з'явилися системи діагностики зварних конструкцій, до яких висувають підвищені вимоги безпеки експлуатації. Б.Є. Патон очолив дослідження з використання електрошлакового процесу для поліпшення якості металів і сплавів, внаслідок чого з'явився принципово новий напрям у металургії — електрошлаковий переплав і лиття. Технології, розроблені під його керівництвом, успішно працюють на землі, під водою і в космосі. Борис Євгенович запропонував також використовувати методи зварювання для з'єднання живих тканин.

Багато років Б.Є. Патон в якості головного редактора керував виданням провідних журналів в галузі зварювання та споріднених технологій — «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія» та «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», що дозволило донести до світової науково-технічної громадськості інформацію про результати досліджень і нові розробки Інституту електрозварювання, сприяти реалізації понад 150 ліцензій у зарубіжних країнах.

У 1962 р. Б.Є. Патона було обрано президентом Академії наук УРСР (нині — Національна академія наук України). Глибоке розуміння ролі науки в суспільстві, її цілей і завдань, високий міжнародний авторитет ученого, відданість науці, невичерпна енергія та високі моральні якості, активна громадсько-політична діяльність, досвід керівництва великими науковими колективами стали визначальними аргументами в обранні Бориса Євгеновича на цю посаду. Відтоді він упродовж 58 років очолював провідну наукову організацію України.

На відповідальному посту президента НАН України ще більше розкрився його талант організатора науки. За участі Бориса Євгеновича Патона розроблено нову структуру Академії наук, її новий статут, спрямований на найраціональніше використання наукових сил

і засобів, їх концентрацію на розв'язанні найважливіших фундаментальних та прикладних наукових проблем, що мають важливе значення для економіки країни, створено десятки нових інститутів та установ, що розвинули і поглибили дослідження в пріоритетних наукових напрямках.

Виняткові здібності Бориса Євгеновича як лідера, ученого й організатора проявилися у драматичні дні аварії на Чорнобильській АЕС. Колективи багатьох інститутів Академії, її Президія вже з перших днів працювали над ліквідацією наслідків цієї катастрофи.

У роки незалежності України Б.Є. Патон багато зробив для збереження і примноження потенціалу вітчизняної науки, розгортання нових наукових напрямів, необхідних для розбудови незалежної європейської держави, її економіки, науково-технічної, освітньої, соціально-культурної сфер, зміцнення обороноздатності держави.

Б.Є. Патону належить значний внесок у розвиток міжнародного наукового співробітництва України, входження вітчизняної науки до європейського і світового наукового простору. За його ініціативою в 1993 р. створено Міжнародну асоціацію академій наук (МАН), що об'єднала національні академії 15 країн Європи і Азії. Протягом майже чверті сторіччя Борис Євгенович був незмінним президентом цієї асоціації.

Б.Є. Патона неодноразово обирали до складу вищих органів державної влади Радянського Союзу й України. Він був керівником та членом багатьох важливих комітетів і комісій. Обіймаючи високі посади, Борис Євгенович плідно працював з глибоким почуттям особистої відповідальності перед державою, народом та власною совістю.

Борис Євгенович Патон продовжував працювати до останніх днів свого життя. Його життєвий шлях — взірець відданості улюблений справі, науці, Україні. Усі, кому пощастило спілкуватися з Борисом Євгеновичем, знали його як надзвичайно творчу особистість, мудру, глибоко порядну і доброзичливу людину з фантастичною енергією, жагою до праці, гострим аналітичним розумом, теплим гумором і високою людяністю.

Всесвітньо визнаний учений, взірець дослідника, видатний організатор науки, справжній син українського народу — світла пам'ять про Бориса Євгеновича Патона назавжди залишиться в серцях усіх, хто його знав і працював з ним.

Редколегія журналу визнала за важливе ознайомити читачів з останнім інтерв'ю Б.Є. Патона, яке було опубліковано в «Урядовому кур'єрі» незадовго до його відходу з життя. В ньому осмислення сьогодення і роздуми про майбутнє видатного ученого і мудрої людини, все життя якого — самовіддане служіння науці

Президент Національної академії наук України академік Борис Патон: «Пандемія COVID-19 показала, як неприпустимо багато ресурсів ми марнуємо на другорядні потреби і не звертаємо уваги на головне — глобальні проблеми»

У квітні мали відбутися вибори президента і президії Національної академії наук України, але завадила пандемія коронавірусної хвороби. Проте прізвища кандидатів на головну посаду в академії вже відомі, і серед них немає нинішнього очільника Бориса Патона. Про рекордне керівництво і майбутнє НАН України ця ексклюзивна розмова з ним.

— Борисе Євгеновичу, чим запам'ятаються 58 років президентства в НАН України і чим плануєте займатися по завершенні своєї каденції?

— Після складення повноважень президента академії в мене ще залишатимуться обов'язки директора Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України. Тому роботи поменшає незначно — не з моїм щастям (усміхається). З іншого боку, нічого незвичного чи обтяжливого в цьому для себе не бачу — в нашій родині з діда-прадіда панував культ праці. А коли втягуєшся, то не одразу помічаєш, що професія поглинає весь твій час. Навіть не можу сказати про академію як про другу родину, здається, вона була моєю єдиною родиною. Від цього, звичайно, страждало приватне життя, рідні й близькі бачили мене далеко не так часто, як хотіли і як варто було б. Трохи виправився я, мабуть, тільки тепер — живу з родиною онучки Ольги, виховую правнучку Ганнусю. Вона велика непосида, допитлива дівчинка-щебетушка. З нею не засумуєш. Пандемія — це, без сумніву, велике лихо, але можу погодитися з думкою, що для багатьох

із нас карантин став нагодою побути в сімейному колі довше, ніж зазвичай.

А загалом ці 58 років, як і вся історія академії, були часом і великих досягнень, і великих випробувань. Різнилися тільки виклики, які поставали перед державою. Із 1950-х років треба було встигати за світовою науково-технічною революцією. Під нові завдання розбудовували структуру академії, створювали нові установи, засновували регіональні наукові центри тощо. Коли мене вперше обрали президентом тоді ще Академії наук УРСР, я поставив за мету зробити зв'язки між наукою та виробництвом максимально тісними. Бо вчені — не річ у собі й не річ для себе, підсумки їхньої роботи мають втілюватися у практику, давати очевидну й відчутну користь суспільству та державі. Це й був мій головний імператив. Спираючись на нього, запропонував колегам там, де це доцільно, створювати й упроваджувати розробки за схемою «науковий інститут — конструкторське бюро — дослідне виробництво». Не хочу себе хвалити, але треба визнати, що цей механізм не без успіху працював багато років.

В академії від самого її заснування у 1918 р. виконували гігантські обсяги роботи. Наприклад, наші науковці спрогнозували негативні наслідки масштабної осушувальної і зрошувальної меліорації, інтенсивної хімізації сільського господарства й будівництва сумнозвісної Чорнобильської атомної електростанції. Тільки хто ж нас послухав? Проте коли реалізується найгірший прогноз, науковці не можуть сказати: «Ми ж застерігали», просто розвернутись і піти, залишити людей наодинці з їхнім горем. Аварія на ЧАЕС була комплексним викликом, і академія активно долучилася до ліквідації її наслідків, яка триває й досі.

На початку 1990-х Україна стала незалежною, й академія досить швидко перебудувалася під нові реалії. Скажімо, в умовах розриву економічних зв'язків між колишніми радянськими республіками і занепаду галузевої науки, яка, на превеликий жаль, так і не вийшла з коми, саме НАН України взяла на себе супровід базових галузей національної економіки. Було відновлено або за-





Головний корпус КІП (роки навчання 1937–1941)

початковано багато напрямів соціогуманітарних досліджень (і засновано відповідні структурні підрозділи або навіть цілі наукові установи), які за радянських часів перебували в немилості, але були вкрай важливими для становлення молодої Української держави.

2014 р. академія разом з усією країною зазнала болючого удару і великих збитків. На окупованих Росією територіях Криму та Донбасу залишились і наші тамтешні установи — звісно, з усім матеріальнотехнічним забезпеченням, а також об'єкти історико-культурної спадщини. На щастя, вдалось евакуювати до Києва частину співробітників. В Автономній Республіці Крим ми, на жаль, втратили майже всіх і все. Серед іншого лазерну обсерваторію, Карадазький природний заповідник, коштовне наукове обладнання і наше єдине науково-дослідне судно. Тому вимушено згорнули деякі роботи, а саме частину океанологічних і океанографічних та історичних і археологічних досліджень. Ми все робимо, щоб якось компенсувати ці втрати, та, як кажуть, ламати — не будувати. Ламали, щоправда, не ми, але від цього не легше.

Навіть війна — не привід скласти руки і чекати, доки хтось розв'яже наші проблеми. Тому науковці разом з усією країною мобілізувалися. По-перше, академія започаткувала власну цільову науково-технічну програму з проблем підвищення обороноздатності й безпеки держави. По-друге, розпочала або розширила дослідження цивілізаційного вибору України, шляхів консолідації нашого суспільства, особливостей міграційних процесів, які в ньому відбуваються, а також дослідження історії, культури, економіки українських регіонів з особливим акцентом на схід і південь. Це титанічні колективні праці у форматі національних доповідей або серійних видань, з якими може ознайомитися кожен охочий — їхні електронні версії є у відкритому доступі. Щоро-

ку наші вчені надають тисячі експертних висновків, доповідних записок та інших документів на вимогу держави. Звичайно, ми готуємо всі ці документи з розрахунком, що ними справді скористаються. Часто бачимо позитивну віддачу від цієї роботи. Це дає сили працювати далі.

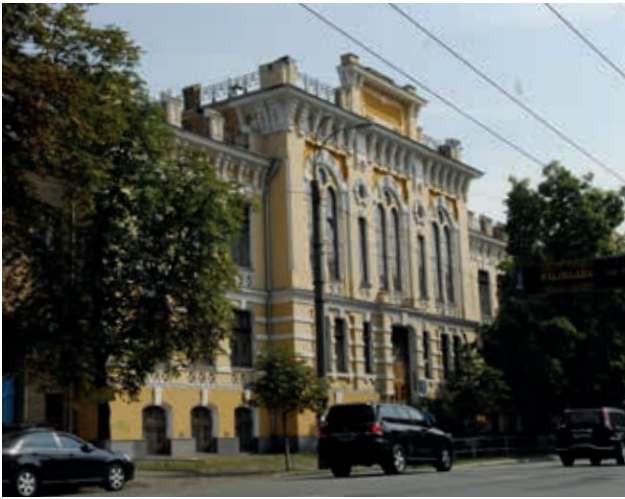
Прикладні дослідження і науково-експертна діяльність — надзвичайно важлива частина нашої роботи, однак головне статутне завдання НАН України полягає у здійсненні широкого спектра фундаментальних наукових пошуків. За деякими напрямками досі утримуємо світовий пріоритет, і справедливо можемо цим пишатися. Проте загалом наука в Україні переживає, м'яко кажучи, не найкращі часи, що не могло не позначитись і на нашій академії. Не залишаємо сподівань, що це тимчасова скрута.

— **У концепції розвитку на 2014—2023 роки академія задекларувала курс на реформи. Що, на вашу думку, має змінитись, а що заслуговує на збереження?**

— Важливо, щоб академія була, а її наукові школи відтворювалися й примножувалися. Це передовсім. Адже в деяких пострадянських країнах аналогічні організації або істотно втратили у суспільній вазі й відійшли на маргінес, або взагалі були ліквідовані. У Росії головну академію наук примусово об'єднали з галузевими, дуже обмежили у праві розпоряджатися власними ресурсами, зокрема фінансовими, і це теж не пішло їй на користь. Україні не підходить жоден із цих шляхів. Досі академії вдавалось обстоювати своє право на існування, але зазіхання на нас не припинялися впродовж усього періоду Незалежності. Переважно з боку людей, які нічого не тямлять в особливостях науки та організації досліджень. І погано розуміють, навіщо країні утримувати власну наукову галузь.

Не менш важливо (і це моя принципова позиція), щоб НАН України безумовно зберігала за собою самоврядний статус у всіх справах, що стосуються її діяльності. Норма про це міститься і має надалі залишатись у статуті академії. У нас завжди працювало і нині працює достатньо розумних людей, які самі, не чекаючи вказівок згори або збоку, дадуть собі раду з визначенням і реалізацією дослідницьких пріоритетів, бо добре знаються на світових трендах і національних українських потребах.

Щодо решти питань можна і потрібно дискутувати, зважувати всі «за» і «проти», обирати оптимальні рішення. І за останні кілька років в академії багато чого змінилось. 2016 р. загальні збори НАН України ухвалили нову редакцію статуту академії, який пройшов тривале обговорення на всіх рівнях нашої організації. Не можна заперечувати, що завдяки йому стала можливою відчутна демократизація внутрішньоакадемічно-



Головний корпус ІЕЗ (роки роботи 1944–1975)

го життя. Передусім за рахунок обмеження часу перебування на керівних посадах в академії двома строками та залучення до повноцінної участі у прийнятті рішень представників, делегованих науковими колективами. Крім того, за сприяння німецьких партнерів, за що хочу ще раз висловити їм глибоку вдячність, на основі найкращих європейських зразків було розроблено прогресивну методику оцінювання ефективності діяльності наукових установ НАН України. Ми її успішно апробували й активно використовуємо. До речі, саме ця методика лягла в основу принципово нового механізму фінансування науки за бюджетною програмою КПКВК 6541230 «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень», яку наша академія ініціювала в 2017 році спільно з Міністерством фінансів України. Принагідно хотів би подякувати за це нинішньому очіль-

никові Мінфіну Сергієві Марченку, який у той час був заступником міністра та опікувався питаннями фінансування наукової галузі.

Я навів далеко не повний перелік всього, що нам вдалося. Життя триває, рухаємося далі. Але, наголошую, реформування академії не має призвести до її руйнування.

Так склалося, що на сьогодні НАН України — чи не єдиний осередок справжньої науки в нашій країні, в ній зосереджено фактично весь наш національний інтелектуальний потенціал. Не уявляю, як дивитимемося в очі дітям і онукам, якщо девальвуємо та розпродамо ще й цю цінність. І не хочу уявляти. Академія гідна кращої долі.

— **А що для вас наука? У чому для вас полягає її цінність?**

— Наука — це єдино адекватний інструмент пізнання навколишнього світу і створення його достовірної картини. Кращого поки що не винайдено. Вона дала змогу представникам одного з мільйонів видів живих істот максимально одомашнити середовище свого існування і розбудувати розумну цивілізацію. Принаймні почасті розумну (сумно усміхається). Чи ж це не доказ приголомшливої ефективності науки?

Її виникнення було цілком логічним, тому що базувалося на природній допитливості. Але інтерес — це ще не все: мисленнєвий процес потребує зусиль і спеціальної системи. На те, мабуть, людина — не тільки біологічна, а й соціальна істота, щоб урешті-решт перетворюватися на щось більше, ніж прямоходячий родич мавп.

Здавалося б, що нам до безмежно далеких галактик, глибоких земних надр, будови атомів? Наука — це завжди відрив від якоїсь приземленої



Президія НАН України (роки роботи 1962–2020)



Новий корпус ІЕЗ (роки роботи 1975–2020)

повсякденності, побутовості, це розсування горизонтів вусібіч. В одній з праць французького астронома Каміля Фламмаріона вперше з'явилася знаменита нині гравюра невідомого автора, яка, по-моєму, геніально передає суть науки: на ній зображено людину, яка зазирає за межі небесної сфери — у відкритий космос. Вона не отримує від цього миттєвої практичної користі, крім хіба суто професійного задоволення, але не може інакше.

Були часи, коли вчених переслідували і знищували, бо вони як першопрохідці за природою збурювали когнітивний комфорт, простіше кажучи, войовниче невігластво інших. І самим своїм існуванням розхитували релігійні та політичні системи, які на цьому невігластві трималися. На жаль, у XXI столітті інтелектуального мороку все ще достатньо, але заради справедливості мушу відзначити і великий прогрес у цьому плані. Тож ми не такі вже безнадійні.

Пандемія COVID-19 показала, як неприпустимо багато ресурсів ми марнуємо на другорядні потреби і не звертаємо уваги на головне — глобальні проблеми. Мені було приємно бачити, як американці успішно запустили новий пілотований космічний апарат CrewDragon і зістикували його з Міжнародною космічною станцією. Але якщо ми не забезпечимо собі виживання на Землі — а без збереження довкілля і його біорізноманіття це неможливо, — то про колонізацію ні ближчого, ні віддаленішого космосу нічого й думати. Мені здається, саме це мав на увазі британський фізик і космолог Стівен Гокінг, який вважав, що людство не встигне реалізувати плани з розселення на інших планетах, зокрема й екзопланетах, тобто, поза Сонячною системою. Можливо, в цьому заховано відповідь на парадокс Фермі або, як його ще називають, велике

мовчання Всесвіту. Зміни клімату, які рік у рік стають дедалі очевиднішими, переконують мене, що, схоже, пан Гокінг був недалекокий від правди. Хоч як сумно це визнавати. І все-таки я за те, щоб не здаватись і шукати вихід навіть із найбезнадійнішої ситуації. Без науки ми цього виходу не знайдемо, і щодо цього не може бути двох думок.

— Українській науці часто закидають інертність і бездіяльність. Що можете відповісти критикам? Чим наука стала у пригоді Українській державі й чим досі їй допомагає?

— На жаль, вдумливих і обізнаних критиків серед таких людей небагато, здебільшого, даруйте, критикани. Недавно читав публікацію однієї нібито й не далекої від науки людини, яка радить ученим нашої академії бути ще активнішими. Читав і думав: куди вже активніше? Якщо фундаментальних і прикладних досліджень, науково-експертної та науково-популяризаційної діяльності недостатньо, то, щиро кажучи, вже не знаю, що ще вчені здатні запропонувати своїй країні і своєму народові. Хіба що працювати за «спасибі», що ми фактично вже майже і робимо, бо жалюгідні фінансові крихти, які отримує абсолютна більшість наших співробітників, язик не повертається назвати зарплатою. І при цьому нас звинувачують, що ми постійно говоримо про гроші й те, як нам їх бракує. Врешті-решт ми вже 30 років живемо в умовах ринкової економіки і відкритих кордонів, і щонайменше дивно очікувати від висококваліфікованих фахівців, що вони задовольняться окладами, на які вже не погоджуються навіть прибиральники і касири супермаркетів.

На загальних зборах, які не відбулись у квітні, академія мала підбити підсумки своєї діяльності за період із 2015 по 2019 рік. І якщо ознайомитися з ними (а всі звітні матеріали є на сайті НАН України) трохи уважніше за авторів порожніх популістських гасел, то можна побачити, що зроблено надзвичайно багато. Напевно, великий наш недолік у тому, що ми не кричимо про свої досягнення на кожному розі. Просто мовчки гаруємо на роботі й заощаджуємо державі мільярди бюджетних коштів або приносимо мільярдні прибутки. Що, однак, слабо позначається на нашому фінансуванні.

Щоб не бути голослівним, наведу кілька прикладів. Ми вже обговорили, що академія здійснює науковий супровід базових галузей української економіки. Одна з головних і стратегічно важлива — енергетика. Так-от, оцінки стану реакторів вітчизняних АЕС фахівців НАН України дали змогу продовжити на 20—30 років терміни експлуатації шести із 15 реакторів. Економічний ефект від продовження терміну роботи тільки одного ядерного блоку сягає 1,5 мільярда гривень. Ми здійснили сертифікацію ядерного палива Westinghouse і зао-

щадили Україні ще 1,3 мільярда. Це сприяло диверсифікації поставок ядерного палива на вітчизняні АЕС і стало значним внеском в енергетичну незалежність нашої держави. Вчені академії запропонували інноваційні технології заміщення антрациту на українських ТЕС і ТЕЦ. В інтересах одного з наших давніх і добрих партнерів із виробничого сектора — конструкторського бюро «Південне» було розроблено спеціальний модуль відведення третього ступеня ракети-носія і виконано інші важливі роботи. У нашому доробку — технологія контактного стикового зварювання рейок з високоміцної сталі, якими потяги рухаються, генеруючи значно менше шуму. Тому залізничні шляхи, прокладені за допомогою такої технології, називаються оксамитовими. Науковці академії створили багато розробок для потреб медицини, сільськогосподарського комплексу, а також в інтересах безпеки та оборони.

А наш бюджет на 2020 рік — близько 4 мільярдів гривень. Сюди слід додати кошти, які розподіляють між найкращими науковими колективами в межах програми «1230». Конкурси на отримання грантового фінансування нині проводить нещодавно створений Національний фонд досліджень України, і наші науковці сподіваюся отримати частину коштів на свої дослідження і з цього джерела.

Ось і все. Нагадаю, сукупний бюджет правоохоронних відомств перевищив 100 мільярдів гривень. Прикро це констатувати, але в нашої держави викривлена система пріоритетів. Трохи цифр для порівняння: у США 2017 року сукупні витрати на науку наблизилися до 550 мільярдів доларів. Але це дуже велика країна, і мені можуть заперечити, що порівняння некоректне. Тож погляньмо на Францію: у 2018 році там витратили на науку майже 68,5 мільярда доларів США.

Безперечно, є країни, чії видатки на науку в абсолютних цифрах б'ють наш антирекорд. Але деякі з них непорівнянні з Україною територіально та за чисельністю населення. Інші ж — зовсім не ті приклади, на які нам варто орієнтуватися. Взірєць ставлення до науковців — наші найближчі сусіди. Скажімо, у Польщі на науку спрямовують понад \$14,5 мільярда, у Туреччині — майже \$22 мільярда. Думаю, що в середньостроковій перспективі в Україні цілком можливо досягти цих обсягів видатків. Адже це відповідає національному законодавству. Нагадую, стаття 48 Закону України «Про наукову і науково-технічну діяльність» встановлює фінансування наукової галузі на рівні не нижче 1,7% ВВП з 2020 року. Нині майже вдесятеро менше. Здається, за нинішніх обставин цієї цифри вже неможливо досягти вчасно. Припускаю, що може статися щось неймовірне, що змусить нашу державу схаменутися. Життя — річ непередбачувана. Згадали ж про армію в 2014

році. До речі, 1,7% ВВП — це зовсім не захмарні видатки. Середньоєвропейський рівень становить 2—3 % ВВП, в Ізраїлі — навіть 4 %.

Але і з таким мізерним фінансуванням вчені академії демонструють продуктивність, без перебільшення, на межі фантастики. Прості розрахунки показали, що за кількістю публікацій, які припадають на мільйон євро витрат на науку, Україна випереджає і Польщу (втричі), і Туреччину (вдвічі), і навіть Німеччину (майже у п'ять разів). Однак ідеться не про будь-які публікації, а тільки у фахових рецензованих журналах, індексованих у базі Scopus, тобто у престижних світових виданнях. Можете уявити, який позитивний вибух міг би статись, якби наші не балувані державною увагою науковці отримали ті обладнання й зарплати, на які заслуговують.

Якщо зануритись у тему глибше, то міфи випаровуються, наче роса на сонці.

— **Борисе Євгеновичу, не можу не запитати про те, що, без сумніву, цікавить багатьох: чи підтримуєте когось із кандидатів на посаду президента НАН України? І якщо так, то кого й чому?**

— Давно і добре знаю кожного з кандидатів. І кожного встиг побачити і за словами, і за справами. Дуже важливо, що вони здобули авторитет як справжні фахівці у своїх галузях. Окрім того, більшість з них має не тільки великий науковий, а й науково-організаційний і викладацький досвід.

Звичайно, кожен, хто голосуватиме на виборах президента і президії академії (нагадаю, це будуть не лише члени НАН України, тобто академіки і члени-кореспонденти, а й представники наших наукових колективів), керуватиметься власним досвідом, сумлінням, особистими вподобаннями. Я з вибором уже визначився: голосуватиму за академіка Анатолія Загороднього, який обіймає посаду віцепрезидента нашої академії. На мою думку, саме в його особі найбільш вдало поєднано професійні й людські якості.

По-перше, Анатолієві Глібовичу в непростих умовах вдалося зберегти невеликий, але продуктивний колектив науковців Інституту теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова НАН України, в якому він працює з 1970-х років, а директорує з 2003-го. Це всесвітньо відома установа, вона активно співпрацює з провідними іноземними дослідницькими центрами, наприклад Європейським центром ядерних досліджень, який більше знають за аббревіатурою CERN. А в науковому світі до співпраці підходять дуже прагматично, тому, звісно, не стали б налагоджувати зв'язки з тим, хто не вартий уваги і довіри. Ясна річ, міжнародний престиж інституту підтримується авторитетом усіх його науковців, але повірте, академік Загородній теж доклав до цього чималих зусиль.



Батько та син (у дворі НТУУ «КПІ»)

До речі, він науковий представник України в CERN, що само по собі дорогого коштує.

По-друге, Анатолій Загородній позитивно зарекомендував себе за тими напрямками роботи, якими опікується відповідно до посадових обов'язків у президії НАН України. Це насамперед питання співпраці з Міністерством освіти і науки, Науковим комітетом Нацради з питань розвитку науки і технологій, Комітетом Верховної Ради України з питань освіти, науки та інновацій. Це й питання міжнародної наукової і науково-технічної співпраці, а також проблеми наукової молоді. Анатолій Загородній має величезний досвід, який може стати академії у пригоді з огляду на євроінтеграційний вектор, який Україна задекларувала кілька років тому, коли уклала Угоду про асоціацію з ЄС. Триває інтеграція України в європейський дослідницький простір, а серед іншого вирішують питання про приєднання до Європейської хмари відкритої науки.

Попереду ще дуже багато роботи, процес далекий від завершення, але важливо забезпечити його тяглість і неперервність. Академік Загородній побував у багатьох країнах і не з чужих слів знайомий з їхніми науковими системами. Розумне запозичення чужого досвіду допомагає нам реформувати академію.

Звичайно, залишається вкрай гострою проблема інтенсивного впливу мізків. Тому потрібно

працювати з талановитою молоддю, сприяти її долученню до академічної громади. Для цього на базі нашого Фізико-технічного науково-навчального центру було створено Київський академічний університет НАН України та МОН України. Він має статус наукової установи і готує майбутніх фахівців за визнаною у світі так званою фізтехівською системою. Це дає змогу з перших курсів поєднувати навчання з науковою діяльністю завдяки тому, що студентам викладають вчені, які самі проводять дослідження за перспективними напрямками науки.

У мене завжди викликали занепокоєння люди, які ждали влади, особливо за всяку ціну. Наприклад, ціною знеславлення організації, в якій вони бачать себе керівником, не маючи для цього достатньо компетенції та хисту. Як і з-поміж будьяких інших людей, серед учених також трапляються такі, котрі з більшою приємністю дивляться на себе в науці, ніж на науку в собі.

Я прожив довге, насичене і цікаве життя, мав змогу працювати з різними людьми, спостерігати за тим, як їхні характери проявляються в різних ситуаціях. Досвід підказує, що на булаву найбільше заслуговує той, хто спроможний по-волячому тягти майже непідйомну ношу, ні на що не скаржачись і не хизуючись. Тобто це має бути людина, по-перше, талановита і працююча, а по-друге, скромна і порядна. Не люблю гучних слів про патріотизм — зрозуміло, що керівник рівня президента академії наук має працювати в інтересах своєї країни.

Звісно, управління будь-якою достатньо великою організацією, зокрема й Національною академією наук, у системі якої працює близько 30 тисяч осіб, — це завжди командна гра, якщо скористатися спортивною термінологією. В академії всі рішення ухвалюють колегіально — для цього збираються засідання президії, бюро президії та бюро відділень НАН України, а також загальні збори академії та окремих її відділень. Попри це президент академії був і залишатиметься її обличчям, на ньому лежатиме весь тягар відповідальності. Тому хотілося б залишити академію в надійних руках. А про те, чиї руки найнадійніші, я вже сказав. Для Анатолія Загороднього академічна доброчесність і доброчесність в етичному сенсі — не порожні слова. І в робочому, і в міжособистісному спілкуванні він людина надзвичайно делікатна та дипломатична. А ще, можливо, як ніхто інший із кандидатів, готова до діалогу, бо вмів слухати і головне — чути різних людей. І що дуже важливо, він має непохитну та принципову позицію у захисті інтересів академії.

Підготувала: Сніжана МАЗУРЕНКО

КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ МАГНІТНИХ НАНОЧАСТИНОК ДЛЯ НЕРУЙНІВНОЇ МАГНІТНОЇ ТА МАГНІТНО-ЛЮМІНЕСЦЕНТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ*

І.В. Василенко¹, Н.В. Грабова¹, А.С. Литвиненко¹, В.В. Павлішук¹, С.В. Колотілов¹, М.Л. Казакевич²

¹Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України. 03028, м. Київ, пр. Науки, 31.

E-mail: admini@inphyschem-nas.kiev.ua

²Державне підприємство «Колоран» Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України.

03028, м. Київ, пр. Науки, 31. E-mail: koloran@email.ua

Представлено результати розробки магнітної та магнітно-люмінесцентної рідини на основі нанорозмірних частинок CoFe_2O_4 , а також композитів магнітних наночастинок CoFe_2O_4 та Fe_3O_4 з органічними полімерами. Показано, що використання рідини на основі CoFe_2O_4 для магнітної дефектоскопії дозволяє візуалізувати дефекти з шириною розкриття щонайменше 1,2 мкм. Додавання люмінесцентного барвника до магнітної рідини дає можливість одержати магнітно-люмінесцентний матеріал, використання якого дозволяє проявляти дефекти завдяки втягуванню усієї рідини в магнітне поле. Запропоновано простий спосіб приготування композицій для одержання реплік для методу магнітно-порошкової дефектоскопії, який полягає у створенні магнітних рідин Fe_3O_4 та CoFe_2O_4 , що містять органічні полімери та затвердівають при видаленні розчинника. Розроблені матеріали характеризуються високою чутливістю в дефектоскопії та дозволяють легко отримувати їх без додаткових процедур та матеріалів. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: магнітна дефектоскопія, магнітно-люмінесцентна дефектоскопія, магнітні наночастинок, композиції, органічні полімери, репліки дефектів

Магнітно-порошкова дефектоскопія є зручним, швидким і надійним методом неруйнівного контролю виробів з феро- або феромагнітних матеріалів (зокрема, заліза, більшості сортів сталі і чавуну). Метод базується на візуалізації прихованого дефекту завдяки розподілу частинок магнітного матеріалу в локальних поверхневих магнітних полях намагніченого виробу, які спотворюються через наявність такого дефекту [1]. Перевагою методу магнітопорошкової дефектоскопії є відносна дешевизна, відсутність потреби в дорогому обладнанні, а також можливість виявлення підповерхневих дефектів з глибиною залягання до 3 мм (що не можна зробити методом капілярної дефектоскопії). Магнітопорошкова дефектоскопія широко застосовується в сучасній індустрії як для контролю нових виробів, так і для перевірки стану деталей в процесі експлуатації. Підвищення чутливості методу магнітної дефектоскопії можливе за рахунок зменшення розміру магнітних частинок та/або додавання барвника (зокрема, люмінесцентного).

Важливим завданням методу магнітно-порошкової дефектоскопії є фіксація результатів візуалізації дефектів. Наразі описано ряд методів, які можуть застосовуватися для фіксації зображення дефектів на поверхні виробів, таких, як послідовне нанесення на поверхню феритового порошку і шару фарби [2], розчинних силікатів [3] полівінілхлориду [4], а також використання застигаючої

індикаторної маси на основі магнітного порошку, полідиметилсилоксанового каучуку і мінерального наповнювача (SiO_2 , TiO_2 , ZnO тощо) з каталізатором вулканізації [5, 6]. Недоліками таких реплік є складний спосіб їх формування на поверхні виробу – наприклад, описане формування репліки магнітного порошку і полівінілхлориду включає ряд послідовних стадій обробки виробу і нанесення компонентів репліки (висушування, дві стадії нагрівання). Характеристики магнітного матеріалу для неруйнівної магнітної дефектоскопії значною мірою визначаються методом його виготовлення. Наразі існує проблема створення матеріалу, використання якого в методі магнітно-порошкової дефектоскопії дозволило б фіксувати зображення дефектів без застосування складних процедур або додаткових засобів (таких, як фотографії).

Мета роботи полягала в розробці композицій на основі магнітних частинок, що дозволятимуть підвищити чутливість методу магнітної дефектоскопії, а також фіксувати її результати шляхом створення реплік. Ідея роботи полягала в тому, що використання нанорозмірних частинок, зокрема, у поєднанні з люмінесцентними барвниками, дозволить підвищити чутливість одержаних на їх основі матеріалів у порівнянні з матеріалами на основі магнітних частинок мікронного розміру, а створення композицій магнітних частинок з полімерами дозволить одержувати репліки результату

* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016-2020 рр.

© І.В. Василенко, Н.В. Грабова, А.С. Литвиненко, В.В. Павлішук, С.В. Колотілов, М.Л. Казакевич, 2020

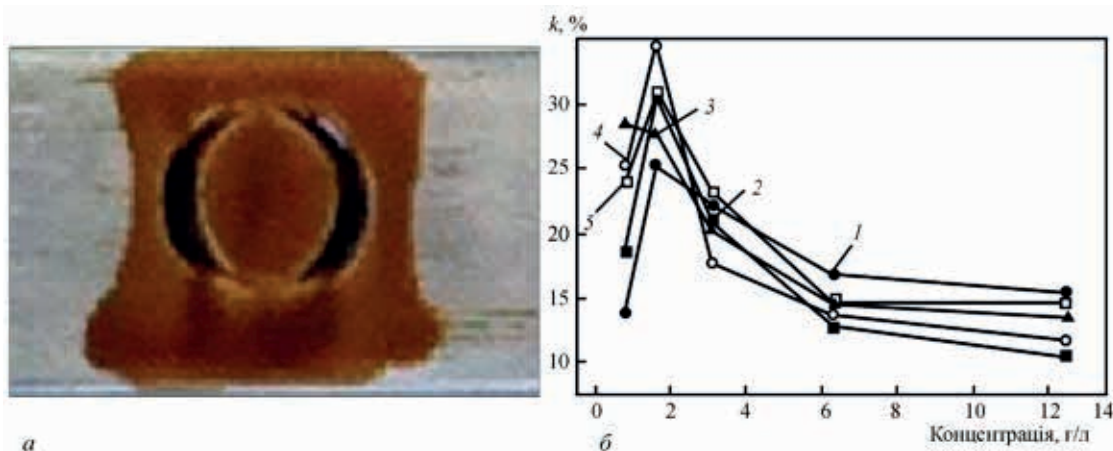


Рис. 1. Приклад візуалізації дефекту із використанням магнітної рідини на основі CoFe_2O_4 (а) та вплив концентрації магнітної рідини на контраст зображення дефекту (б). Витрата магнітної рідини, мл/м²: 1 – 42; 2 – 82; 3 – 125; 4 – 167; 5 – 208

візуалізації дефекту без додаткових процедур та матеріалів, безпосередньо після проведення самої процедури дефектоскопії.

Матеріали для дефектоскопії на основі магнітних рідин. За результатами роботи розроблено магнітну рідину на основі наночастинок CoFe_2O_4 середнім розміром 8 нм (за даними ТЕМ (трансмисійної електронної мікроскопії)) [7]. Наночастинки формуються при термічному розкладі гетерометалічного комплексу $[\text{Fe}_2\text{CoO}(\text{CH}_3\text{COO})_6(\text{H}_2\text{O})_3] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ з використанням тетраетилєнґліколю як розчинника та олеїнової кислоти, яка виконує роль поверхнево-активної речовини, що обмежує ріст кристалів.

При використанні такої рідини дефект (тріщина з шириною розкриття 1,2 мкм) проявляється у вигляді широкої чорної смуги (скупчення магнітної рідини), що з обох сторін оточена смугами з найменшою кількістю магнітної рідини. За класифікацією згідно з ГОСТ магнітна рідина відноситься до найвищого умовного рівня чутливості – А [8]. Показано, що використання магнітної рідини в методі магнітно-порошкової дефектоскопії дає можливість виявляти дефекти, паралельні (для області дуги) магнітному полю, що неможливо реалізувати, використовуючи магнітну суспензію.

Ефективність магнітних рідин можна оцінити за аналізом контрасту зображення дефекту в залежності від кількості нанесеної рідини та інших факторів. Контраст зображення розраховували за формулою (1), відповідно до якої 100 % контрасту відповідає чорному зображенню дефекту на білому фоні; 0 % – чорному зображенню на чорному фоні, або сірому на сірому фоні, або білому на білому.

$$k = \frac{B_{\Phi} - B_d}{B_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де k – контраст; B_{Φ} – яскравість фону; B_d – яскравість дефекту; B_0 – яскравість білого зображення.

З аналізу залежності контрасту зображення від витрати магнітної рідини можна зробити ви-

сновак про відсутність впливу кількості рідини на якість зображення. Значення напруженості магнітного поля в діапазоні 11...19 кА/м також не має суттєвого впливу на контраст. Таким чином, напруженість магнітного поля та кількість рідини в дослідженому діапазоні (11...19 кА/м та 42...208 мл/м² відповідно) не мають суттєвого впливу на контраст зображення, що спрощує технологічний процес виявлення дефектів.

Залежність контрасту від концентрації магнітної рідини проходить через максимум (рис. 1). Оптимальна концентрація магнітної рідини становить 1,6 г/л, що суттєво менше порівняно з концентрацією, передбаченою за ГОСТ (5–25 г/л) [2]. У випадку суспензій магнітних мікрочастинок зображення тріщин формують лише мікрочастинки, тому малі тріщини на темному фоні деталей не візуалізуються. На відміну від суспензій мікрочастинок, уся магнітна рідина на основі наночастинок (розчинник разом з наночастинками) втягується в магнітне поле біля дефектів, зображення стає ширшим, внаслідок чого дефекти краще візуалізуються.

В порівнянні з відомими магнітними суспензіями для магнітно-порошкової дефектоскопії магнітна рідина характеризується значно вищою агрегативною та седиментаційною стійкістю, осад не випадає впродовж кількох місяців.

Завдяки тому, що зображення дефекту формують не магнітні частинки, а матеріал в цілому разом з розчинником, немає необхідності іммобілізувати барвник на магнітній частинці (на відміну від суспензій магнітних мікрочастинок) [9]. Шляхом змішування розчину люмінору 490-РТ і магнітної рідини на основі CoFe_2O_4 в керосині можна приготувати ефективний матеріал для магнітно-люмінесцентної дефектоскопії. Встановлено, що найбільш контрастне зображення формується при використанні такої магнітно-люмінесцентної рідини з концентрацією CoFe_2O_4 3 г/л (рис. 2). При використанні більших концентра-

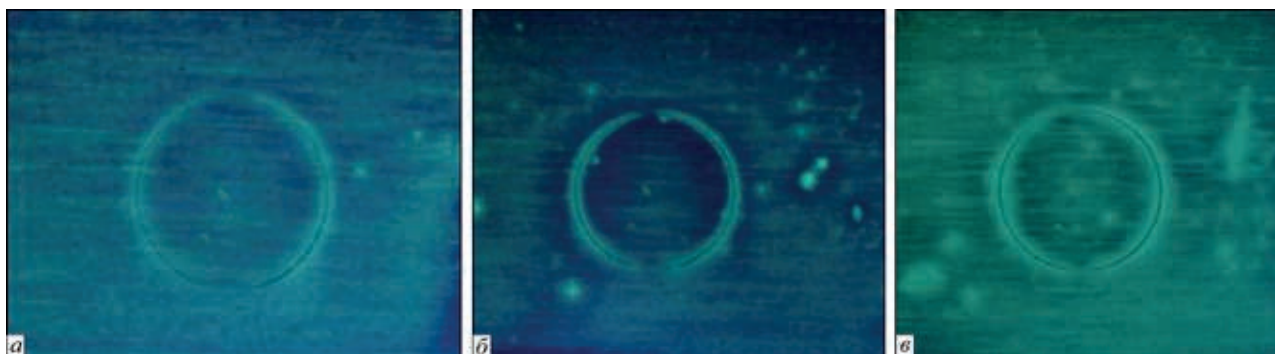


Рис. 2. Дефектограми, отримані на сталевій пластині із використанням магнітно-люмінесцентної композиції з концентрацією 1,5 г/л (а), 3 (б) і 6 (в)

цій формується менш яскраве зображення, а при використанні рідини з меншою концентрацією наночастинок зображення є менш контрастним за рахунок меншої ефективності перерозподілу рідини між об'єктом та дефектом.

Матеріали для дефектоскопії на основі магнітних наночастинок і полімерів. Для отримання реплік використано описані вище магнітні наночастинки CoFe_2O_4 з середнім розміром 8 нм та магнітні наночастинки Fe_3O_4 з середнім розміром 15 нм, одержані шляхом співосадження з розчину солей Fe^{2+} та Fe^{3+} у співвідношенні 1:2 в лужному середовищі [10]. Розмір частинок визначено методом ТЕМ.

Досліджено композиції магнітних наночастинок на водній основі з поліетиленоксидом, карбоксиметилцелюлозою, полівінілацетатом (емульсія, після затвердіння повторно не розчиняється), полівініловим спиртом, желатином,

композиції магнітних наночастинок на неводній основі з полістиролом і поліуретаном, а також досліджено нанесення композиції магнітних наночастинок на попередньо сформовану плівку сополімеру фторвініл-фторпропілену. Як розчинник для композицій з полістиролом і поліуретаном використовували суміш толуолу з гексаном [11, 12].

Випробування композицій проводили на дефекті на сталевій пластинці з шириною розкриття 1,2 мкм, що відноситься до рівня чутливості А. Після нанесення на поверхню намагніченого зразку, не знімаючи магніт, композицію висушували шляхом нагріву до 50...60 °С феном в слабкому потоці повітря для уникнення механічної деформації плівки. Процес сушки займав біля 10 хв. Після висушування плівки магніт прибирали, а утворену репліку плівку за можливості знімали з використанням шпателью. У випадку нерозчинного в воді сополіме-



Рис. 3. Залежність вигляду репліки Fe_3O_4 /полістирол/толуол від концентрації Fe_3O_4 в композиції 0,5 г/л (а); 1 (б); 2 (в)

Порівняння композицій на основі магнітних рідин та полімерів

Полімер, його оптимальна концентрація	Переваги	Недоліки
Поліетиленоксид, 0,5 % ¹	утворює міцний шар	крихка репліка
Фторвініл-фторпропіленовий сополімер ²	утворює еластичну плівку	нерозчинний в воді
Полівініловий спирт, 2 % ¹		важкорозчинний
Полівінілацетат, 5 % ¹		дестабілізує магнітну рідину
Карбоксиметилцелюлоза ¹		утворює в'язкі розчини – низька чутливість
Желатин, 2,5 % ¹	утворює міцну стійку плівку, контрастне зображення	необхідність роботи з гарячими розчинами. Репліка деформується при зберіганні у вологому повітрі
Полістирол, 2 % ³		плівка важко відокремлюється від поверхні
Поліуретан, 5 % ³		

Примітки. 1 – магнітна рідина на основі CoFe_2O_4 , розчин в воді; 2 – на попередньо сформовану плівку сополімеру в толуолі наносили магнітну рідину на основі CoFe_2O_4 в воді; 3 – магнітна рідина на основі Fe_3O_4 , розчин в суміші толуол-гексан.

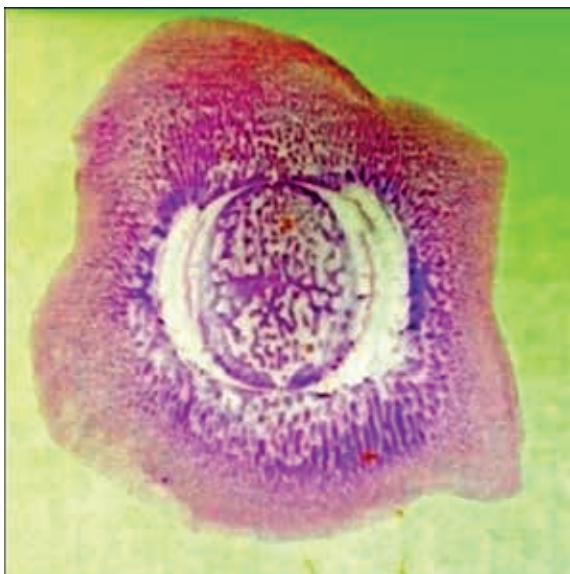


Рис. 4. Зображення дефекту (репліка), отримане з використанням магнітно-люмінесцентної композиції з полівініловим спиртом. Рисунок подано в інвертованому забарвленні для кращого відтворення при друці

ру фторвінілу-фторпропіленову на поверхню зразка наносили розчин полімеру в толуолі, висушували, на отриману плівку наносили магнітну рідину на основі води, зразок намагнічували, висушували, після чого відокремлювали плівку полімеру разом з зображенням дефекту. В таблиці наведено переваги і недоліки утворених плівок, а на рис. 3 показано репліки, отримані із використанням композиції Fe_3O_4 з полістиролом і поліуретаном.

На основі композиції магнітної рідини CoFe_2O_4 з полівініловим спиртом шляхом додавання водного розчину флуоресцеїну створено магнітно-люмінесцентну композицію. При використанні такої композиції зображення дефекту формується шляхом втягування всієї композиції в магнітне поле дефекту, а після висихання композиції скупчення масиву магнітних частинок, що осіли в зоні дефекту, гасить люмінесценцію флуоресцеїну, і зображення дефекту в світлі УФ лампи виглядає як чорні смуги на яскраво зеленому фоні (рис. 4).

Висновки

Розроблено метод синтезу хімічно- та седиментаційно-стійкої магнітної рідини на основі наночастинок CoFe_2O_4 розміром 8 нм, олеїнової кислоти та керосину. За результатами випробування розробленої магнітної рідини встановлено, що напруженість магнітного поля в межах 11...19 кА/м та кількість рідини в межах 42...208 мл/м² не мають суттєвого впливу на контраст зображення дефекту, а максимальний контраст зображення дефекту досягається при концентрації магнітних частинок в рідині 1,6 г/л.

Показано, що зображення дефекту формують не магнітні частинки, а матеріал в цілому разом з розчинником, тому додавання люмінесцентно-

го барвника до рідини дозволяє одержати магнітно-люмінесцентний матеріал для дефектоскопії.

Серед композицій для одержання реплік за методом магнітно-порошкової дефектоскопії на основі магнітних рідин Fe_3O_4 та CoFe_2O_4 і органічних полімерів найбільш перспективними є композиції з полівініацетатом, полістиролом та поліуретаном. Знайдено оптимальний вміст полімерів в композиціях, що забезпечує створення найбільш контрастних зображень. Розроблені матеріали характеризуються високою чутливістю в дефектоскопії та дозволяють легко одержувати репліки без додаткових процедур та матеріалів.

Список літератури

- (1976) *Неразрушающий контроль металлов и изделий*. Справочник. Самойлович Г.С. (ред.). Москва, Машиностроение.
- Райнсхаген К. Способ визуализации дефектов на поверхности; заявитель и патентовладелец «Швайссиндустри Орликон Бюрле АГ». СССР Пат. № 456433. № 1375553/25-28, заявл. 06.11.69, опубл. 05.01.75, бюллетень № 1.
- Walther K.G., Walther R.G. Method and apparatus for Magnetic testing of metallic work pieces. США Пат. 4,992,732. Assignee Magfoil & It GmbH. № 345,762, filed 01.01.1989, published 12.02.1991.
- Purdy R. (1968) *Non-destructive Testing*, 363–369.
- Савенкова А.В., Семеновская И.Б., Семенова Л.В. Индикаторная масса для магнитопорошкового контроля. СССР Пат. № 557306. № 2327791/28, заявл. 23.02.76, опубл. 05.05.77, бюллетень № 17.
- Алексеев Б.Ф., Савенкова А.В., Семеновская И.Б., Мурашова В.Г., Захарова З.М., Коновалова Е.А. Индикаторная масса для магнитопорошковой дефектоскопии. СССР Пат. № 637652. № 2483635/25-28, заявл. 04.05.77, опубл. 15.12.78. Бюллетень № 46.
- Василенко І.В., Колотілов С.В., Казакевич М.Л., Павліщук В.В. (2017) Магнітна рідина для магнітопорошкової дефектоскопії. Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України. № 201611965, заявл. 25.11.16, патент на корисну модель № 116493 зареєстр. 25.05.2017, опубл. 25.05.2017 р., бюл. № 10.
- (1992) ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнито-порошковый метод; Введ. 01.01.1988 взамен ГОСТ 21105-75; переизд. (апрель 1992 г.) с Изменением № 1, утвержденным в сентябре 1989 г. (ИУС 1-90). Москва, Изд-во стандартов.
- Василенко І.В., Казакевич М.Л., Павліщук В.В. (2018) Создание магнитных и магнитно-люминесцентных жидкостей на основе наночастиц CoFe_2O_4 для неразрушающей дефектоскопии. *Теоретическая и экспериментальная химия*, **54**, 333–337.
- Giri J., Thakurta S.G., Bellare J. et al. (2005) Preparation and characterization of phospholipid stabilized uniform sized magnetite nanoparticles. *J. Magn. Magn. Mater.*, **293**, 62–68.
- N.V. Grabovaya, I.V. Vasylenko, A.S. Lytvynenko et al. (2019) Composites of magnetic nanoparticles and polymers for non-destructive flaw detection. Abstract book of International research and practice conference Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2019), Lviv, August 27–30, 2019, Ukraine, 137.
- Василенко І.В., Грабова Н.В., Литвиненко А.С., Павліщук В.В., Колотілов С.В. (2020) Композити магнітних наночастинок і полімерів для неруйнівної дефектоскопії. Заявка на патент № а202001161 Україна. Заявник і патенто власник Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України.

References

- (1976) *Nondestructive testing of metals and products: Refer. book*. Ed. by G.S. Samoilovich. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

2. Reinshagen, K. Method of visualization of surface defects; Schweissindustrie Oerlikon Buehrle AG. USSR Pat. 456433, 1375553/25-28, filed 06.11.69, published 05.01.75 [in Russian].
3. Walther, K.G., Walther, R.G. Method and apparatus for magnetic testing of metallic work pieces. USA Pat. 4,992,732. Assignee Magfoil & It GmbH, 345,762, filed 01.01.1989, published 12.02.1991.
4. Purdy, R. (1968) Non-destructive Testing, 363–369.
5. Savenkova, A.V., Semenovskaya, I.B., Semenova, L.B. Indicator mass for magnetic particle flaw detection. USSR Pat. 557306, 2327791/28, filed 23.02.76, published 05.05.77 [in Russian].
6. Alekseev, B.F., Savenkova, A.V., Semenovskaya, I.B., Murashova, V.G., Zakharova, Z.M., Konovalova, E.A. Indicator mass for magnetic particle flaw detection. USSR Pat. 637652, 2483635/25-28, filed 04.05.77, published 15.12.78 [in Russian].
7. Vasylenko, I.V., Kolotilov, S.V., Kazakevych, M.L., Pavlishchuk, V.V. (2017) Magnetic fluid for magnetic particle flaw detection. IPC of NANU, u 201611965, filed 25.11.16, Pat. on utility model, 116493, registered 25.05.2017, published 25.05.2017 [in Ukrainian].
8. (1992) GOST 21105-87. Nondestructive testing. Magnetic-particle method; Introd. 01.01.1988 instead of GOST 21105-75; reedit.. April 1992. Moscow, Izd-vo Standartov [in Russian].
9. Vasilenko, I.V., Kazakevich, M.L., Pavlishchuk, V.V. (2018) Development of magnetic and magnetic-luminescent fluids based on CoFe₂O₄ nanoparticles for nondestructive flaw detection. *Teoreticheskaya i Eksperimentalnaya Khimiya*, **54**, 333–337 [in Russian].
10. Giri, J., Thakurta, S.G., Bellare, J. et al. (2005) Preparation and characterization of phospholipid stabilized uniform sized magnetite nanoparticles. *J. Magn. Magn. Mater.*, **293**, 62–68.
11. Grabovaya, N.V., Vasylenko, I.V., Lytvynenko, A.S. et al. (2019) Composites of magnetic nanoparticles and polymers for non-destructive flaw detection. In: Abstr. of Papers of Int. Research and Practice Conf. on Nanotechnology and Nanomaterials NANO-2019 (Lviv, August 27–30, 2019, Ukraine), 137.
12. Vasylenko, I.V., Grabova, N.V., Lytvynenko, A.S., Pavlishchuk, V.V., Kolotilov, S.V. (2020) Composites of magnetic nanoparticles and polymers for nondestructive flaw detection. Pat. Appl.a202001161, Ukraine, IPC [in Ukrainian].

COMPOSITES BASED ON MAGNETIC NANOPARTICLES FOR NONDESTRUCTIVE MAGNETIC AND MAGNETIC-LUMINESCENT FLAW DETECTION

I.V. Vasylenko¹, N.V. Grabova¹, A.S. Lytvynenko¹, V.V. Pavlishchuk¹, S.V. Kolotilov¹, M.L. Kazakevych²

¹L.V. Pissarzhevskii Institute of Physical Chemistry of NAS of Ukraine. 31 Nauka Prosp., 03028, Kyiv, Ukraine.

E-mail: admini@inphyschem-nas.kiev.ua

²State Enterprise «Koloran» of L.V. Pissarzhevskii Institute of Physical Chemistry of NAS of Ukraine. 31 Nauka Prosp., 03028, Kyiv, Ukraine. E-mail: koloran@email.ua

The paper presents the results of development of magnetic and magnetic-luminescent fluid based on nanosized CoFe₂O₄ particles, as well as composites of CoFe₂O₄ and Fe₃O₄ magnetic nanoparticles with organic polymers. It is shown that application of CoFe₂O₄-based fluid for magnetic flaw detection allows visualization of defects with the total opening width of at least 1.2 ~m. Addition of luminescent dye to magnetic fluid enables producing magnetic-luminescent material, application of which allows detection of defects due to drawing of the entire fluid into the magnetic field. A simple technique is proposed for preparation of compositions to obtain replicas for magnetic particle flaw detection. It consists in development of Fe₃O₄ and CoFe₂O₄ magnetic fluids, which contain organic polymers, and solidify upon removal of the solvent. Developed materials are characterized by a high sensitivity at flaw detection, and can be readily produced without additional procedures or materials. 12 Ref., 1 Table, рис. 4

Keywords: magnetic flaw detection, magnetic-luminescent flaw detection, magnetic nanoparticles, compositions, organic polymers, defect replicas

Надійшла до редакції 09.07.2020

«Kharkiv PromDays 2020»

28-30 жовтня 2020

Єдина промислова подія в Україні, що привертає увагу всіх фахівців
машинобудівельної та енергетичної галузі.



«Арт-завод МЕХАНІКА»:
Харків, вул. Плеханівська, 126,
метро «Завод ім. Малишева»
(057) 756-20-48, (067) 579-64-47
E-mail: info@adt.com.ua
www.adt.com.ua

НОВІ МЕТОДИКИ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ І ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ МЕТАЛО-КОМПОЗИТНИХ З'ЄДНАНЬ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ*

Л.І. Муравський, Т.І. Вороняк, Я.Л. Іваницький, М.М. Гвоздюк, О.П. Максименко,
О.Г. Куць, І.В. Сташишин, Г.І. Гаськевич, О.Д. Сурядова

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

Розроблено методику виявлення підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах шляхом відслідковування динамічних змін оптичних спеклів на зображеннях поверхні безпосередньо над дефектом під дією резонансного ультразвукового збудження та методику визначення полів деформацій біля навантажених отворів у композитах для різних режимів їх свердління за допомогою переносного оптико-цифрового корелятора. Наведені результати досліджень з визначення напружень зминання у багаторядних болтових з'єднаннях «композит-метал» за деформацією в околі одиничного отвору, контактено навантаженого через болт. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: підповерхневі дефекти, композитна панель, метало-композитне з'єднання, спекл-зображення, динамічні спекли, ультразвукове збудження, овалізація отвору, цифрова кореляція зображень, напруження зминання, болтове з'єднання, поле деформації

Під час виконання роботи були розроблені методики неруйнівного контролю і діагностики композитних елементів конструкцій та метало-композитних з'єднань авіаційної техніки для підвищення надійності та ресурсу їх роботи. Методики базувались на побудові та аналізі тривимірних полів переміщень поверхні композитів та контактуючих поверхонь у з'єднаннях «метал-композит» за силового навантаження, а також на оцінюванні ступеня пошкодження і зминання елементів з'єднань та виявлення внутрішніх дефектів у композиті засобами спекл-метрології. Розглянемо дві основні розроблені методики, а саме:

- методику виявлення підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах;
- розрахунково-експериментальну методику з визначення допустимих напружень зминання у багаторядних болтових з'єднаннях «композит-метал» методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ).

Методика виявлення підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах. Розвиток неруйнівних методів і систем для виявлення прихованих дефектів у багатошарових композитах є важливим напрямком досліджень в аерокосмічній і автомобільній промисловості. За останні роки було створено низку оптоелектронних інтерферометричних систем, що могли вирішити цю проблему в лабораторних умовах. Однак такі системи дуже чутливі до зовнішніх вібрацій, а також до повітряних і теплових потоків. Тому вони

потребують використання додаткового антивібраційного і захисного обладнання, що ускладнює їх практичне використання. Тому створення більш простих систем, що дають змогу виявляти підповерхневі дефекти в шаруватих композитних панелях, є актуальною проблемою. Один з можливих шляхів її розв'язання полягає у розробленні нових методів виявлення дефектів з використанням ефекту динамічних спеклів. У зв'язку з цим було запропоновано метод, заснований на оцінці динаміки руху спеклів на різних ділянках поверхні досліджуваної композитної структури [1, 2].

Рух спеклів у медичних і біологічних об'єктах, спричинений їхньою життєвою активністю, успішно використовували у медико-біологічних дослідженнях [3–5]. З метою виявлення внутрішніх розшарувань та інших дефектів у шаруватих композитах і композитних з'єднаннях було запропоновано генерувати динамічні спекли шляхом гармонічного ультразвукового (УЗ) збудження досліджуваної структури [1, 2]. Принцип дії запропонованого методу заснований на виділенні локальних ділянок поверхні області інтересу (ОІ), розташованих безпосередньо над прихованим дефектом. Виділення ОІ, оточеної фоновим просторовим шумом, еквівалентне виявленню дефекту, а розміри та форма ОІ близькі до розмірів та форми дефекту.

Шарувату композитну панель збуджують УЗ хвилями різної частоти. Кожен прихований дефект в залежності від своїх розмірів та форми по-

* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016–2020 рр.

© Л.І. Муравський, Т.І. Вороняк, Я.Л. Іваницький, М.М. Гвоздюк, О.П. Максименко, О.Г. Куць, І.В. Сташишин, Г.І. Гаськевич, О.Д. Сурядова, 2020

чинає коливатися на своїй власній основній або кратній резонансній частоті, якщо основна частота збігається зі змінною в часі частотою УЗ хвилі. Коливання дефекту викликають періодичні нормальні коливання ОІ. Оскільки УЗ збудження діє в режимі сканування частоти, усі дефекти, що мають резонансні частоти в заданих межах, починають генерувати коливання ОІ. Отже, кожен дефект, який вібрує на резонансній частоті, може викликати локальні коливання ОІ над дефектом. З іншого боку, коливання на цій частоті відсутні або дуже незначні в ділянках досліджуваної панелі за межами ОІ. Якщо оптично шорстку поверхню панелі освітлюють лазерним пучком, то на матриці фотоприймачів в площині цифрової камери формуються спекл-зображення (СЗ) поверхні панелі, яку збуджують УЗ хвилями. Якщо частота УЗ хвилі збігається з резонансною частотою дефекту, розташованого у полі зору цифрової камери, поверхня в межах ОІ починає коливатися на основній або кратній резонансних частотах. Рух поверхні спричинює випадковий рух спеклів, або так зване «мерехтіння» спеклів, яке в найбільшій мірі проявляє себе під час зміни нахилу ділянок ОІ відносно площини поверхні. Завдяки цьому відбувається просторово-часова зміна контрасту на ділянках максимальних змін швидкості і нахилу в межах ОІ. Навпаки, спекли поза межами ОІ або не рухаються, або ж рухаються зі значно меншими швидкостями, тобто рух спеклів є більш інтенсивний в межах ОІ та менш інтенсивний або взагалі відсутній поза її межами. Як наслідок, спекли в межах ОІ розмиваються, їхня інтенсивність змінюється, і контраст спеклів на певних ділянках ОІ відрізняється від контрасту оточуючого фону, внаслідок чого ОІ чітко виділяється на цьому фоні.

Для візуалізації підповерхневого дефекту в межах ОІ записують дві послідовності СЗ під час гармонічного УЗ збудження досліджуваної панелі. Кожне СЗ формують в результаті піксельного додавання K так званих елементарних спекл-зображень, які фіксують під час однієї короткої експозиції. Кожне СЗ із першої послідовності формується шляхом накопичення K елементарних СЗ з розподілами інтенсивності $I_{k,n1}(i,j)$, де i, j – номери пікселів у СЗ. Ці елементарні СЗ реєструють цифровою камерою за час її експозиції T з часовим проміжком τ , який починається з часовою затримкою δ_t відносно максимуму УЗ хвилі в межах її півперіоду $T_{US}/2$ ($\tau < T_{US}/2$, $\delta_t < T_{US}/2$). Кожне СЗ з другої послідовності формується відразу після попереднього СЗ шляхом накопичення K елементарних СЗ $I_{k,n2}(i,j)$, зареєстрованих тією самою камерою з тим самим часовим проміжком τ і часовою затримкою δ_t відносно мінімуму УЗ хвилі в межах її півперіоду $T_{US}/2$. Отже, послідовності містять N

пар СЗ, і кожна n -та пара ($n = 1, 2, \dots, N$) складається із СЗ з розподілами інтенсивності $I_{n,o}(i,j)$ та $I_{n,e}(i,j)$ відповідно, які можна записати так:

$$I_{n,o}(i,j) = \sum k[I_{k,n}1(i,j)], I_{n,e}(i,j) = \sum k[I_{k,n}2(i,j)]. \quad (1)$$

Оскільки часові проміжки τ значно менші за час експозиції T цифрової камери, для їх генерування необхідно використовувати швидкісний оптичний затвор, наприклад акустооптичний дефлектор (АОД) або електрооптичний модулятор.

Оцінка динамічних характеристик спеклів в межах ОІ та поза її межами може бути здійснена з використанням сигнальних дескрипторів, проаналізованих зокрема у [6]. Проте специфіка реєстрації СЗ $I_{n,o}(i,j)$ та $I_{n,e}(i,j)$ змусила запропонувати диференціальний дескриптор динамічних спеклів, рівний абсолютному значенню різниці між кожною n -ю парою СЗ або різницевому спекл-зображенню, тобто

$$I_{n,-}(i,j) = |I_{n,o}(i,j) - I_{n,e}(i,j)|. \quad (2)$$

Реалізація цього дескриптора дає можливість досягати значного розмиття спеклів у межах ОІ через протилежні поздовжні зміщення ОІ під час запису n -го парного і непарного СЗ на резонансній частоті дефектів, розміщених під ОІ. Такі зміщення реєструють двома послідовними СЗ (парним і непарним) з двома некорельованими рухами спеклів, які завдяки сумуванню елементарних СЗ підвищують розмиття спеклів у межах ОІ. Оскільки ділянка поза межами ОІ не коливається чи коливається дуже слабо на резонансній частоті дефекту, різницева СЗ $I_{n,-}(i,j)$ містить ділянку розмитих спеклів в межах ОІ, яка відрізняється від решти площі більш високим рівнем інтенсивності або іншим рівнем контрасту. Ці відмінності спричинені не лише зміщеннями поверхні ОІ, але й геометричними параметрами оптичної системи та розмірами спеклів.

Щоб підвищити відношення просторового сигналу в межах ОІ до навколишнього фону, запропоновано сумувати всі отримані різниці СЗ. Тому результуючий накопичувальний диференціальний дескриптор динамічних спеклів можна подати таким виразом:

$$I\sum(i,j) = (\gamma N - 1) \sum n [I_{n,-}(i,j)], \quad (3)$$

де γ ($N-1 \leq \gamma \leq 1$) – коефіцієнт для вибору оптимального рівня інтенсивності результуючого СЗ $I\sum(i,j)$.

Для верифікації запропонованого методу було створено експериментальну установку гібридної оптико-електронної системи (ГОЕС), що містила Nd:YAG-лазер ($\lambda = 532$ нм, $P = 120$ мВт), цифрову камеру Sony-XCD-V60 із ПЗЗ-матрицею розмірністю 640×480 пікселів, об'єктив VEGA-7 (2/20) та угнуту лінзу, що розширює лазерний промінь і освітлює досліджувану ділянку. Зауважмо, що замість Nd:YAG-лазера може бути використаний довільний напівпровідниковий лазер. Часові

проміжки τ забезпечував АОД, що працював як швидкісний оптичний затвор. Час експозиції затвора був синхронізований з генерованою УЗ частотою і становив приблизно $T_{US}/4$. Така система має низку переваг у порівнянні з інтерферометричними системами, а саме:

- конструкція системи значно простіша: відсутній інтерферометр; простіший блок управління;
- мініатюрні дешеві лазерні діоди чи навіть вузькосмугові світлодіоди можуть бути використані замість висококогерентних лазерів;
- площа досліджуваної поверхні значно більша;
- декореляція спеклів не впливає на СЗ за порівняно великих нормальних зміщень поверхні. Система може реєструвати рух спеклів, якщо амплітуда коливань ОІ сягає десятків міліметрів;
- на основі розробленої ГОЕС можна створити прості і доступні системи неруйнівного контролю для дослідження багатошарових композитних панелей у виробничих умовах.

Схема розробленої ГОЕС показана на рис. 1.

Щоб покращити якість і підвищити контраст, над кінцевими СЗ, тобто над накопичувальними диференціальними дескрипторами спекл-зображень, виконують процедури цифрової обробки, що складається з наступних етапів:

- розмиття за Гауссом (4 піксели);
- обмеження рівня сигналу згори і знизу на 25 %, виходячи з гістограм;
- повторне розмиття за Гауссом обмеженого зображення (4 піксели);
- обмеження рівня сигналу згори і знизу, виходячи з гістограм;
- бінаризація на рівні близько 50 %.

Для моделювання підповерхневих дефектів у досліджуваній склопластиковій панелі, що містила скловолоконні шари і епоксидну сполучну речовину, було зроблено глухі отвори різного розміру. Отвори знаходилися на глибині 1 мм від поверхні спостереження, а товщина верхнього шару склопластику також становила 1 мм. Тов-

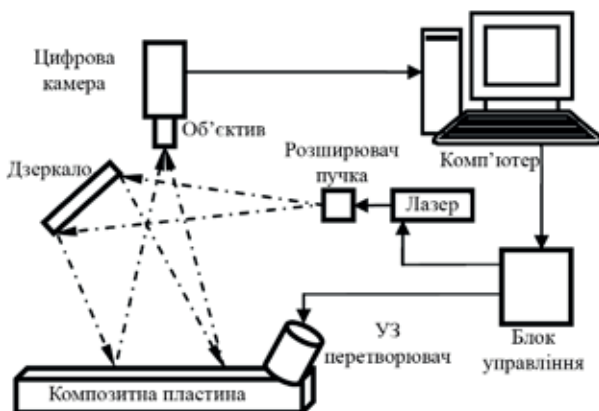


Рис. 1. Схема макету ГОЕС

щина панелі становила 6 мм. УЗ збудження панелі здійснювали в діапазоні від 15 до 150 кГц. Максимальне потовщення панелі в межах ОІ відповідало максимальному значенню гармонічної УЗ хвилі, а максимальне потоншення у тому самому місці – мінімальному значенню УЗ. Максимальне розмиття спеклів на певних ділянках ОІ досягали за максимального нахилу цих ділянок та високої швидкості їх переміщення протягом запису елементарного СЗ з часовим проміжком τ . З іншого боку, резонансні частоти практично не впливали на поверхню панелі поза межами ОІ.

На рис. 2 показаний макет ГОЕС, на якому виконували експерименти.

На рис. 3 показана панель, що містить круглі глухі отвори діаметрами 10 та 15 мм та квадратний глухий отвір зі стороною 22 мм. На рис. 4 наведено результати виявлення прихованих отворів у панелі.

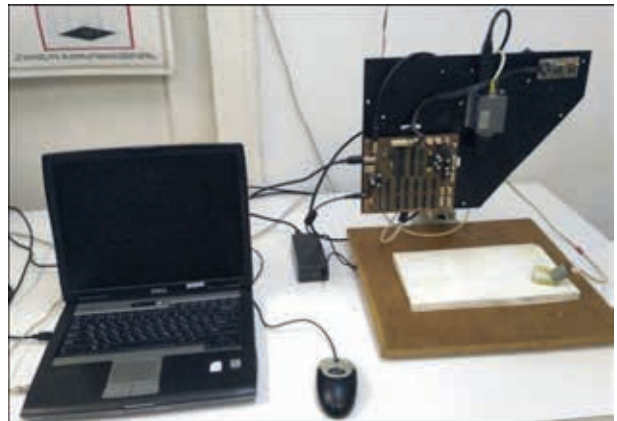


Рис. 2. Макет ГОЕС



Рис. 3. Фібергласова (склопластиковая) панель, зображена з тильного боку з позначаними розташуваннями круглих і квадратних глухих отворів та області непоклею, а також УЗ випромінювача, розташованого зі зовнішнього боку панелі

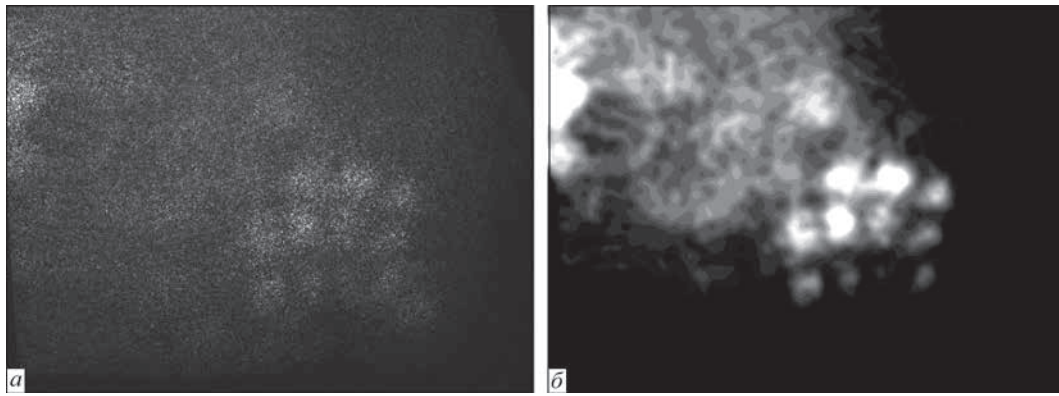


Рис. 4. Кумулятивне різницеve СЗ, $f_{r1} = 70$ кГц (а) та кумулятивне СЗ після процедури цифрової обробки (б)

В експерименті було зареєстровано 50 пар непарних і парних СЗ на резонансній частоті моди [3,3], рівній $f_{3,3} = 70$ кГц, часові інтервали $\tau = 3.8$ мкс, час затримки $\delta_t = 2,1$ мкс, $K = 24$. Аналіз отриманих експериментальних результатів підтверджує генерування гармонічних мод коливної ОІ УЗ збудженням. Зокрема, в межах квадратного отвору кількість виявлених градієнтів моди [3,3] становила 4×3 , що відповідає розподілу амплітуд градієнта такої моди. Як видно з рисунка, якість виділення меншого за розмірами круглого отвору при цій частоті істотно нижча. Наявність засвітки між обома отворами ймовірно пояснюється поганим проклеюванням шарів скловолокна, сприйнятим системою як дефект.

Розрахунково-експериментальна методика з визначення допустимих напружень зминання у багаторядних болтових з'єднаннях «композит-метал». Реальні болтові з'єднання «композит-метал» найчастіше мають десятки болтів, розміщених у декілька рядів. За припущення достатньої віддаленості болтів один від одного, максимальну несучу здатність такого з'єднання зі задовільною точністю можна визначати за міцністю зминання зразка з одиничним (ізолюваним) отвором. Тому такі випробування є базовими для оцінки міцності композиту у багаторядному з'єднанні [7, 8].

На міцність за зминання досліджували 12-шаровий вуглепластиковий композит типу ЕЛУР–

008П/БН зі схемою укладання арматури $\pm 45^\circ$. Плоскі зразки довжиною $L = 135$ мм, шириною $W = 30$ мм і товщиною $t = 3,4$ мм із каліброваним отвором діаметром $d = 6$ мм у робочій частині зразка виготовляли згідно з рекомендаціями ASTM D 5961/5961M–01. На захоплювальну частину зразка з двох боків наклеювали захисні текстолітові накладки завтовшки 1,5 мм (рис. 5).

Для однозначної оцінки допустимих напружень зминання в композиті необхідно встановити гранично допустиму деформацію матеріалу, у даному випадку – ступінь овалізації контактної отвору, яка для шаруватих полімерних композитних матеріалів не повинна перевищувати 2 % [9].

Зразок навантажували розтягом на універсальній розривній машині FP-100 через контактний елемент (КЕ) – сталевий болт діаметром $d = 6$ мм. Під час розтягу за швидкості переміщення траверси 1 мм/хв нерухомий КЕ деформував отвір. Для визначення деформацій у зоні контакту «композит-метал» використовували ЦКЗ та порівнювали спекл-зображення поверхні зразка у недеформованому стані і після навантаження [10]. За отриманими цифровими зображеннями розраховували поля переміщень та локальних деформацій на всіх етапах навантаження (рис. 6). Напруження зминання у болтовому з'єднанні композиту визначали за методикою [11, 12]. Побудували діа-

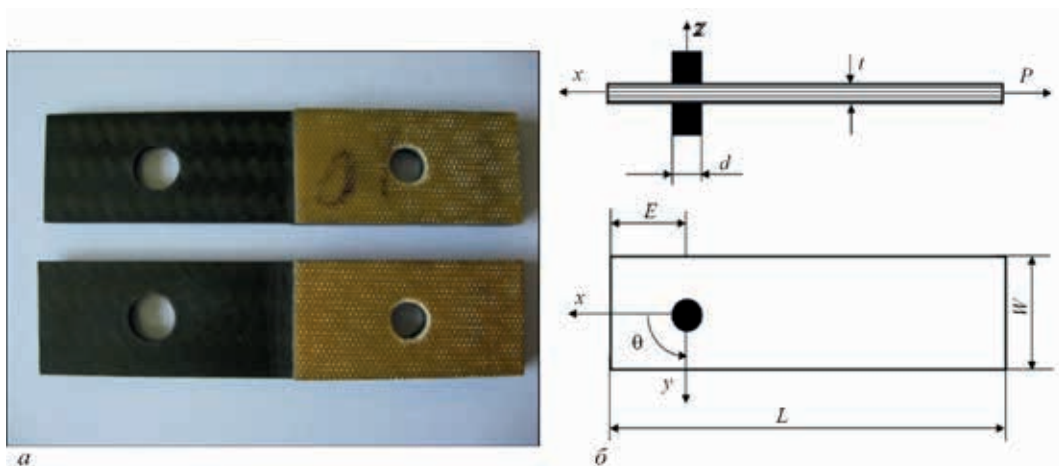


Рис. 5. Загальний вигляд (а) та схема експериментальних зразків (б)

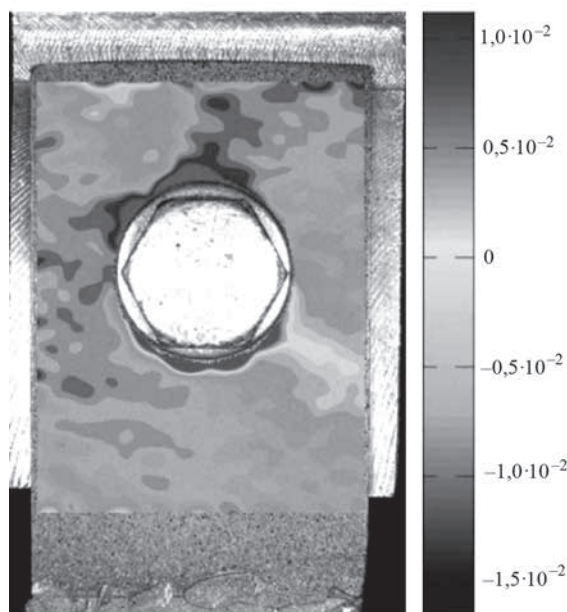


Рис. 6. Розподіл локальної деформації зразка ε_{yy} у зоні контакту, що відповідає овалізації 2 %

грами руйнування композитного зразка в координатах навантаження-овалізації отвору (P – δ) та напруження-деформація (σ – ε_{yy}) (рис. 7). Допустиме напруження зминання, що відповідає деформуванню контактного отвору на 2 %, обчислили за формулою

$$[\sigma_B] = \frac{P_{cr}}{d \cdot t}, \quad (4)$$

де P_{cr} – критичне зусилля зминання; d – діаметр отвору; t – товщина композитного зразка. Результати експериментальних досліджень наведені у таблиці 1.

Розроблену методику для одного з'єднання використали, щоб визначити допустимі напруження зминання у дворядному болтовому з'єднанні «композит-метал» [13]. Для цього виготовили партію зразків із такого ж матеріалу, що і зразки з одиничним отвором. Вони склалися із двох пластин вуглепластика ЕЛУР–008П/БН довжиною $L = 200$ мм, шириною $W = 100$ мм і товщиною $t = 3,4$ мм, з'єднаних двома рядами сталевих болтів М6 за допомогою плоскої дюралевої накладки товщиною 5 мм (рис. 8), що відповідає умовам роботи реальних конструкцій. Довжина робочої частини зразка $l = 160$ мм. Щоб попередити руйнування у клинових захопах розривної машини, на краї зразка наклеювали захисні склотекстолітові накладки завдовжки 120 мм. Для уникнення впливу

Таблиця 1. Результати експериментальних досліджень

Номер зразка	ε_{yy}	P_{cr} , N	$[\sigma_B]$, Pa
1	$2,01 \cdot 10^{-2}$	5100	250
2	$1,98 \cdot 10^{-2}$	5018	246
3	$2,02 \cdot 10^{-2}$	5385	264
4	$2,00 \cdot 10^{-2}$	5059	248
5	$2,03 \cdot 10^{-2}$	5610	275

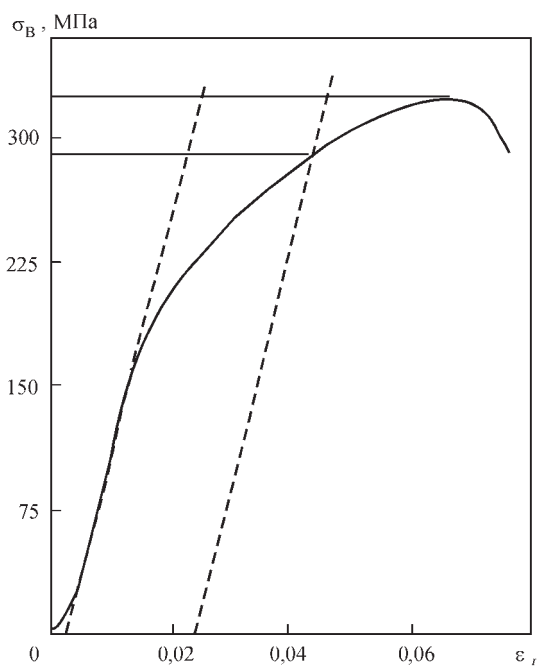


Рис. 7. Діаграма змінання одиничного болтового з'єднання «композит–метал»; ε – деформація контактного отвору 2 %

ву згинного моменту у місці з'єднання пластин ламінату під час розтягу зразка використовували захисні накладки різної товщини: 5 мм – від дюралевої пластини, а 1,6 мм – з протилежного боку. Під час експерименту зразок кріпили у клинових захопах розривної машини EUS-20 і розтягували зі швидкістю 1 мм/хв. За допомогою методу ЦКЗ отримали загальну картину розподілу деформацій в околі усіх болтів, які з'єднують дві пластини ламінату за різного навантаження (рис. 9). За шкалою на рис. 6, яка ідентична шкалі на рис. 9, визначали деформацію ε_{yy} у контактних точках зразка, а за діаграмою σ – ε_{yy} (рис. 7) для одиничного болтового з'єднання – напруження зминання σ_B (табл. 2).

Виявили (рис. 9), що ламінат в зоні контакту зі сталевими болтами деформується неоднаково. Причиною цього може бути нерівномірність затягування болтів та неспіввідповідність отворів у композитній та дюралевій пластинках. В околі болтових з'єднань 1b, 2b, 4b, 5b та 2a зафіксували більші деформації, тому тут максимально допустима

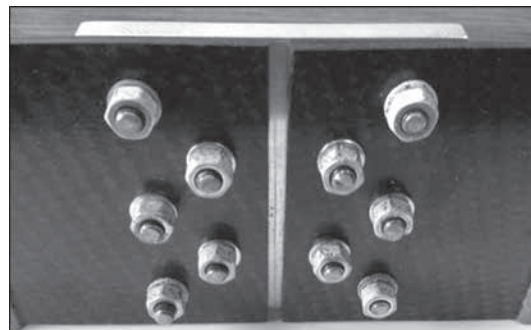
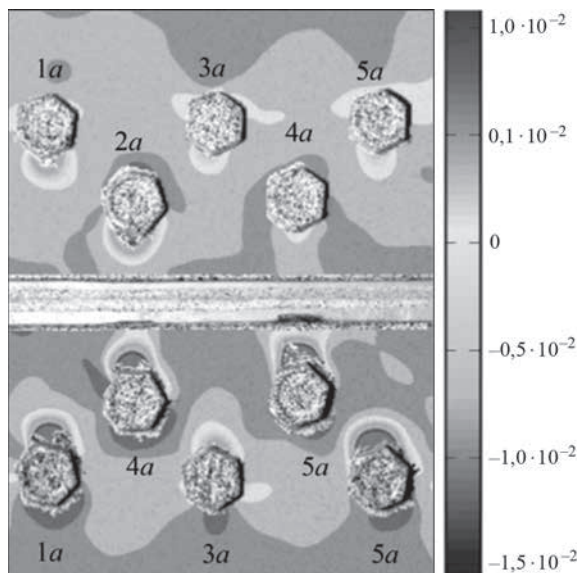


Рис. 8. Вигляд композитного зразка з дворядним болтовим з'єднанням

Таблиця 2. Деформації та напруження зминання дворяд-ного болтового з'єднання (зразок № 1)

Вузол з'єднання (див. рис. 9)	ε_{yy}	$[\sigma_B]$, МПа
1a	$0,61 \cdot 10^{-2}$	200
2a	$1,80 \cdot 10^{-2}$	225
3a	$0,51 \cdot 10^{-2}$	185
4a	$0,11 \cdot 10^{-2}$	105
5a	$0,50 \cdot 10^{-2}$	180
1b	$2,04 \cdot 10^{-2}$	246
2b	$2,10 \cdot 10^{-2}$	284
3b	$0,50 \cdot 10^{-2}$	190
4b	$2,00 \cdot 10^{-2}$	242
5b	$2,15 \cdot 10^{-2}$	290


Рис. 9. Розподіл деформацій ε_{yy} на поверхні композитного зразка з укладанням арматури $\pm 45^\circ$ за максимального навантаження

овалізація отворів досягнута швидше. Порівнюючи розподіли деформацій біля контактних точок багаторядного болтового з'єднання і у зразку з одиничним контактом, виявили несуттєву їх відмінність, що зумовлено взаємним впливом деформацій близько розташованих болтів. Ці особливості необхідно враховувати, вибираючи геометрію розташування і відстань між рядами болтів під час проектування роз'ємних багаторядних болтових з'єднань. Зіставивши розподіли локальних деформацій у контактних зонах дворядного і одиничного болтових з'єднань, визначили максимально допустимі напруження зминання у реальних багаторядних з'єднаннях для ідентичних полімерних композитних матеріалів.

Висновки

Розроблено методику виявлення підповерхневих дефектів у багатошарових композитних панелях. Ця методика використовує відмінності у випадкових рухах («мерехтіннях») спеклів поверхні композиту, зокрема, в межах і поза межами ОІ під час УЗ збудження панелі. Створений макет ГОЕС

має просту конструкцію і в ньому відсутня складна інтерферометрична система для виявлення внутрішніх дефектів. Достовірність запропонованої методики підтверджена результатами експериментів з композитними панелями, що містили глухі отвори. Систему, збудована на базі макету ГОЕС, можна буде використовувати не лише в лабораторії, але також у виробничих умовах завдяки низькій чутливості до вібрацій і відсутності явища декореляції спеклів за великих амплітуд коливань ОІ.

Розроблено розрахунково-експериментальну методику з визначення допустимих напружень зминання у багаторядних болтових з'єднаннях «композит–метал» через їх порівняння з напруженнями, отриманими для стандартного композитного зразка з одним контактним елементом. Запропонований спосіб експериментально перевірено на зразках зі шаруватого вуглепластику типу ЕЛУР–008П/БН зі схемою укладання арматури $\pm 45^\circ$.

Список літератури

1. Муравський Л.І., Куць О.Г., Вороняк Т.І., Гаськевич Г.І., Коцюба Ю.М., Стасишин І.В. (2019) Спосіб виявлення внутрішніх дефектів у зразках конструкційних матеріалів та елементів конструкцій. України Пат. № 136987. Зареєстр. в Держреєстрі патентів України на корисні моделі 25.09.2019 р. Бюл. № 18.
2. Muravsky L., Kuts O., Gaskevych G., Suriadova O. (2019) Detection of subsurface defects in composite panels using dynamic speckle patterns. XIth Int. Sci. & Pract. Conf. Electronics & Inform. Technol. (ELIT), 7–10. #47280 Published in IEEE Xplore digital library effective 2019-11-11.
3. Briers D., Duncan D.D., Hirst E. et al. (2013) Laser speckle contrast imaging: theoretical and practical limitations. *J. Biomed. Opt.*, **18**, 066018.
4. Zdunek A., Muravsky L., Frankevych L., Konstankiewicz K. (2007) New nondestructive method based on spatial-temporal speckle correlation technique for evaluation of apples quality during shelf-life. *Int. Agrophys.*, **21**, 305–310.
5. Maksymenko O.P., Muravsky L.I., Berezyuk M.I. (2015) Application of biospeckles for assessment of structural and cellular changes in muscle tissue. *J. Biomed. Opt.*, **20**(4), 095006-1-7.
6. Dai Pra A.L., Meschino G.J., Guzmán M.N. et al. (2016) Dynamic speckle image segmentation using self-organizing maps. *J. Opt.-UK*, **18**, 085606.
7. Киркач А.Б. (2011) Проблема прочности болтовых соединений на основе слоистых композиционных пластиков. *Вестник ХПИ. Сер. Динамика и прочность машин*, 45–54.
8. Карпов Я.С. (1998) Дослідження напружено-деформованого стану багаторядних механічних з'єднань деталей з композиційних матеріалів. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків, Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С. Жуковського «ХАІ», 328–334.
9. (2003) ASTM D 5961/5961M-01. Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
10. Гвоздюк М., Мольков Ю. (2014) Визначення міцнісних характеристик механічного з'єднання композит–метал. *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій*. Панасюк В.В. (ред.). Львів, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 517–522.
11. Максименко О.П., Іваницький Я.Л., Гвоздюк М.М. (2014) Визначення жорсткості з'єднання композит–метал методом цифрової кореляції зображень. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **50**(6), 44–49.
12. Іваницький Я.Л., Максименко О.П., Гвоздюк М.М., Муравський Л.І., Мольков Ю.В. (2017) Спосіб визначення

- жорсткості механічного з'єднання «композит–метал». Патент на корисну модель № 116508. Опубл. 25.05.2017. Бюлетень № 10.
13. Ivanytskyi Ya.L., Hvozdyuk M.M., Maksymenko O.P. et al. (2019) Evaluation of the strength of bolted joints of composite plates. *Materials Science*, 55(2), 265–271
- ### References
1. Muravskyi, L.I., Kuts, O.G., Voronyak, T.I., Gaskevych, G.I., Kotsyuba, Yu.M., Stasyshyn, I.V. (2019) Method to detect internal defects in samples of structural materials and elements. *Ukraine Pat.* 136987, registered on utility model 25.09.2019 [in Ukrainian].
 2. Muravsky, L., Kuts, O., Gaskevych, G., Suriadova, O. (2019) Detection of subsurface defects in composite panels using dynamic speckle patterns. In: 11th Int. Sci. & Pract. Conf. Electronics & Inform. Technol. (ELIT), 7–10, 47280, publish. in IEEE Xplore digital library effective 2019-11-11.
 3. Briers, D., Duncan, D.D., Hirst, E. et al. (2013) Laser speckle contrast imaging: Theoretical and practical limitations. *J. Biomed. Opt.*, 18, 066018.
 4. Zdunek, A., Muravsky, L., Frankevych, L., Konstankiewicz, K. (2007) New nondestructive method based on spatial-temporal speckle correlation technique for evaluation of apples quality during shelf-life. *Int. Agrophys.*, 21, 305–310.
 5. Maksymenko, O.P., Muravsky, L.I., Berezyuk, M.I. (2015) Application of biospeckles for assessment of structural and cellular changes in muscle tissue. *J. Biomed. Opt.*, 20(4), 095006-1-7.
 6. Dai Pra, A.L., Meschino, G.J., Guzmán, M.N. et al. (2016) Dynamic speckle image segmentation using self-organizing maps. *J. Opt.-UK*, 18, 085606.
 7. Kirkach, A.B. Problem of strength of bolted joints based on laminated composite plastics. *Vestnik KhPI. Ser. Dinamika i Prochnost Mashin*, 45–54 [in Russian].
 8. Karpov, Ya.S. (1998) Investigations of stress-strain state of multirow mechanical connections of the parts from composite materials. In: *Aerospace engineering and technology*, 328–334. Kharkiv, KhAI [in Ukrainian].
 9. (2003) ASTM D 5961/5961M-01. Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
 10. Gvozdyuk, M., Molkov, Yu. (2014) Determination of strength characteristics of composite-metal mechanical connection. In: *Fracture mechanics of materials and strength of structures*. Ed. by V.V. Panasyuk. Lviv, PMI, 517–522 [in Ukrainian].
 11. Maksymenko, O.P., Ivanytskyi, Ya.L., Gvozdyuk, M.M. (2014) Determination of rigidity of composite-metal joint by the method of digital correlation of images. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, 50(6), 44–49 [in Ukrainian].
 12. Ivanytskyi, Ya.L., Maksymenko, O.P., Gvozdyuk, M.M., Muravskyi, L.I., Molkov, Yu.V. (2017) Method to determine the rigidity of composite-metal mechanical connection. *Pat. on utility model* 116508, publish. 25.05.2017 [in Ukrainian].
 13. Ivanytskyi, Ya.L., Hvozdyuk M.M., Maksymenko O.P. et al. (2019) Evaluation of the strength of bolted joints of composite plates. *Materials Sci.*, 55(2), 265–271.

NEW PROCEDURES AND TECHNICAL MEANS OF CONTROL AND EXTENSION OF SERVICE LIFE OF METAL-COMPOSITE JOINTS OF AVIATION EQUIPMENT

L.I. Muravskyi, T.I. Voronyak, Ya.L. Ivanytski, M.M. Gvozdyuk, O.P. Maksymenko, O.G. Kuts, I.V. Stasyshyn, G.I. Gaskevych, O.D. Suriadova

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

A procedure was developed for detection of subsurface defects in layered composite structures by tracing dynamic changes of optical speckles on surface images directly above the defect under the impact of resonance ultrasonic excitation, as well as a procedure for determination of deformation fields near loaded holes in composites for different modes of their drilling, using a portable optico-digital correlator. The paper gives the results of investigations on determination of crushing stresses in multirow «composite-metal» bolted joints by deformation in the vicinity of an isolated hole, contact-loaded through a bolt. 13 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: subsurface defects, composite panel, metal-composite joints, speckle-images, dynamic speckles, ultrasonic excitation, hole elongation, digital correlation of images, crushing stresses, bolted joints, deformation field

Надійшла до редакції 08.07.2020

НОВА КНИГА

Збірка тез конференції «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану»



Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану: Тези допов. міжнар. конф. під ред. Ю.М. Посипайка / Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2020. — 74 стор.

В збірці представлено 40 тез доповідей XXIII міжнародної конференції «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану» (14–18 вересня 2020 р., м. Одеса), в яких відображені останні досягнення та практичні результати в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Збірку можна замовити в редакції журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»

www.patonpublishinghouse.com

ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ЛІНІЙНО-ПРУЖНОЇ КЕРАМІКИ В УМОВАХ ЛОКАЛЬНОГО КРАЙОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ: СТАТИСТИЧНИЙ ПІДХІД

В.В. Хворостяний, Ю.М. Родічев, О.Б. Сорока

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ-014, вул. Тимірязєвська, 2.

E-mail: khvorostyaniy.v.v@ipp.kiev.ua

Виконаний статистичний аналіз експериментальних даних лінійно-пружної однофазної кераміки, випробуваної при локальному навантаженні методом дряпання індентором Роквела поверхні зразку до відколювання його кромки. Для параметрів пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки побудовані експериментальні залежності розподілу Вейбула і застосовані моноmodalні апроксимації. Отримано діаграми руйнування керамічних матеріалів з урахуванням даних статистичного аналізу, на яких відображено закономірності зміни величини параметру пошкоджуваності кромки при різних значеннях ймовірності руйнування. Наведено зіставлення експериментальних та розрахункових статистичних результатів. Зроблено висновок про те, що поєднання емпіричних та аналітичних даних пошкоджуваності кромки та опору їх руйнуванню в зазначених умовах випробувань дозволяє одержувати обґрунтовані значення відповідних параметрів, які необхідні для подальшого достовірного прогнозування працездатності кераміки. Запропонований підхід значно підвищує точність оцінки застосовуваних параметрів механічної поведінки крихких матеріалів і сприяє раціональному вибору для них оптимальних режимів експлуатації. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: кераміка, дряпання до відколювання кромки, параметри пошкоджуваності та опору руйнуванню, діаграми руйнування, розподіл Вейбула, статистична оцінка і прогнозування

Кераміка має доволі широке практичне застосування у різних галузях промисловості за рахунок своїх особливих властивостей, що наділяють сучасні інженерні вироби з цього класу матеріалів важливими конкурентними перевагами. Елементи конструкцій та деталі машин з технічної кераміки не втрачають працездатності і здатні зберігати свій заданий функціонал навіть у складних експлуатаційних умовах при термосиловому навантаженні. Для кераміки характерна висока твердість, практично ідеальна пружність, але разом з тим вона має порівняно з металами низький опір зародженню та поширенню тріщин. Властивий крихкий характер руйнування керамічних матеріалів фактично є головним негативним фактором, який необхідно враховувати на етапах проектування відповідних конструктивних елементів та прогнозування їхньої несучої здатності. Значний вплив на характеристики міцності справляє стан робочих поверхонь кераміки, що отримується в процесі технологічних операцій формування матеріалу та його механічної обробки. Наявність різного роду концентраторів напружень на поверхні крихкого матеріалу або виробів з нього за певних умов призводить до катастрофічних руйнувань. Поширеним явищем вважається пошкодження крайових зон і безпосередньо кромки виробів, що виводить їх з ладу, як це може відбуватися при роботі ріжучого керамічного інструменту (лезо ножа або скальпеля з кераміки), при функціонуванні стоматологічних або ортопедичних імплантатів (зубні коронки, елементи ендопротезування

суглобів опорно-рухового апарату людини). У зв'язку з цим має велику наукову і практичну цінність вирішення задач мінімізації пошкоджуваності кромки деталей нової техніки з керамічних матеріалів, а також визначення їх опору руйнуванню в умовах локального контактного навантаження.

Можна констатувати, що на сьогоднішній день існує велика кількість різноманітних експериментальних методів дослідження крихких матеріалів при локальному навантаженні. Безпосередньому вивченню пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки присвячені методи випробувань, які полягають у створенні крайових відколів за допомогою твердих інденторів або пуансонів [1–5]. Принцип крайового руйнування матеріалів реалізується при вирішенні актуальних завдань матеріалознавства та міцності матеріалів, а його аспекти широко використовуються в контексті оптимізації технологічних процесів, таких, як шліфування та полірування деталей. Явище відколювання кромки готових керамічних виробів розглядається як один з ключових чинників визначення якості і вартості продукції, оцінки потенційних можливостей її промислового застосування.

Незважаючи на значний обсяг досліджень, виконаних за даним напрямком, можна відзначити, що результати випробувань крихких матеріалів при крайовому локальному навантаженні досі недостатньо розглядалися з точки зору їх застосування для оцінки конструкційної міцності крихких матеріалів, оцінки їх пошкоджуваності та надійності. При великому розкиді отримуваних експе-

риментальних даних при крайовому відколюванні важливою представляється достовірна оцінка з високою довірчою ймовірністю заданих граничних рівнів пошкодження кромки. У зв'язку з цим необхідно приділити більше уваги раціональній статистичній обробці даних і обґрунтуванню застосування на практиці отриманих результатів. Це буде сприяти підвищенню їх достовірності при проектуванні та виготовленні відповідальних елементів конструкцій і деталей машин [6].

Мета роботи полягала у визначенні гарантованого рівня характеристик пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки керамічних матеріалів для підвищення достовірності оцінок їх локальної міцності за допомогою застосування статистичних методів при аналізі експериментальних даних.

Експериментальне дослідження механічної поведінки лінійно-пружної однофазної кераміки в умовах локального крайового навантаження було виконано методом дряпання індентором Роквела поверхні зразка до відколювання його кромки (S+EF метод) [4, 7]. Випробування проведені відповідно до основних положень стандарту CEN/TS 834-9:2010 [8] на зразках оксидної та нітрид-кремнієвої кераміки. Традиційно параметром пошкоджуваності кромки служить величина відстані руйнування L , що визначається як відстань від кромки зразка до найбільш віддаленої точки на шрамі відколу в площині нормального навантаження індентором [4, 9, 10]. Для подальшого аналітичного розгляду особливостей крайового локального руйнування більш зручним було оперування параметром $1/L$, що отримав назву «параметра пошкоджуваності при дряпанні до відколювання кромки» (D_{ES} , damageability parameter of scratching up to the edge chipping).

Як критерій руйнування кромки використовували характеристику опору руйнуванню F_{RS} , яка обчислювалася як середнє значення відношення руйнівного навантаження до відстані руйнування для відповідного масиву випробувань керамічного матеріалу [4, 11]. На стадії дряпання індентором поверхні зразка, яка передувала процесу відколювання краю, відбувається утворення пружно-пластичної канавки. За результатами вимірювання її

ширини і з огляду на геометрію застосовуваного індентора Роквела, визначали значення важливої механічної характеристики матеріалу – твердості при дряпанні H_s [12, 13]. Отримані дані визначення параметрів пошкоджуваності кромки, її опору руйнуванню в умовах крайового локального навантаження і твердості при дряпанні досліджуваних керамічних матеріалів наведено в табл. 1.

Класичне представлення результатів випробувань кераміки S+EF методом у вигляді діаграм руйнування – залежностей «руйнівне навантаження P_f – відстань руйнування L » демонструє закономірності їх механічної поведінки при крайовому відколюванні (рис. 1). На діаграмах приведені лінійні апроксимації експериментальних даних. При цьому слід зазначити, що в загальному випадку найбільш точна апроксимація може бути не обов'язково лінійною, а, наприклад, описуватися ступеневою [9, 10, 14] або поліноміальною [15] залежністю. Для досліджуваної лінійно-пружної кераміки була встановлена інваріантність величини опору руйнуванню F_{RS} по відношенню до руйнівного навантаження.

Задача обґрунтованого визначення гарантованого рівня параметрів пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки керамічних матеріалів в умовах їх локального навантаження вирішувалася з використанням статистичних методів при аналізі експериментальних даних. Статистична обробка результатів випробувань виконувалася на основі статистичного розподілу Вейбула [16–18]. Цей розподіл широко застосовується в інженерній практиці для опису часу напрацювання до відмов технічних об'єктів. Двохпараметрична функція розподілу Вейбула визначається за формулою:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^a \right], \quad (1)$$

Функція щільності ймовірності обчислюється відповідно до наступного виразу:

$$f(x) = \left(\frac{a}{\lambda} \right) \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{a-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^a \right], \quad (2)$$

Найбільш простим та зручним методом знаходження параметрів розподілу Вейбула є метод

Таблиця 1. Результати експериментального дослідження лінійно-пружної кераміки методом дряпання індентором Роквела поверхні зразку до відколювання його кромки

Кераміка	Індекс	Кількість випробувань	Параметр пошкоджуваності кромки D_{ES} , 1/мм	Параметр опору руйнуванню кромки F_{RS} , Н/мм	Твердість при дряпанні H_s , ГПа
Оксид алюмінію	Al ₂ O ₃ -1	60	7,11±2,26	226±31	21,2
	Al ₂ O ₃ -2	106	7,28±2,21	234±23	16,2
	Al ₂ O ₃ -3	60	7,64±2,38	243±27	21,2
Оксид ітрію	Y ₂ O ₃	41	7,88±2,64	251±19	21,2
Оксид скандію	Sc ₂ O ₃	60	5,33±2,57	101±12	11,9
Нітрид кремнію	Si ₃ N ₄ -1	60	9,02±2,11	347±42	21,2
	Si ₃ N ₄ -2	60	8,37±1,96	320±21	21,2

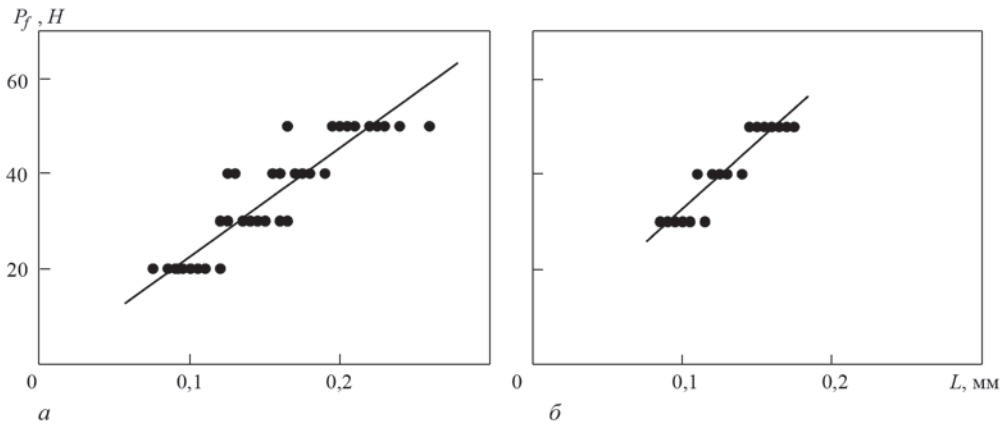


Рис. 1. Діаграми руйнування лінійно-пружної однофазної кераміки, побудовані за результатами випробувань методом дряпання індентором Роквела поверхні зразку до відколювання його кромки: *a* – оксид алюмінію Al_2O_3 -1; *б* – нітрид кремнію Si_3N_4 -2

функціонального перетворення рівняння (1) так, що функція двохпараметричного розподілу Вейбула на діаграмі ймовірностей представляється у вигляді прямої лінії [19], рівняння якої:

$$z = \alpha y - \beta, \quad (3)$$

де α – модуль Вейбула (параметр форми); $\beta = \alpha \ln \lambda$, λ – параметр масштабу.

Вісь ординат: $z = \ln(-\ln(1 - F(x)))$, вісь абсцис: $y = \ln x$, x – деяке значення випадкової величини X .

Для одержання емпіричного (вибіркового) розподілу виконували обчислення ймовірності безвідмовної роботи для кожного i -го члену варіаційного ряду для простої невеликої вибірки даних:

$$F(x) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}, \quad (4)$$

де i – ранг точки даних; n – загальна кількість точок.

Оцінку параметрів розподілу Вейбула α , β та λ здійснювали за допомогою методу найменших квадратів. Експериментальні залежності розподілу Вейбула були побудовані для параметрів пошкоджуваності кромки D_{ES} ($1/L_i$) та її опору руйнуванню F_{RS} (P_i/L_i) для досліджуваної кераміки при різних навантаженнях на індентор (рис. 2 та рис. 3). Побудова зазначених залежностей ви-

конувалася в середовищі програмного пакету «OriginPro 9.1». Контроль отриманих результатів проводився при виконанні аналогічних обчислень з використанням комп'ютерних програм «Microsoft Excel 2010» та «MATLAB 2011b». Проведений аналіз статистичних розподілів дозволив зробити висновок про прийнятність застосування моноmodalних апроксимацій експериментальних залежностей для випробувань в умовах крайового локального навантаження керамічних матеріалів [20]. У табл. 2 представлені результати визначень параметрів розподілу Вейбула, які потім були використані для оцінювання величин пошкоджуваності кромки L та її опору руйнуванню F_{RS} при різних значеннях ймовірності руйнування F .

Виконання статистичної обробки експериментальних даних дозволило уточнити діаграми руйнування керамічних матеріалів, випробуваних при крайовому відколюванні. Ці діаграми були перебудовані для параметра пошкоджуваності кромки L , обчисленого для різних рівнів ймовірності руйнування (рис. 4). Слід зазначити, що в інтервалі застосованих навантажень спостерігалася головним чином близька до лінійної закономірності зміни параметру пошкоджуваності кромки. Обчисле-

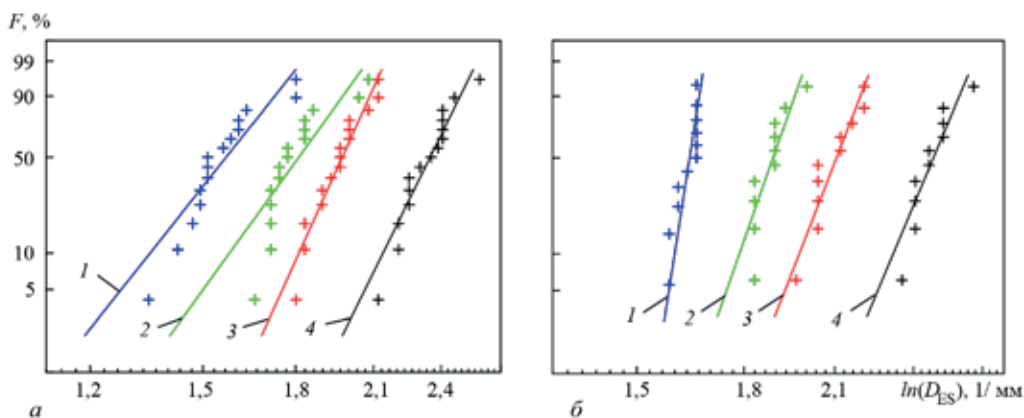


Рис. 2. Моноmodalні апроксимації експериментальних залежностей розподілів Вейбула для параметра пошкоджуваності кромки $D_{ES}(1/L)$ у випробуваннях $S+EF$ методом кераміки оксиду алюмінію Al_2O_3 -1 (*a*) та оксиду ітрію Y_2O_3 (*б*): 1 – $P_f=50$ Н; 2 – 40 Н; 3 – 30 Н; 4 – 20 Н

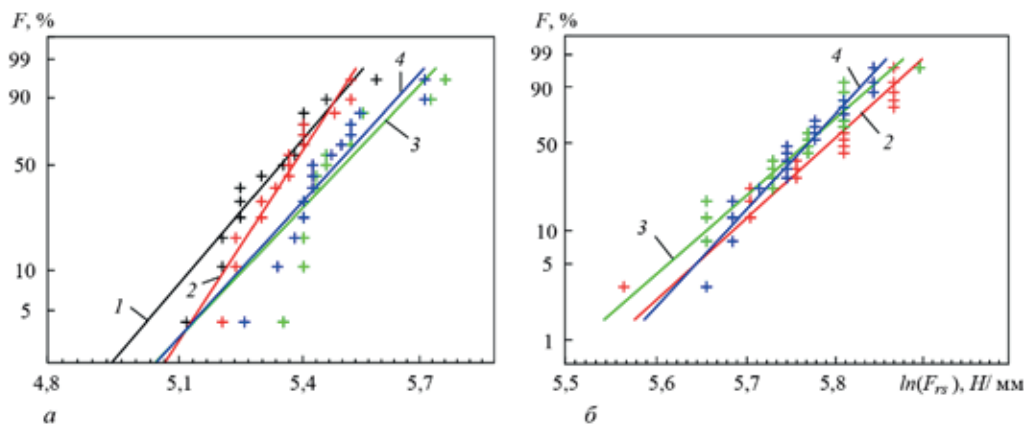


Рис. 3. Мономодальні апроксимації експериментальних залежностей розподілів Вейбула для параметра опору руйнуванню кромки $F_{RS}(P/L)$ у випробуваннях $S+EF$ методом кераміки оксиду алюмінію Al_2O_3 -1 (а) та нітриду кремнію Si_3N_4 -2 (б): 1 – $P=20$ Н; 2 – 30 Н; 3 – 40 Н; 4 – 50 Н

Таблиця 2. Результати визначення параметрів розподілу Вейбула для параметрів пошкоджуваності $D_{ES}(1/L)$ та опору руйнуванню $F_{RS}(P/L)$

P, Н	Кераміка	Для параметру пошкоджуваності кромки $D_{ES}(1/L)$			Для параметру опору руйнуванню кромки $F_{RS}(P/L)$		
		α	β	λ	α	β	λ
10,00	Sc ₂ O ₃	5,4959	13,0592	10,7636	5,4959	25,7140	107,6366
15,00	Sc ₂ O ₃	12,9245	25,4785	7,1802	12,9245	60,4786	107,7029
20,00 (21,43)	Sc ₂ O ₃	16,1084	25,5434	4,8828	16,1084	73,7998	97,6557
	Al ₂ O ₃ -1	9,0544	21,6792	10,9608	9,0408	48,7268	219,1279
	Al ₂ O ₃ -2	11,6439	27,6396	10,7375	11,6439	63,3257	230,1037
	Al ₂ O ₃ -3	11,3723	27,6806	11,4048	11,3723	61,7490	228,0973
25,00	Y ₂ O ₃	11,5411	29,0807	12,4255	11,5411	63,6546	248,5069
	Sc ₂ O ₃	9,5420	13,9038	4,2936	9,5420	44,6182	107,3377
	Sc ₂ O ₃	8,4018	10,7831	3,6090	8,4018	39,3592	108,2686
	Al ₂ O ₃ -1	11,1680	22,4395	7,4579	11,2379	60,7984	223,6587
30,00 (31,24)	Al ₂ O ₃ -2	10,4953	21,6105	7,8386	10,4953	57,7320	244,8750
	Al ₂ O ₃ -3	8,6276	18,7956	8,8334	8,6276	48,1396	264,9976
	Y ₂ O ₃	12,8512	27,4398	8,4587	12,8512	71,1492	253,7592
	Si ₃ N ₄ -1	11,5669	28,9674	12,2354	11,5669	68,3089	367,0689
35,00	Si ₃ N ₄ -2	14,0899	34,0553	11,2122	14,0899	81,9778	336,3647
	Sc ₂ O ₃	12,4406	13,7088	3,0100	12,4406	57,9395	105,3503
	Al ₂ O ₃ -1	8,0806	15,0988	6,4787	8,0619	44,8047	259,1963
	Al ₂ O ₃ -2	15,5375	28,2611	6,1650	15,5375	85,9796	253,0743
40,00 (41,05)	Al ₂ O ₃ -3	23,7372	43,6697	6,2947	23,7372	131,2334	251,7903
	Y ₂ O ₃	17,3207	33,1767	6,7899	17,3207	97,0706	271,5949
	Si ₃ N ₄ -1	19,4782	40,6557	8,0626	19,4782	112,5083	322,5034
	Si ₃ N ₄ -2	16,5931	34,8856	8,1859	16,5931	96,0954	327,4341
50,00 (50,86)	Al ₂ O ₃ -1	8,5597	13,8740	5,0574	8,5301	47,1910	252,7224
	Al ₂ O ₃ -2	15,0787	23,9658	4,9007	15,0787	83,2112	249,2508
	Al ₂ O ₃ -3	10,8987	18,2914	5,3565	10,8987	60,9272	267,8208
	Y ₂ O ₃	32,1342	53,0734	5,2154	32,1342	178,7832	260,7710
	Si ₃ N ₄ -1	8,9662	18,5505	7,9164	8,9662	53,6265	395,8209
	Si ₃ N ₄ -2	20,0751	37,6486	6,5233	20,0751	116,1828	326,1666

ні ймовірнісні пошкодження кромки зразків при різних низьких рівнях ймовірності руйнування істотно більші середніх експериментальних значень величини відстані руйнування при тому чи іншому навантаженні на індентор. Для ймовірності руйнування $F = 0,01$, що означає, що в 1 % випадків відбувається руйнування і відповідає утворенню найбільших пошкоджень кромки, значення параметру L перевищує в 1,2...1,5 рази традицій-

но використовувані для практичного оцінювання матеріалів середні його значення, одержувані безпосередньо з досліду. При розгляді інших рівнів ймовірності руйнування, наприклад $F = 0,05$ та $F = 0,10$, вказана відмінність у значеннях величини відстані руйнування становить 15...30 та 10...20 % відповідно.

Ступінь пошкоджуваності кромки при їх локальних навантаженнях індентором описують па-

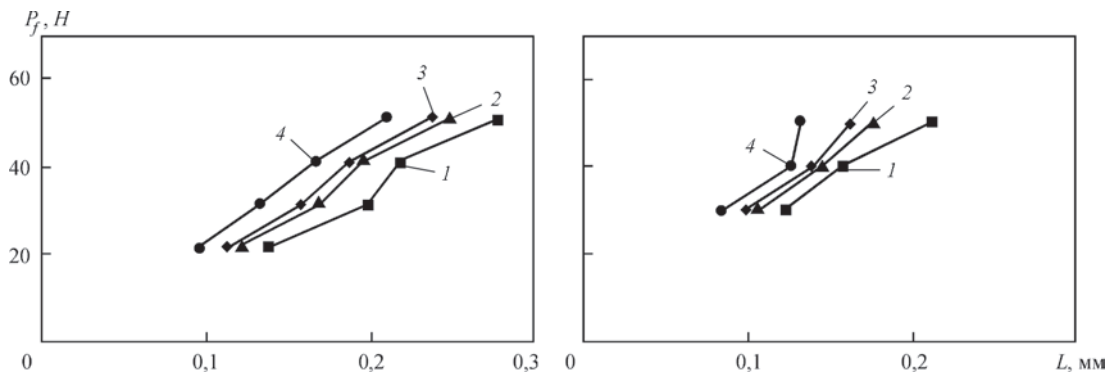


Рис. 4. Діаграми руйнування лінійно-пружної однофазної кераміки, побудовані з урахуванням статистичної обробки експериментальних даних ($1 - F = 0,01$; $2 - 0,05$; $3 - 0,10$; $4 - 0,50$): а – оксид алюмінію Al_2O_3-2 ; б – нітрид кремнію Si_3N_4-1

раметром L , який безпосередньо пов'язаний з габаритами уламку матеріалу, що відокремлюється. Очевидно, що чим більші значення величини відстані руйнування, тим більш значні пошкодження кромки, які знижують міцність виробів при функціональних навантаженнях. У разі виникнення великих розмірів відколів для надання деталі робочого стану потрібна механічна обробка і видалення крайових дефектів. При цьому підвищується трудомісткість її виготовлення пропорційно збільшенню розміру відколу. Проте часто для крихких матеріалів навіть невеликі пошкодження кромки можуть бути критичними та неприйнятними для подальшої працездатності виробу. Тому для кожного етапу експлуатації технічного елементу необхідно контролювати рівень пошкоджуваності його кромки.

При розв'язанні задач проектування в різних галузях промисловості визначення механічної поведінки крихких матеріалів з позицій їх конструкційної міцності в умовах заданого способу навантаження проводиться на основі детального аналізу гарантованого рівня параметрів міцності при низькій ймовірності руйнування F у діапазоні від 0,1 до 0,001. Для матеріалів даного дослідження досить прийняти рівень ймовірності руйнування $F = 0,01$, щоб отримати статистично достовірну оцінку їх пошкоджуваності та опору руйнуванню при локальних крайових навантаженнях, яка відповідає несприятливим випадкам, що призводять до можливих втрат керамікою своїх функціональних властивостей. У зв'язку з цим були визначені параметри $L^{0,01}$ та $F_{RS}^{0,01}$ при ймовірності руйнування $F = 0,01$ для досліджуваної лінійно-пружної кераміки і проведено їх порівняння з середніми та максимальними (мінімальними) експериментальними значеннями (рис. 5). Зіставлення результатів пошкоджуваності кромки зразків керамічних матеріалів, випробуваних S+EF методом, виконувалося при оперуванні значеннями величини відстані руйнування при певному рівні навантаження на індентор $P_f = 30$ Н, як деякому середньому значенню з діапазону прикладених навантажень. Таким чином було показано, що прогнозовані ймовірніс-

ні пошкодження кромки зразків кераміки перевищують максимальні емпіричні значення на 10...40 %. Статистично обґрунтовані мінімальні значення опору руйнуванню кромки для досліджуваної кераміки на 25...50 % менші середніх результатів з дослідів і на 10...40 % нижчі за мінімальні експериментальні значення.

Ці дані свідчать, що для прогнозування руйнування крихких матеріалів в умовах крайового локального навантаження використання тільки відповідних параметрів, отриманих з експерименту, не дає повного об'єктивного опису їх механічної поведінки. Тому необхідно розглядати комплекс результатів, який містить дані статистичного аналізу. При цьому

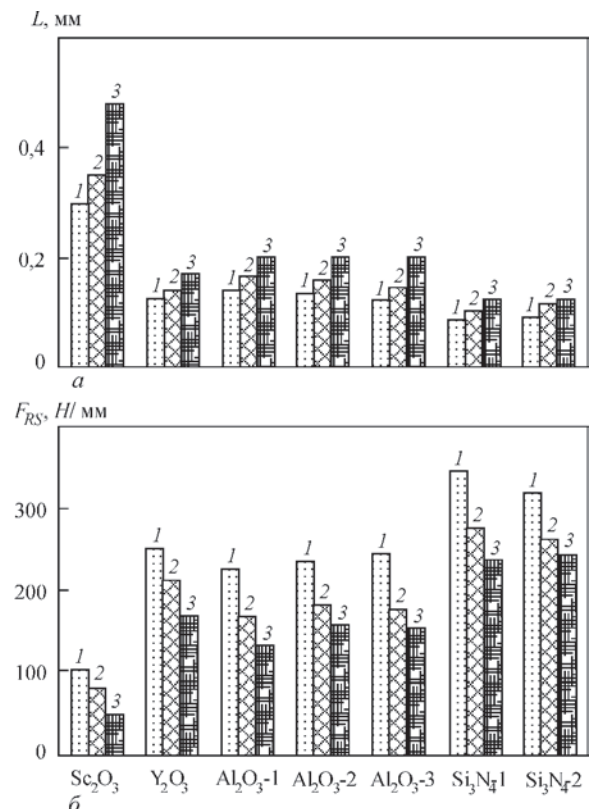


Рис. 5. Гістограми порівняння експериментальних ($L_{\text{серед}}$, L_{max} , $F_{RS, \text{серед}}$, $F_{RS, \text{min}}$) та розрахункових ($L^{0,01}$, $F_{RS}^{0,01}$) даних для лінійно-пружної однофазної кераміки: за параметром пошкоджуваності кромки (а), $1 - L_{\text{серед}}$; $2 - L_{\text{max}}$; $3 - L^{0,01}$; за параметром опору руйнуванню кромки (б), $1 - F_{RS, \text{серед}}$; $2 - F_{RS, \text{max}}$; $3 - F_{RS}^{0,01}$

значно підвищується точність визначення критичних розмірів пошкоджень матеріалів та величин їх опору руйнуванню, що може служити основою для вибору оптимальних режимів і умов експлуатації конструкційних елементів і деталей машин.

Висновки

Запропонований спосіб обґрунтованого визначення гарантованого рівня характеристик пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки лінійно-пружної кераміки, що базується на застосуванні статистичного розподілу Вейбула, дозволяє підвищити достовірність одержуваних оцінок їх механічної поведінки в умовах локального крайового навантаження.

Проведена статистична обробка експериментальних даних керамічних матеріалів, випробуваних методом дряпання до відколювання кромки і одержана достовірна оцінка з високою довірчою ймовірністю заданих граничних рівнів пошкодження кромки.

Базуючись на результатах статистичного аналізу дослідних даних отримані уточнені діаграми руйнування кераміки, побудовані для значень параметру пошкоджуваності кромки для різних ймовірностей руйнування. Показано, що у діапазоні прикладених навантажень спостерігається переважно близька до лінійної тенденція збільшення значення параметру пошкоджуваності кромки.

Здійснено визначення механічної поведінки досліджуваних керамічних матеріалів з позицій їх конструкційної міцності, що базувалося на детальному аналізі гарантованого рівня параметрів пошкоджуваності та опору руйнуванню при низькій ймовірності руйнування.

Побудовано гістограми порівняння експериментальних середніх та екстремальних значень параметрів пошкоджуваності та опору руйнуванню з розрахунковими статистичними даними. Показано, що для прогнозування руйнування керамічних матеріалів в умовах локального крайового навантаження слід оперувати сукупністю результатів, що містить як емпіричні, так і статистичні дані.

Список літератури

1. McCormick N.J., Almond E.A. (1990) Edge flaking of brittle materials. *J. Hard Mater.*, **1**, 25–51.
2. Scieszka S.F. (2005) Edge failure as a means of concurrently estimating the abrasion and edge fracture resistance of hard-metals. *Tribology International*, **38**, 834–842.
3. Gogotsi G.A., Galenko V.I., Mudrik S.P. et al. (2010) Fracture resistance estimation of elastic ceramics in edge flaking: EF baseline. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **30**, 1223–1228.
4. Хворостяний В.В. (2014) Механическое поведение керамики и стекла при локальных разрушениях кромок образцов индентором Роквелла. *Проблемы прочности*, **3**, 106–115.

5. Quinn G.D. (2015) On edge chipping testing and some personal perspectives on the state of the art of mechanical testing. *Dental Materials*, **31**, 26–36.
6. Jayatilaka ADeS., Trustrum K. (1977) Statistical approach to brittle fracture. *J. Mater. Sci.*, **12**, 1426–1430.
7. Хворостяний В.В. (2010) Определение сопротивления разрушению керамики при S+EF методе (царапание поверхности образца вплоть до скалывания его кромки). 36. тез допов. XI міжнар. конф. «Прогресивна техніка і технологія – 2010» (Київ, 18–21 травня 2010 р.).
8. (2010) Advanced technical ceramics – Mechanical properties of monolithic ceramics at room temperature. Part 9: Method of test for edge-chip resistance. CEN/TS 834-9. [Current from 2010-08-15]. CEN, 2010. (European Standard).
9. Quinn J., Su L., Flanders L., Lloyd I. (2000) «Edge toughness» and material properties related to the machining of dental ceramics. *Machining Science and Technology*, 291–304.
10. Petit F., Vandeneede V., Cambier F. (2009) Ceramic toughness assessment through edge chipping measurements – Influence of interfacial friction. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **29**, 2135–2141.
11. Гороци Г.А., Галенко В.И., Мудрик С.П. и др. (2007) Разрушение стекла при краевом скалывании. *Проблемы прочности*, **6**, 103–112.
12. Williams J.A. (1996) Analytical models of scratch hardness. *Tribology International*, **29**, 675–694.
13. Flanders L.A., Quinn J.B., Wilson Jr. O.C., Lloyd I.K. (2003) Scratch hardness and chipping of dental ceramics under different environments. *Dental Materials*, **19**, 716–724.
14. Chai H., Lawn B.R. (2007) A universal relation for edge chipping from sharp contacts in brittle materials: A simple means of toughness evaluation. *Acta Materialia*, **55**, 2555–2561.
15. Morrell R., Gant A.J. (2001) Edge chipping of hard metals. *Int. J. Refract. Met. & Hard Mater.*, **19**, 293 – 301.
16. Weibull W. (1939) A statistical theory of the strength of materials. *Proc. Royal Swedish Inst. Eng. Res.*, **151**, 1–45.
17. (2003) *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Weibull statistics for strength data*. ISO 20501:2003 Ed 1 (R09). [Current from 2003-12-01]. ISO/TC 206, 2003. (International Standard).
18. Quinn J.B., Quinn G.D. (2010) A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. *Dental Materials*, **26**, 135–147.
19. Тихов М.С., Агеев В.В., Бородин Т.С. (2010) Оценивание параметров распределения Вейбулла по случайно цензурированным выборкам. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, **4**, 141–145.
20. Родичев Ю.М., Сорока Е.Б., Шабета А.А. и др. (2013) Оценка локальной прочности и повреждаемости хрупких материалов по параметрам статистического распределения экспериментальных данных. *Вісник Тернопільського національного університету*, **4**, 161–173.

References

1. McCormick, N.J., Almond, E.A. (1990) Edge faking of brittle materials. *J. Hard Mater.*, **1**, 25–51.
2. Scieszka, S.F. (2005) Edge failure as a means of concurrently estimating the abrasion and edge fracture resistance of hard-metals. *Tribology Int.*, **38**, 834–842.
3. Gogotsi, G.A., Galenko, V.I., Mudrik, S.P. et al. (2010) Fracture resistance estimation of elastic ceramics in edge faking: EF baseline. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **30**, 1223–1228.
4. Khvorostianyi, V.V. (2014) Mechanical behaviour of ceramics and glass at local fractures of sample edges by Rockwell indenter. *Problemy Prochnosti*, **3**, 106–115.
5. Quinn G.D. (2015) On edge chipping testing and some personal perspectives on the state of the art of mechanical testing. *Dental Materials*, **31**, 26–36.
6. Jayatilaka, ADeS., Trustrum, K. (1977) Statistical approach to brittle fracture. *J. Mater. Sci.*, **12**, 1426–1430.
7. Khvorostianyi, V.V. (2010) Determination of fracture resistance of ceramics at S+EF method (scratching of sample surface up to edge chipping). In: *Abstr. of Papers of 11th Int.*

- Conf. on Advanced Engineering and Technology – 2020* (Kyiv, 18-21 May, 2010).
8. (2010) *Advanced technical ceramics – Mechanical properties of monolithic ceramics at room temperature*. Pt 9: Method of test for edge-chip resistance. CEN/TS 834-9. [Current from 2010-08-15]. CEN, 2010, European Standard.
 9. Quinn, J., Su, L., Flanders, L., Lloyd, I. (2000) «Edge toughness» and material properties related to the machining of dental ceramics. *Machining Sci. and Technology*, 291–304.
 10. Petit, F., Vandeneede, V., Cambier, F. (2009) Ceramic toughness assessment through edge chipping measurements – Influence of interfacial friction. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 29, 2135–2141.
 11. Gogotsi, G.A., Galenko, V.I., Mudrik, S.P. et al. (2007) Glass fracture at edge chipping. *Problemy Prochnosti*, 6, 103–112 [in Russian].
 12. Williams, J.A. (1996) Analytical models of scratch hardness. *Tribology Int.*, 29, 675–694.
 13. Flanders, L.A., Quinn, J.B., Wilson, Jr. O.C., Lloyd, I.K. (2003) Scratch hardness and chipping of dental ceramics under different environments. *Dental Materials*, 19, 716–724.
 14. Chai, H., Lawn, B.R. (2007) A universal relation for edge chipping from sharp contacts in brittle materials: A simple means of toughness evaluation. *Acta Materialia*, 55, 2555–2561.
 15. Morrell, R., Gant, A.J. (2001) Edge chipping of hard metals. *Int. J. Refract. Met. & Hard Mater.*, 19, 293 – 301.
 16. Weibull, W. (1939) A statistical theory of the strength of materials. *Proc. Royal Swedish Inst. Eng. Res.*, 151, 1–45.
 17. (2003) Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Weibull statistics for strength data. ISO 20501:2003 Ed 1 (R09). [Current from 2003-12-01]. ISO/TC 206, 2003. Int. Standard.
 18. Quinn, J.B., Quinn, G.D. (2010) A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. *Dental Materials*, 26, 135–147.
 19. Tikhov, M.S., Ageev, V.V., Borodina, T.S. (2010) Evaluation of Weibull distribution parameters. *Vestnik Nizhegorod. Unta N.I. Lobachevskogo*, 4, 141–145 [in Russian].
 20. Rodichev, Yu.M., Soroka, E.B., Shabetya, A.A. et al. Evaluation of local strength and damageability of brittle materials by the parameters of statistical distribution of experimental data. *Visnyk Ternopil. Nats. Un-tu*, 4, 161–173 [in Russian].

FRACTURE RESISTANCE AND DAMAGEABILITY OF LINEAR-ELASTIC CERAMICS UNDER THE CONDITIONS OF EDGE LOCAL LOADING: A STATISTICAL ANALYSIS

V.V. Khvorostianyi, Y.M. Rodichev, O.B. Soroka

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NAS of Ukraine. 2 Timiryazevska Str, 01014, Kyiv, Ukraine.
E-mail: khvorostianyi.v.v@ipp.kiev.ua

A statistical analysis of experimental data of linear-elastic single-phase ceramics, tested under local loading by scratching of specimen surface up to the edge chipping by the Rockwell indenter, was performed. Experimental dependences of Weibull distribution for the parameters of damageability and fracture resistance of the edge were constructed and monomodal approximations were applied. The diagrams of fracture of ceramic materials are obtained taking into account the data of statistical analysis, which reflect the patterns of change in the value of the edge damageability parameter at different values of fracture probability. A comparison of experimental and calculated statistical results was given. It is concluded that the combination of empirical and analytical data on the damageability of the edges and their resistance to fracture under the indicated test conditions makes it possible to obtain reasonable values of the corresponding parameters, which are necessary for further reliable prediction of the performance of ceramics. The proposed approach significantly increases the accuracy of estimation of the used parameters of mechanical behavior of brittle materials and contributes to rational selection of optimal operating conditions for them. 20 Ref, 2 Tabl. 2, 5 Fig.

Key words: ceramics, scratching up to edge chipping, damageability and fracture resistance parameters, diagrams of fracture, Weibull distribution, statistical estimation and prediction

Надійшла до редакції 06.08.2020

КИЇВСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК



**МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**

Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15
тел.: (044) 201-11-58, 201-11-65, 201-11-56
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua,
plast@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

**24–27 листопада
2020**

ІЗ ДОСВІДУ ВИКОРИСТАННЯ НЕРУЙНІВНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВАРІЙНОЇ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ

О.П. Гопкало¹, П.С. Юхимець², Г.Я. Безлюдько³, Р.М. Соломаха³, В.О. Нехотящий¹

¹Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2.

E-mail: ips@ipp.kiev.ua

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

³ТОВ «Спеціальні наукові розробки». 61184, м. Харків, а/с 12036

Приведено приклад діагностування неруйнівними методами контролю технічного стану аварійної ділянки трубопроводу нафтохосовища. За результатами обстеження аварійної ділянки трубопроводу (вимірювання твердості, овальності труб та коерцитивної сили H_c) були визначені характеристики статичної міцності металу труб та дана оцінка відносної навантаженості, структурного стану металу та рівня отриманих пошкоджень. Коерцитиметричним контролем встановлено, що рівень сумарних максимальних напружень, отриманих спочатку при монтажу конструкції, а потім після аварії та відновлення вихідного положення окремих елементів трубопроводу відносно опор, складав менше 30 % від умовної межі плинності металу. Дана оцінка відповідає даним розрахунків напружено-деформованого стану та узгоджується з результатами вимірювання овальності труб і відсутності локальних пластичних деформацій у найбільш навантажених зонах. Коерцитиметричним діагностуванням виявлені відмінності використаних марок сталей на окремих ділянках трубопроводу. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: напруження, деформація, навантаження, пошкодження, структуроскоп, коерцитивна сила

Складні умови експлуатації сучасних об'єктів енергетики, нафтохімії, транспорту потребують залучення сучасних неруйнівних методів контролю для забезпечення їх безаварійної роботи [1, 2]. Основним завданням технічного діагностування є забезпечення безпеки, функціональної надійності та ефективності роботи технічного об'єкта, а також скорочення витрат на його обслуговування і зменшення втрат від простоїв в результаті відмов та передчасних ремонтів. У аварійних ситуаціях для оцінки технічного стану металоконструкцій залучення сучасних неруйнівних методів контролю є першочерговою задачею.

У даній роботі наведено приклад використання неруйнівних методів контролю для оцінки технічного стану аварійної ділянки трубопроводів нафтохосовища.

Об'єкт обстеження. Об'єктом обстеження є аварійна ділянка трубопроводу нафтохосовища. В межах даного прикладу розглянуто всмоктуючі ділянки технологічних трубопроводів І (діаметром 108×4 мм ГОСТ 8732–78 [3]) та ІІ–ІV (діаметром 219×6 мм К-42 [4]) від вузла № 2 до відповідного насоса (рис. 1). Трубопроводи є надповерхневими, за винятком автомобільного переїзду між опорами ОП11–1 та ОП11–2, де вони прокладені в металевих трубних футлярах діаметром 273×6 мм (трубопровід І) та діаметром 426×6 мм (трубопроводи ІІ–ІV) на глибині ~ 2 м.

В результаті розкопки переїзду – трубопроводів ІІ–ІV до рівня їх обпирання, а трубопроводу І до більшої глибини з утворенням під ним порожнини, відбулося їх зміщення. Так на ковзаючих опорах ОП11–1, А та Б трубопроводів ІІ–ІV (діаметром 219×6 мм) були зафіксовані зазори до 20 мм (рис. 2). Найбільшого ушкодження зазнав трубопровід І – (діаметром 108×4 мм) внаслідок просадки та відокремлення від опори С, яке складало ~100 мм, а зміщення в горизонтальній площині до 30 мм.

Рішення про можливість подальшої експлуатації трубопроводів пов'язувалось з оцінкою технічного стану найбільш ушкоджених зон основного металу і зварних з'єднань трубопроводів.

Результати обстеження аварійної ділянки трубопроводу. За допомогою комплексу програм Астра-Нова [5] було виконано розрахунки напружено-деформованого стану спорожненого, за винятком підземної частини, трубопроводу І (діаметром 108×4 мм). Згідно до розрахункової схеми по кінцях трубопроводу – на вузлі № 2 та насосі, переміщення обмежувалися нерухомими опорами. Тертя трубопроводу по ковзаючих опорах не враховувалось.

Розрахунок проводився за умов відсутності ґрунту для 2-х варіантів:

1) просадка підземної частини трубопроводу під дією власної ваги;

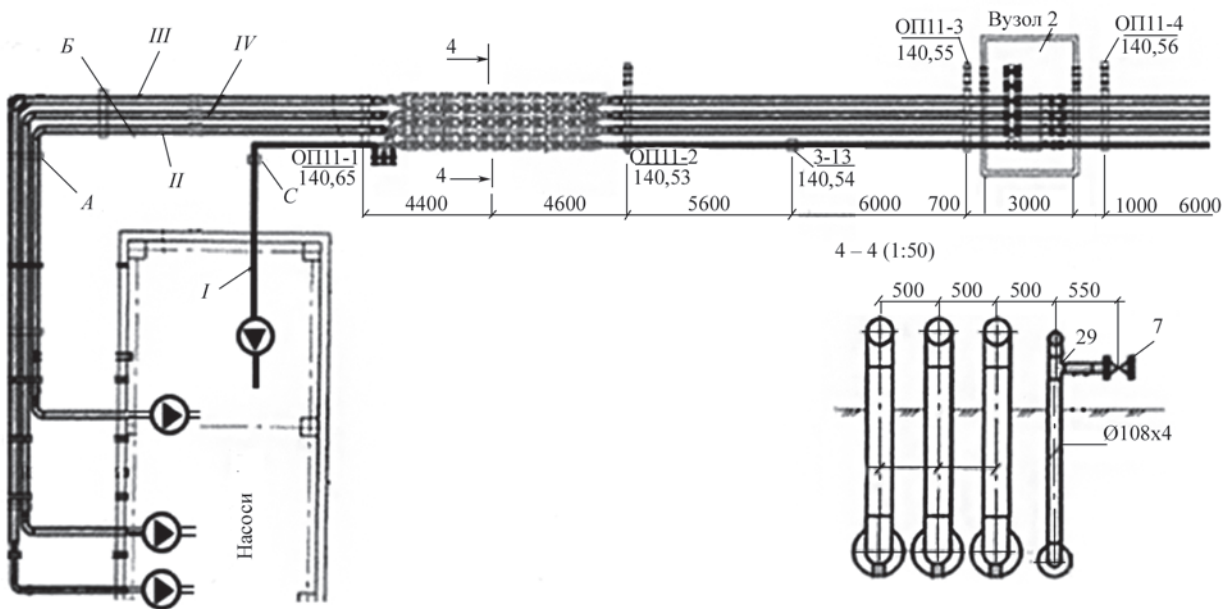


Рис. 1. Схема трубопроводів на основі проектної документації



Рис. 2. Трубопроводи I-IV після розкопування (а); зазор між трубопроводом II та опорою А (б)

2) зазор на опорах А та Б ~ 100 мм під дією власної ваги та рівномірно розповсюдженого зусилля на розкопаній ділянці.

Результати розрахунків НДС, наведені на рис. 3, засвідчили, що найбільший відрив трубопроводу за варіантом 1 спостерігається на опорі С (рис. 1) і становить ~ 1 мм. Така різниця між фактичним (~ 100 мм) і обчисленим значенням може бути наслідком використання натягу під час монтажу трубопроводу, а також відмінності температур металу при монтажі та проведеному розкопуванні.

Співставлення максимальних за обома варіантами розрахунків напружень $\sigma_{\max} = 167,9$ МПа з механічними властивостями металу трубопроводів, визначеними за даними вимірювання твердості (та-

блиця) дозволило зробити висновок про пружний характер деформування основного металу трубопроводу I. Оскільки виникнення максимальних деформацій обумовлено згином трубопроводу, що відбувався переважно в вертикальній площині, зона їх локалізації обмежувалась невеликими поверхневими ділянками кругового перерізу трубопроводу. Враховуючи, що концентрація напружень в зоні зварного кільцевого з'єднання, виконаного ручним дуговим зварюванням, становить $\alpha \approx 2,5$ [6], цілком очікувано, що при вертикальному переміщенні трубопроводу ~ 100 мм в локальних ділянках найбільш навантажених кільцевих зварних стиків відбувалися пластичні деформації. При цьому, в наслідок їх обмеженості, переріз в цілому деформувався пружно.

Візуальний огляд, вибіркові виміри твердості, товщини та овальності труб, а також коерцитиметричний контроль проводилися після часткового відновлення проектного положення трубопроводу I (діаметром 108×4 мм) за рахунок піддомкращування. За цих обставин трубопровід після повернення із положення, що відповідало розрахунковому варіанту 2, знаходився в деякому проміжному стані поміж повністю розвантаженим (проектним) та положенням, що відповідало розрахунковому варіанту 1.

Для встановлення ознак пластичного деформування окремих ділянок трубопроводів було проведено вимірювання їх овальності. Овальність труб визначали як відношення діаметрів у горизонтальній та вертикальній площинах. Вимірювання діаметрів труб в найбільш напружених перерізах трубопроводів проводили на відстані 20 мм від зварних швів у двох взаємно перпендикулярних напрямках їх поперечного перерізу. Розкид даних овальності був в межах $0,46 \dots 1,87$ %. Максимальні відхилення вимірюваних діаметрів труб від номінальних був мен-

Результати вимірювання твердості та визначення характеристик міцності металу

Діаметр трубопроводу, мм	Механічні властивості матеріалу			Матеріал, згідно до ТД
	Твердість HB, МПа	¹ Межа міцності сталі, σ_b , МПа	¹ Межа плинності сталі, $\sigma_{0,2}$, МПа	
219	1250...1300	$\frac{416...432}{\geq 412}$	$\frac{250...260}{\geq 245}$	Труба 219×6-K42 ТУ 14-3-377-99
108	820...910	$\frac{273...303}{\geq 412}$	$\frac{164...182}{\geq 245}$	Труба 108×4ГОСТ 8732-78В20 ГОСТ 8731-74

Примітка. ¹В чисельнику наведені дані, обраховані згідно до вимірів твердості, в знаменнику – вимоги нормативної документації. ще 1,37 %. Візуальний огляд труб не виявив ознак локального деформування. Отримані результати вимірювання овальності труб практично відповідають вимогам нормативної документації на виготовлення. На рис. 4 приведені схеми ділянки та зони для вимірювання діаметрів труб у горизонтальній та вертикальних площинах.

Для визначення рівня навантаженості та ознак пластичного деформування в результаті вилучення ґрунту з під труби діаметром 108×4 мм (трубопроводу I) та над трубами діаметром 219×6 мм (трубопроводу II), було проведено вимірюванні значень коерцитивної сили. Вимірювання значень коерцитивної сили проводили структуроскопом КРМ-Ц-К2М, оснащеного датчиками з базами вимірювання 65 (D65) та 27 мм (D27).

Слід зазначити, що зміни структурного стану металу при навантаженні викликають суттєві зміни значень коерцитивної сили, які залежать від орієнтації полюсів магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні труби, що дозволяє визначати наявність ознак пластичного деформування окремих ділянок виробів [7].

На рис. 5 приведено розподіл коерцитивної сили на ділянці трубопроводу I (діаметром 108×4 мм) від насосної станції до переходу у підземну частину. Поворот на 90° напрямку трубопроводу у горизонтальній площині умовно не показано для спрощення відображення на графіках розподілу значень коерцитивної сили по довжині наземної частини трубопроводу. Саму конструкцію обстеженої ділянки трубопроводу розглядали як нерозрізну балку. Зняття ґрунту на підземній частині та повернення до вихідного стану даної труби шляхом підйому домкратами її підземної частини і можлива наявність залишкових монтажних напружень викликає складний характер розподілу значень коерцитивної сили по довжині трубопроводу.

Суттєві розбіжності розподілу розрахункових напружень (див. рис. 3, а) та коерцитивної сили по довжині обстеженої ділянки трубопроводу I (рис. 5) можуть бути наслідком піддомкрачування підземної частини трубопроводу. Зміна співвідношень значень коерцитивної сили у повздовжньому та поперечному напрямках труби, у зоні прикладання зусилля домкрата, де $H_{\perp} > H_{\parallel}$, та решти зон, де $H_{\perp} < H_{\parallel}$, вказує на їх вплив на характер розподілу коерцитивної сили. Спільним для розподі-

лів напружень та коерцитивної сили поблизу зони піддомкрачування є наявність ділянок зменшення та збільшення їх абсолютних величин, тобто відсутність монотонності змін досліджуваних характеристик. По мірі віддалення від розкопаної частини трубопроводу – на ділянці трубопроводу від насосу до опори С розподіл значень коерцитивної сили набуває монотонного характеру.

Оскільки трубопровід виконано шляхом зварювання прямолінійних труб з використанням для зміни його напрямку кутових гинів, то коерцитивним діагностуванням було встановлено, що прямолінійні труби від насосів до першого кутового гину (опора С, поз. 0 – поз. 3,0 м) і після нього (поз. 3,5 – поз. 8,9 м) суттєво відрізнялись абсолютними значеннями коерцитивної сили. Суттєва різниця абсолютних значень коерцитивної сили металу труби на цій ділянці вказує на відмінності марок сталей використаних труб. Дана обставина викликає «стрибок» значень коерцитивної сили на графіках (рис. 5).

Окремо слід звернути увагу на розрахункові значення напружень, які виникли внаслідок вилучення ґрунту під трубою діаметром 108×4 мм трубопроводу I, які згідно даних на рис. 3, а у зоні поз. 8,9 м складають 2,34 МПа (1,35 % від $\sigma_{0,2}$), а у зоні опори (поз. 7,5 м) – 32,6 МПа (19 % від $\sigma_{0,2}$). За даними вимірів значень коерцитивної сили напруження у зоні поз. 8,9 м від вилучення ґрунту під підземною частиною трубопроводу I та повернення у вихідне положення шляхом піддомкрачування складають 27 % від умовної межі плинності металу, а відповідні напруження на опорі ОП11–1 (поз. 7,5 м) складають 22 % від умовної межі плинності металу.

Раніше проведеними експериментальними дослідженнями [7] було встановлено, що при пружному та пластичному деформуванні характер розподілу значень коерцитивної сили у двох взаємно перпендикулярних напрямках труби (епюри) має суттєві відмінності. Так при пружному деформуванні у навантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили орієнтовані перпендикулярно напрямку навантаження (рис. 6, а, б [7]). А після пластичного деформування у розвантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили орієнтовані у напрямку навантаження (рис. 6, в, г). Слід зазначити, що при переході від пружного до пластичного деформування при напруженнях, які перевищують умовну межу плинності, відбувається характерне різке підвищення

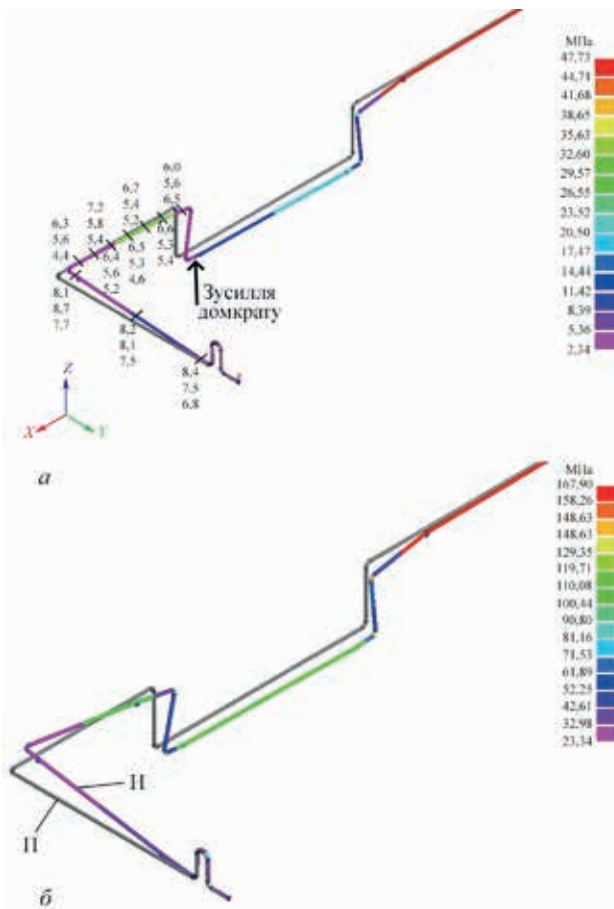


Рис. 3. Розрахункові еквівалентні напруження та значення коерцитивної сили (стовпчики значень H_c , виміряних датчиками D65, та D27 у повздовжньому та поперечному напрямках відповідно, в А/см): а – варіант 1; б – варіант 2. Положення трубопроводу: П – проектне; Н – під навантаженням

(«стрибок») приблизно у 2 рази максимальних значень коерцитивної сили та зміна їх напрямку на 90° .

На рис. 7, а приведені епюри коерцитивної сили в різних по довжині зонах наземної частини трубопроводу I (труба діаметром 108×4 мм) від насосної станції (поз. 0,0 м) до першого кутового гину (опора С, поз. 3,0 м) та в різних по довжині зонах від опори С (рис. 7, б, позиція 3,5 м) до переходу у підземну частину (поз. 8,9 м). Дані отримані при використанні датчика D27.

Відсутність суттєвих відмінностей значень коерцитивної сили у повздовжньому напрямку обстеженої ділянки трубопроводу I від насосної станції до переходу до підземної частини (особливо відсутність характерного «стрибка» при переході від пружного до пластичного деформування) вказує на відсутність ознак пластичного деформування. А не симетричність епюр у двох взаємно перпендикулярних напрямках трубопроводу I на ділянці від насосної станції до першого кутового гину, де розкид значень коерцитивної сили складає 13 %, та ділянці від опори С до переходу у підземну частину, де розкид значень коерцитивної сили складає 26 %, вказує на неоднорідність структури металу, пов'язану з пружним деформуванням труби. Відмінності абсолютних значень коерцитивної сили та їх розкид у напрямку трубопроводу (напрямку навантаження) ділянок від насосної станції до опори С та після



Рис. 4. Схеми ділянок та зони для вимірювання в перерізах I (а) та перерізах II (б) діаметрів труб у горизонтальній та вертикальних площинах

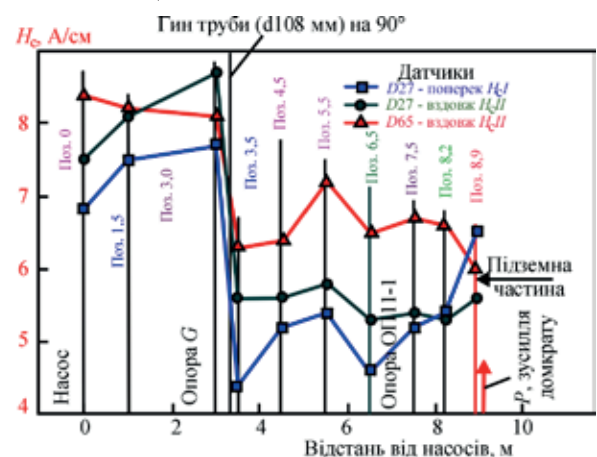


Рис. 5. Розподіл коерцитивної сили, виміряної датчиками D65 та D27 у повздовжньому (H_{\parallel}) та поперечному (H_{\perp}) напрямках на ділянці трубопроводу від насосної станції до переходу у підземну частину

ної з пружним деформуванням труби. Відмінності абсолютних значень коерцитивної сили та їх розкид у напрямку трубопроводу (напрямку навантаження) ділянок від насосної станції до опори С та після

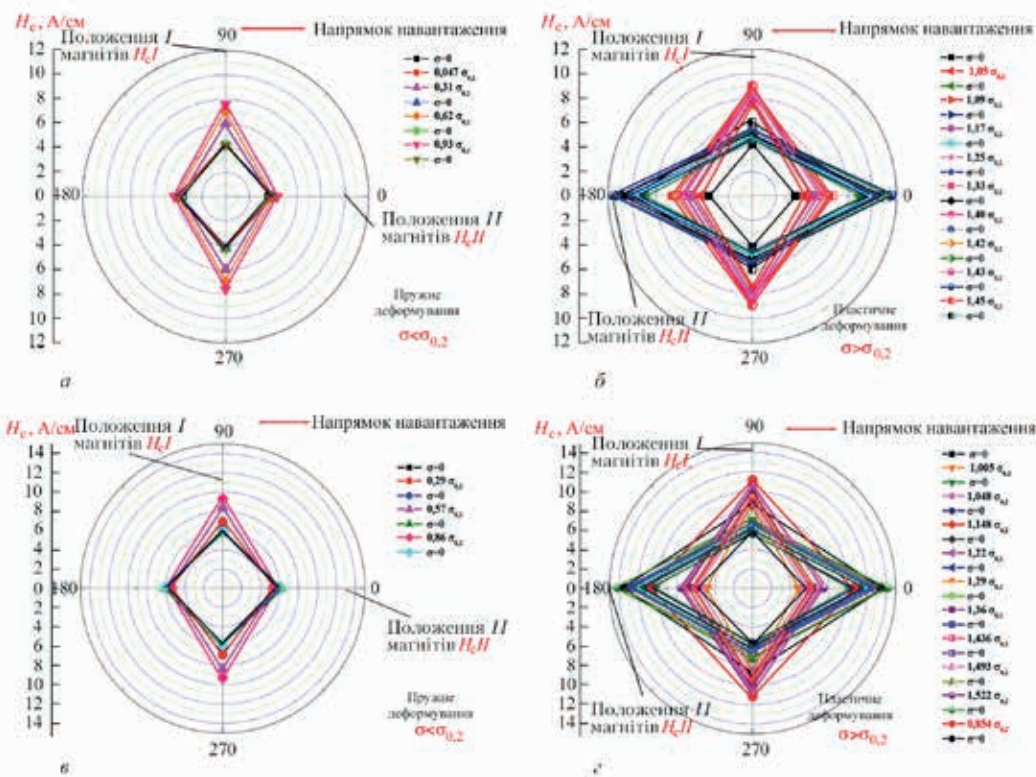


Рис. 6. Епюри коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка при ступінчатому пружному (а, б) та пластичному (в, з) деформуванні розтягом з розвантаженням на кожній ступені зразків із сталей Ст3 (а, в) та трубної сталі Х52 (б, з), де епюри H_c по поверхні зразка у двох взаємно-перпендикулярних напрямках при дії напружень (у навантаженому стані, $\sigma \neq 0$) – у червоних тонах, а у розвантаженому стані ($\sigma = 0$) – у темних тонах

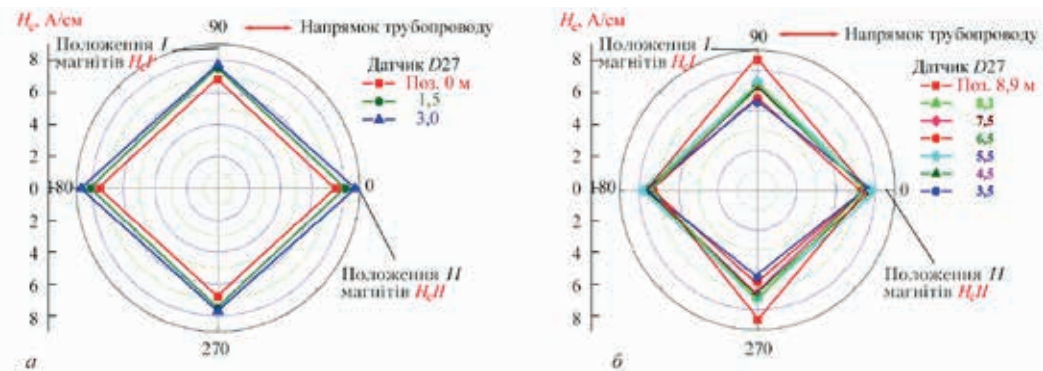


Рис. 7. Епюри коерцитивної сили в різних по довжині зонах наземної частини трубопроводу I від насосної станції до першого кутового гину (а) та в зонах від першого кутового гину до переходу у підземну частину (б)

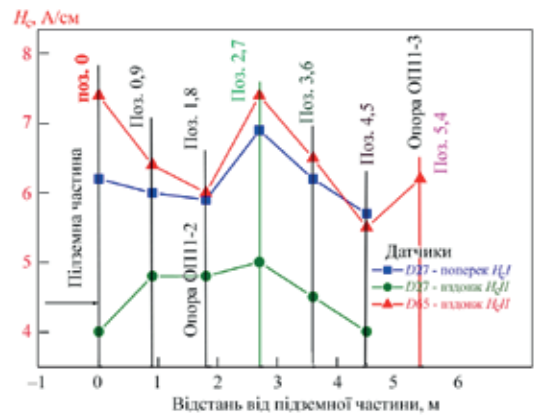


Рис. 8. Дані розподілу значень коерцитивної сили по довжині наземної частини трубопроводу II поміж опорами ОП11–2 та ОП11–3

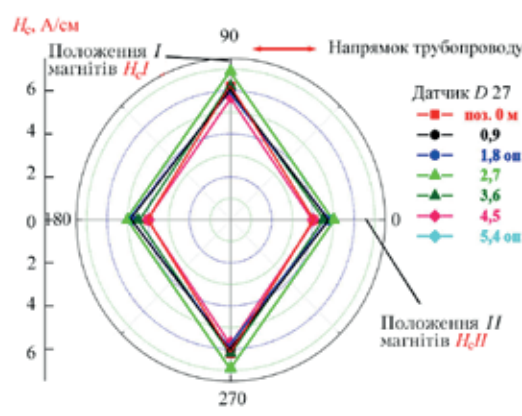


Рис. 9. Епюри коерцитивної сили в різних по довжині зонах наземної частини ділянки трубопроводу II від підземної частини до опори ОП11–3

неї пов'язані з використанням різних марок сталей, які мають свої особливості розподілу структурного стану металу по довжині трубопроводу.

На ділянці трубопроводу I від опори C до переходу у підземну частину зростання максимальних значень коерцитивної сили у напрямку, перпендикулярному повздовжньому напрямку труби, у зоні піддомкращування трубопроводу (рис. 7, б, позиція 8,9 м), вказує на наявність пружних напружень, які виникли при піддомкращуванні і складають приблизно 27 % від умовної межі плинності. Дана оцінка базується на даних рис. 6, б для трубної сталі X52, оскільки увесь діапазон змін значень коерцитивної сили від вихідного стану до моменту руйнування для феромагнітних вуглецевих сталей складає від 3,0 А/см (у вихідному стані) до 15 А/см (при руйнуванні). По мірі віддалення від місця дії прикладених зусиль від домкрату значення коерцитивної сили зменшуються (див. поз. 3,5 м, рис. 7, б).

В якості наступного об'єкта обстеження була обрана труба діаметром 219×6 мм наземної частини трубопроводу II, яка мала часткове відокремлення від опор після розкопки, але не підлягала примусовому поверненню у вихідне положення.

На рис. 8 приведені дані розподілу значень коерцитивної сили по довжині наземної частини трубопроводу II поміж опорами ОП11–2 та ОП11–3.

Зняття ґрунту із підземної частини до рівня її обпирання на ґрунт та можлива наявність залишкових монтажних напружень викликає складний характер розподілу значень коерцитивної сили по довжині трубопроводу. Слід зазначити на суттєві відмінності характеру розподілу значень коерцитивної сили по довжині трубопроводу I (діаметром 108×4 мм), де в основному $H_{cl} > H_{cl}$ та трубопроводу II (діаметром 218×6 мм), де $H_{cl} < H_{cl}$, які ймовірно пов'язані з жорсткістю труб різного діаметру, яка впливає на НДС.

На рис. 9 приведені епюри коерцитивної сили в різних по довжині зонах (позиції 0; 0,9; 1,8; 2,7; 3,6; 4,5 та 5,4 м) наземної частини ділянки трубопроводу II (труба діаметром 2196 мм) від підземної частини до опори ОП11–3. Дані отримані при використанні датчика D27.

Зростання максимальних значень коерцитивної сили в зоні наземної частини ділянки трубопроводу II (труба діаметром 219×6 мм, рис. 9) у напрямку, перпендикулярному повздовжньому напрямку труби, вказує на наявність пружних напружень, які складають приблизно 30 % від умовної межі плинності металу і приблизно відповідають аналогічним напруженням наземної частини трубопроводу I (труба діаметром 108×4 мм, рис. 7, б). Розкид значень коерцитивної сили на обстеженій ділянці трубопроводу II (діаметром 219×6 мм) у повздовжньому напрямку складає 25 %, який залежить від структурного стану

металу, вказує на неоднорідність структури металу в наслідок пружного деформування.

Висновки

Приведено приклад діагностування неруйнівними методами контролю технічного стану металу елементів трубопроводу нафтоосховища. Проведена оцінка навантаженості та пошкоджень обстежених ділянок трубопроводів, отриманих в результаті розкопки підземної частини трубопроводу нафтоосховища.

Встановлено, що рівень сумарних максимальних напружень металу труб найбільш навантажених (згідно розрахунків МСЕ) ділянок трубопроводів, отриманих спочатку при монтажу конструкції, а потім після розкопки та відновлення вихідного положення окремих елементів трубопроводу відносно опор складав менше 30 % від умовної межі плинності. Дана оцінка відповідає даним розрахунків НДС та узгоджується з результатами вимірювання овальності труб і відсутності локальних пластичних деформацій у найбільш навантажених зонах.

Таким чином, неруйнівними методами діагностування була підтверджена можливість подальшої експлуатації металу трубопроводів нафтоосховища після аварії, оскільки робочий тиск перекачуваного продукту не перевищує 0,3 МПа.

Сумісно з іншими експертами дана рекомендація провести діагностування зварних швів, особливо фланцевих з'єднань, де діяв максимальний згинаючий момент.

Коерцитиметричним діагностуванням встановлені відмінності використаних марок сталей окремих ділянок трубопроводів та дана оцінка їх структурного стану.

Представлені результати обстеження аварійної ділянки трубопроводів розширюють уявлення про можливість застосування неруйнівних методів контролю для оцінки накопичених пошкоджень в металах в умовах статичного та циклічного навантаження і можуть стати основою для розробки нових підходів до експресної оцінки залишкового ресурсу металу конструкцій простими неруйнівними методами.

Список літератури

1. Лепеш Г. В. (2015) Современные методы и средства диагностики оборудования инженерных систем зданий и сооружений. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 4(34), 3–8.
2. Лепеш Г. В. (2015) Диагностика и комплексное обслуживание инженерно-технических систем и оборудования зданий и сооружений. *Там же*, 5(35), 6–16.
3. (1978) ГОСТ 8732–78 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент.
4. ТУ 14–3–377 Трубы стальные сварные прямошовные для магистральных газо-нефтепроводов. Технические условия.
5. Комплекс программ АСТРА–МАГИСТР-2011. (версия 201010). Автоматизированный расчет магистральных трубопроводов на статическую и циклическую проч-

ность, на сейсмические воздействия, на вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм СНиП 2.05.06–85.

6. (1990) Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. АН УССР. ИЭС им. Е.О. Патона. Труфяков В.И. (ред.). Киев, Наукова думка.
7. Гопкало О.П., Безлюдько Г.Я., Котляренко А.А. та ін. (2020) Діагностування пошкодженості феромагнітних сталей при механічному навантаженні по результатам вимірювання коерцитивної сили. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 13–21.

References

1. Lepesh, G.V. (2015) Modern methods and means for diagnostics of equipment of engineering systems of buildings and facilities. *Tekhniko-Tekhnologicheskie Problemy Servisa*, 4(34), 3–8 [in Russian].
2. Lepesh, G.V. (2015) Diagnostics and comprehensive servicing of engineering technical systems and equipment of buildings and facilities. *Ibid.*, 5(35), 6–16 [in Russian].
3. GOST 8732-78: Seamless hot-deformed steel pipes. Range of sizes [in Russian].
4. TU 14-3-377: Steel pipes welded straight-seam for the main gas and oil pipelines. Specifications [in Russian].
5. Software package ASTRA-MAGISTR - 2011 (version 201010). Automated computation of the main pipelines for static and cyclic strength, seismic impact, vibration strength and unsteady dynamic processes in keeping with the requirements of SNiP 2.05.06-85 norms [in Russian].
6. (1990) Strength of welded joints under alternating loads. Ed. by V.I. Trufiyakov. PWI. Kiev, Naukova Dumka.
7. Gopkalo, O.P., Bezlyudko, G.Ya., Kotliarenko, A.A. et al. (2020) Diagnosis of damage to ferromagnetic steels during mechanical loading by results of measurements of coercive force. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 13-21 [in Ukrainian].

FROM THE EXPERIENCE OF USING NON-DESTRUCTIVE CONTROL METHODS TO ASSESS THE TECHNICAL CONDITION OF THE PIPELINE EMERGENCY SECTION

O.P. Gopkalo¹, P.S. Yukhymets², G.Ya. Bezlyudko³, R.M. Solomacha³, V.O. Nekhotiashchii¹

¹G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NAS of Ukraine. 2 Timiryazevska Str., 01014, Kyiv, Ukraine.

E-mail: ips@ipp.kiev.ua

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

³LLC «Special Scientific Developments». PO box 12036, 61184, Kharkiv, Ukraine

An example of diagnosing the technical condition of the emergency section of oil storage pipeline by non-destructive methods of control is given. Proceeding from the results of inspection of an emergency section of the pipeline (measurement of hardness, ovality of pipes and coercive force H_c) the characteristics of static strength of metal pipes were determined, and the relative load, structural condition of metal and level of damages were evaluated. Coercytimetric control showed that the level of total maximum stresses obtained first during the installation of the structure, and then after the accident and restoration of the initial position of the individual elements of the pipeline relative to the supports, was less than 30% of the conditional yield strength of metal. This estimate corresponds to the data of calculations of the stress-strain state (SSS) and is consistent with the results of measuring the ovality of the pipes and the absence of local plastic deformations in the most stressed areas. Coercimetric diagnostics revealed differences in the steel grades used in some sections of the pipeline. 7 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: stress, strain, load, damage, structuroscope, coercive force

Надійшла до редакції 05.08.2020

ХІХ МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2020

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

24 - 27
листопада



МЕТАЛ-ВІСЬОКА



УКРЗЖАРІВНЯННЯ



ГІДРАВЛІКА
ПНЕВМАТИКА



ОДЖИВНЕННИКИ



УКРТОП



УКРИНТВО



УКРРОМ
АВТОМАТИЗАЦІЯ



ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ
ЕТАПОНИ, ПРИКЛАДНИ



ПІВНОМО-ТРАНСПОРТНЕ
СКЛАДСЬКЕ ВСПИВДАННЯ



БЕЗПЕКА
ВИРОБНИЦТВА



ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

Генеральний
інформаційний партнер:



Ексклюзивний
медіа партнер:

ЖУРНАЛ
ГОЛОВНОГО
ІНЖЕНЕРА

Технічний
партнер:



IEC

Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr
www.tech-expo.com.ua

СИСТЕМИ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ПРИ ТЕХНІЧНОМУ ДІАГНОСТУВАННІ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ*

А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко

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

Наведені узагальнені результати застосування систем безперервного акустико-емісійного моніторингу після проведення модернізації обладнання та відповідного програмного забезпечення на високотемпературних елементах енергетичного обладнання, потенційно небезпечних об'єктах хімічної промисловості, що сприятиме їх надійній безаварійній експлуатації. Бібліогр. 14, рис. 14.

Ключові слова: АЕ технологія, системи АЕ моніторингу, барабан котла, аміакосховище типу ST

На протязі багатьох років у відділі «Технічної діагностики зварних конструкцій» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України проводяться дослідження з технічної діагностики і прогнозування залишкового ресурсу зварних з'єднань, матеріалів, покриттів і конструкцій у процесі їх експлуатації з використанням методу АЕ. Впровадження передових наукових досліджень стало можливим завдяки реалізації цільової програми наукових досліджень НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» («Ресурс-2»), що дозволило проводити адаптацію теоретичних розробок до реальних вимог діючого виробництва. При проведенні оцінки стану промислових об'єктів все ширше використовується метод акустичної емісії, а розроблені на його основі системи АЕ контролю та моніторингу успішно впроваджуються на відповідальних промислових об'єктах та, зокрема, на високотемпературних елементах енергетичного обладнання потенційно небезпечних об'єктів, що сприятиме їх надійній і безаварійній експлуатації [1].

Один з об'єктів проведення досліджень та впровадження АЕ технології оцінки технічного стану в процесі експлуатації – барабан котла ТГМ-96 (рис. 1) ТЕЦ-5 (сталь 16ГНМА, довжина 19245 мм, зовнішній діаметр 1800 мм, товщина 115 мм, робочий тиск 156 кг/см², температура 345 °С, рік виготовлення – 1972). Попередньо були вивчені матеріали щодо причин та наслідків пошкодженості барабанів котлів із сталі 16ГНМ, особливостей їх експлуатації [2] та шляхів удосконалення технології оцінки ресурсу зварних барабанів котлів із застосуванням акустичних і магнітних методів [3]. Аналіз наявних матеріалів показав, що застосування систем АЕ моніторингу

на даному об'єкті може значно підвищити безпеку його експлуатації [4].

Проведені дослідно-експериментальні роботи на об'єкті на різних етапах його експлуатації: під час підготовки до проведення планових ремонтних робіт, зупинці об'єкта та при введенні його в режим експлуатації: візуально-оптичний контроль з фіксацією місць корозії, механічних та інших пошкоджень, зміни форми (в місцях доступу), УЗК, вибіркові вимірювання товщини стінки та визначення твердості матеріалу барабану котла, дослідження залишкових механічних напружень. Проведено попередню оцінку стану матеріалу барабану котла розрахунковими методами та АЕ контроль. Це дозволило визначити закони розповсюдження ультразвукових хвиль у матеріалі конструкції, інформативні моди ультразвукових коливань, виміряти рівні акустичних перешкод та визначити їх частотний спектр. Зокрема було встановлено, що коефіцієнт загасання УЗХ на об'єкті складає 0,0275 Нп/м, що дозволяє розносити датчики АЕ для проведення контролю на відстань до 20 м. На підставі проведених досліджень вивчена можливість застосування АЕ технології на об'єкті контролю та місця встановлення датчиків АЕ із застосуванням хвилеводів (з урахуванням робочої температури експлуатації). Визначено, що оптимальна кількість приймальних перетворювачів – 12, відстань між ними – 6 м (рис. 2).

Підготовлено обладнання ЕМА-3 для проведення АЕ моніторингу барабану котла (рис. 3). Характер надходження АЕ інформації з об'єкту з використанням трьох локаційних антен показано на рис. 4.

За результатами проведеного АЕ моніторингу барабану котла визначені зони підвищеної АЕ

* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016-2020 рр.

Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>,

Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>

© А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, 2020



Рис. 1. Об'єкт АЕ моніторингу

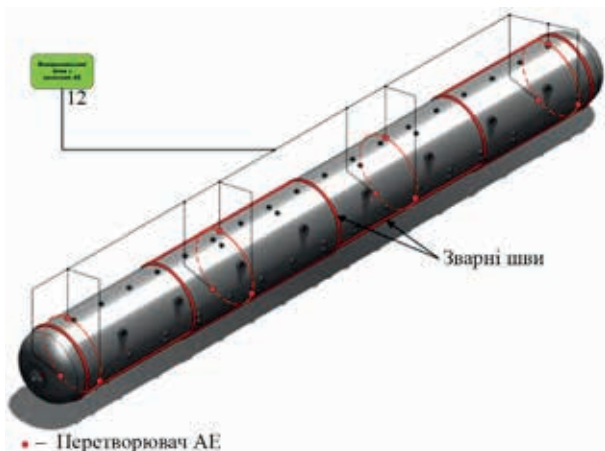


Рис. 2. Схема розміщення датчиків АЕ на об'єкті

активності (рис. 5) для подальшого їх контролю іншими неруйнівними методами. Це значно зменшує обсяг необхідних ремонтних робіт та скорочує термін їх виконання.

Аналіз отриманих результатів АЕ вимірів показав, що можлива подальша експлуатація барабана котла при дотримуванні правил і вимог чинних нормативних документів при умові постійного стеження за технічним станом барабана котла.

Для проведення оцінки технічного стану потенційно небезпечних промислових об'єктів на підприємствах України на протязі останніх років активно використовуються системи ЕМА-3 [5–7], розроблені спільно з угорськими фахівцями. Такі системи встановлені, зокрема, на обладнанні цехів виробництва та перевантаження аміаку ОПЗ, мостових переходах трубопроводів через р. Дніпро ДП «Укрхімтрансаміак», паропроводах ГПП ТЕЦ-6 та барабані котла ТГМ-96 енергоблоку № 1 ТЕЦ-5 (м. Київ).

Проте системи ЕМА-3 працюють вже понад 15 років. За цей час відбувся суттєвий прогрес у розвитку елементної бази, застосуванні цифрових методів обробки інформації. На підставі досвіду проведених дослідно-експериментальних робіт на промислових об'єктах, що працюють в умовах високих температур і шумів, а також аналізу технічного стану та відповідності сучасним вимогам



Рис. 3. Перевірка системи АЕ моніторингу

діючих систем АЕ контролю і моніторингу було прийнято рішення щодо необхідності модернізації обладнання і програмного забезпечення (ПЗ) систем, а також обладнання та методик для його налаштування.

Система АЕ контролю та моніторингу ЕМА-4 є удосконаленим варіантом системи ЕМА-3, що дозволяє здійснити перехід на сучасні системи АЕ контролю та моніторингу з використанням вже встановлених та об'єктах датчиків АЕ, з'єднувальних кабелів, ліній зв'язку, модернізувати ПЗ або використовувати раніше встановлене, що дозволить значно скоротити час на запуск системи на виробництві.

Системи ЕМА-4 використовують найостанніші досягнення в галузі електроніки та обчислювальної техніки. Прилади мають менші розміри і масу, підтримують новітні сучасні інтерфейси передачі даних і характеризуються підвищеною надійністю за рахунок відсутності рухомих компонентів. Збільшилася гнучкість систем, створюваних на основі поєднання кількох приладів. Раніше число вимірювальних модулів, що спільно працюють, складала не більше двох, з максимальним загальним числом каналів не більше 64. Два основних типи приладів, що мають відповідно 4 та 16 каналів АЕ (рис. 6), можуть бути з'єднані у будь-якій послідовності, а загальне число одночасно оброблюваних каналів АЕ збільшено до 128, аналогічно збільшено число НЧ каналів, що передають технологічну інформацію.

Реєструються такі параметри АЕ: енергія сигналу; час затримки між імпульсами, прийнятими різними каналами локаційної антени; середня частота сигналу в імпульсі; порогове значення (при плаваючому пороговому рівні); похибка реєстрації часових параметрів АЕ – 0,125 мкс; похибка реєстрації амплітудних параметрів АЕ – 0,5 дБ. Максимальна швидкість обробки імпульсів одного каналу з записом в довгострокову пам'ять – 1000 ім/с. Інтер-

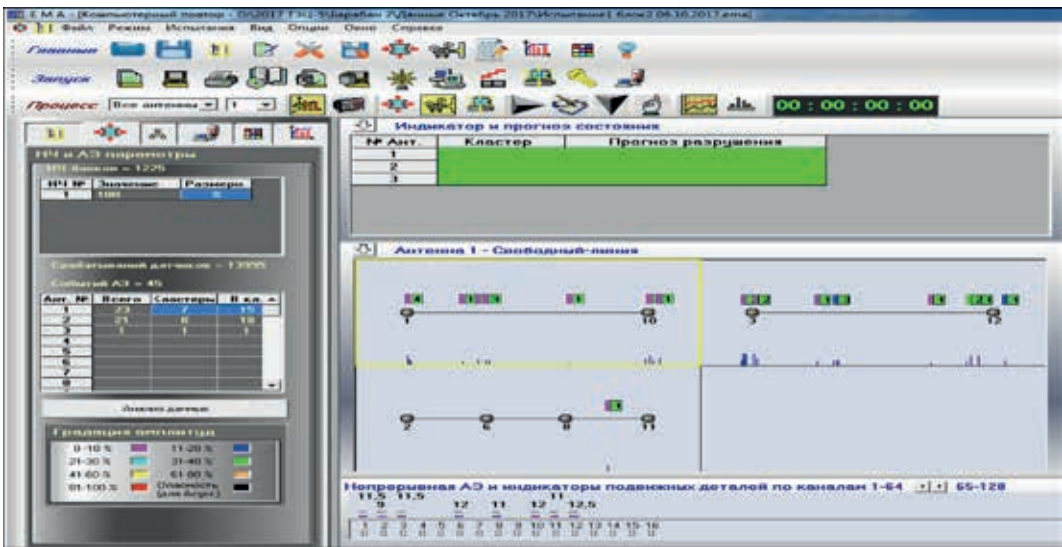


Рис. 4. Основной экран программы EMA при проведении АЕ мониторингу барабана котла

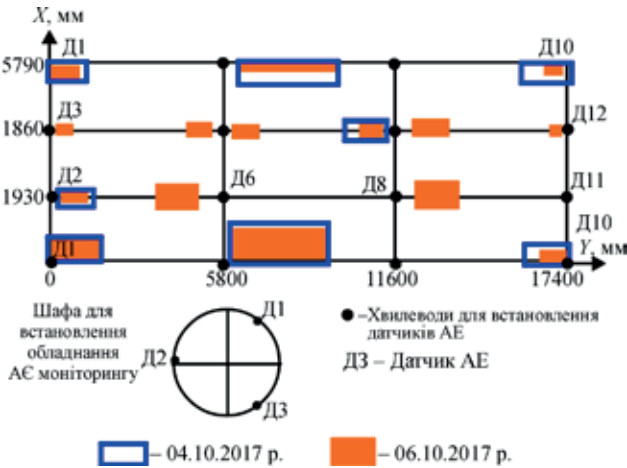


Рис. 5. Зареєстровані зони підвищеної АЕ активності під час проведення АЕ контролю барабана котла бл. № 2 ТЕЦ-5

фейс: стандартний інтерфейс зв'язку з комп'ютером – Ethernet; опціональні інтерфейси зв'язку з комп'ютером – USB, WIFI, GSM.

Для взаємодії з новим удосконаленим обладнанням було доопрацьовано ПЗ систем ЕМА-3.9 [8]. Для цього реалізований програмний інтерфейс для підключення до мережі з приладами, отримання від них діагностичної інформації і відправки ке-



Рис. 6. Прилади ЕМА-4 (4-х та 16-ти каналні)

руючих команд. Інтерфейс також був перероблений для забезпечення можливості відображати дані, що надходять від кожного АЕ і НЧ каналу, виконувати їх вибір в алгоритмах первинної або додаткової обробки, налаштовувати і конфігурувати спільну роботу каналів у складі складних локаційних антен.

При проведенні модернізації ПЗ передбачена можливість роботи з приладами ЕМА-3 та ЕМА-4 (рис. 7), що значно спростить перехід на нове обладнання і забезпечить можливість обробляти файли з раніше отриманими даними на новому рівні.

Серед нових можливостей ПЗ слід відмітити наявність багатопараметричної кластеризації, детальний аналіз даних АЕ подій та відповідних спрацьовувань датчиків, вибір і порівняння даних по окремих каналах АЕ у вигляді розподілу параметрів,

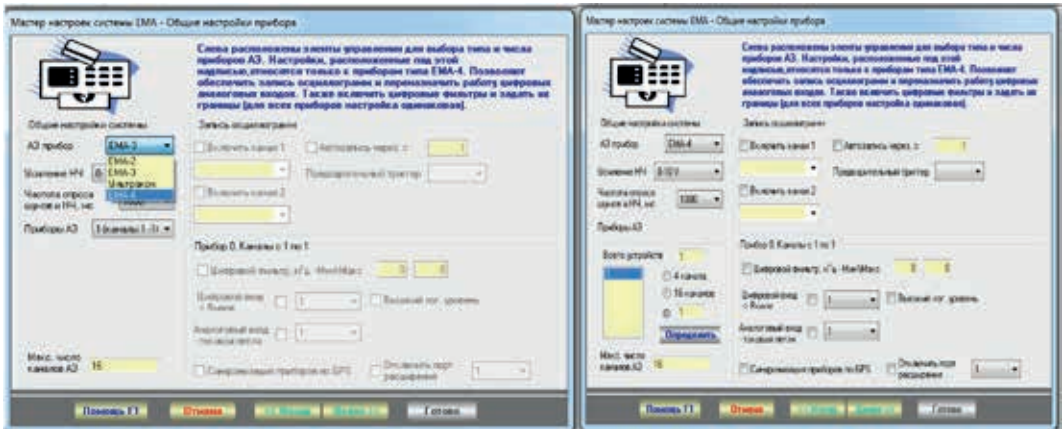


Рис. 7. Вибір приладу АЕ для роботи та налаштування приладу ЕМА-4



Рис. 8. Макет обладнання для проведення налаштування АЕ систем



Рис. 9. Аміакосховище ST



Рис. 10. Прилади для АЕ моніторингу та блоки безперервного живлення системи

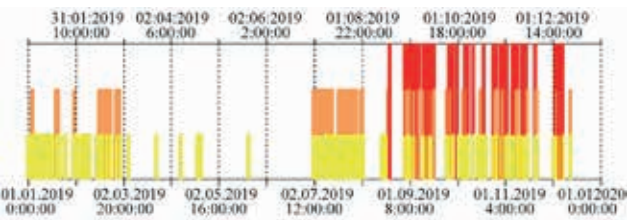


Рис. 11. Видача попереджень про небезпеку для аміакосховища

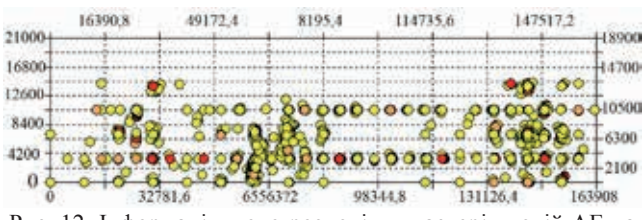


Рис. 12. Інформація щодо розподілу кластерів подій АЕ на бічній поверхні аміакосховища

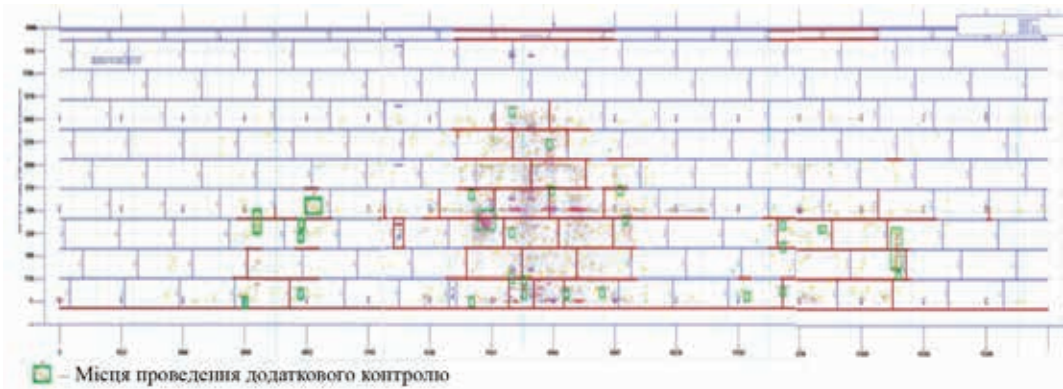


Рис. 13. Зареєстровані під час проведення АЕ моніторингу зони для проведення ДК



Рис. 14. Результати проведення ДК в зонах підвищеної АЕ активності (вибірково)

зберігання даних у вигляді таблиць Excel, кореляцію заданого числа даних неперервної АЕ для вибраного каналу з іншими каналами, статистику небезпек за обраний тривалий період. Доопрацьовано алгоритм та інтерфейс програми для довготривалої оцінки стану об'єктів моніторингу за даними зроблених системою попереджень про небезпеку.

Таким чином, удосконалене обладнання для проведення АЕ контролю і моніторингу промислових об'єктів та оновлене ПЗ дозволяють більш якісно проводити оцінку технічного стану небезпечних об'єктів, що працюють в умовах підвищених температур і шумового фону.

Згідно з нормативними документами всі законодавчо регульовані засоби вимірювальної техніки повинні проходити періодичну перевірку. Ця перевірка проводилась згідно з методикою, затвердженою ДП «Укрметртестстандарт» [9]. Проте наявна кількість систем ЕМА-3 і перехід на системи ЕМА-4 вимагає модернізації обладнання для підготовки до проведення метрологічної перевірки обладнання. У зв'язку з цим були розроблені нові схеми перевірок, що відповідають новим приладам, а також враховують аналогічний досвід в Європі, що представлено у відповідній нормативній документації [10–13].

Розроблені методика та обладнання для проведення перевірки та налаштування АЕ приладів (рис. 8).

Модернізоване обладнання та оновлене ПЗ системи безперервного АЕ моніторингу об'єкту встановлено на аміакосховищі ST (рис. 9) після демонтажу системи ЕМА-3, встановленої у 2002 р. Обладнання (рис. 10) запущено у режим

дослідної експлуатації для відпрацювання оптимальних режимів його роботи.

Характеристика об'єкту АЕ моніторингу (резервуару ST) – циліндровий зварний резервуар з кришкою, що має такі параметри: об'єм 34000 м³; робоче середовище: рідкий аміак NH₃; робоча температура: –34 °С; діаметр 52 м; висота 21 м; марка матеріалу – ASTM-A537.S1; A537.A; поверхня контролю 3,5 тис. м². Дата введення в експлуатацію 7 березня 1978 р. Виробник ADTEK (США).

Системи АЕ моніторингу мають два рівні ПЗ. Перший рівень ПЗ реалізовано безпосередньо у приладах і відповідає за прийом та попередню обробку інформації, що надходить від об'єкту АЕ контролю. В ПЗ другого рівня внесені зміни, пов'язані з удосконаленням обладнання для проведення АЕ моніторингу об'єктів. Проводиться набір статистики та вивчення отриманої інформації для подальшого встановлення критеріїв безпеки вибраних об'єктів.

Проаналізуємо дані, отримані з використанням модернізованого обладнання та ПЗ з аміакосховища за 2019 р. (рис. 11, 12). Відмітимо, що дана програма знаходиться у режимі попереднього тестування.

Після проведення додаткової обробки даних АЕ за вказаний період були визначені місця для проведення додаткового контролю неруйнівними методами на об'єкті АЕ моніторингу – аміакосховищі ST під час проведення планових ремонтних та профілактичних робіт (рис. 13).

Отримані результати проведеного додаткового контролю (рис. 14) показали, що в місцях ви-

дачі системою АЕ моніторингу попереджень про небезпеку різних рівнів відповідно до вимог нормативних документів знайдені дефектні зони, що потребують проведення додаткових робіт або спостереження за їх подальшим розвитком [14].

Проведення додаткового контролю неруйнівними методами у визначених системою безперервного АЕ моніторингу ЕМА-4 місцях показало наявність дефектних зон. Проведені необхідні роботи з їх усунення.

Результати проведених досліджень можуть бути використані як на аналогічних об'єктах ОПЗ, так і на об'єктах енергетичних компаній, елементах технологічного обладнання підприємств хімічної, нафтохімічної та нафтопереробної промисловості для забезпечення безперебійної та безпечної експлуатації об'єктів контролю, виявлення на ранніх стадіях дефектів, що розвиваються у матеріалі об'єктів, визначення гранично припустимих навантажень (внутрішній тиск), а також для запобігання аварійним ситуаціям.

Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2019) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: монография. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.).* Киев, Индпром.
2. Гринь Е.А. (2009) *Повреждаемость барабанов котлов из стали 16ГНМ. Монография.* Москва, Технический комитет по надежной и безопасной работе ТЭС.
3. Абабков Н.В. (2011) Совершенствование технологии оценки ресурса сварных барабанов котлов с применением акустических и магнитных методов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10. Барнаул.
4. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А., Овсienko М.А. (2019) Современные технологии диагностирования оборудования в теплоэнергетическом комплексе. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 40–44.
5. Недосека А.Я. и др. (2016) Испытание сосудов давления международной группой специалистов. *Там же*, **3**, 3–10.
6. Недосека А. Я. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЕ диагностики ЕМА-3.9. *Там же*, **3**, 16–22.
7. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2005) Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор). *Там же*, **3**, 20–26.
8. (2016) Инструкция пользователя. Программное обеспечение ЕМА-3.91. Киев, ТК-78 «ТДНК»/ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.
9. (2004) МПУ 002/10-22-2004. Метрология. АЭ диагностический комплекс ЕМА (электронная часть). Методика поверки. Київ, Укрметрестандарт.
10. ДСТУ EN 13477-1:2016 (EN 13477-1:2001, IDT) Неруйнівний контроль. Акустична емісія. 7. Характеристика устаткування. Частина 1. Технічні характеристики устаткування.
11. ДСТУ EN 13477-2:2016 Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Характеристика устаткування. Частина 2. Експлуатаційні показники (EN 13477-2:2010, IDT).

12. (2012) СОУ 50.10-2012 Настанови щодо проектування та впровадження систем акустико-емісійного контролю, діагностування та моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки. Київ, ТК-78 «ТДНК».
13. Недосека А.Я. и др. (2019) Технология оценки достоверности регистрации акустико-эмиссионной информации при диагностировании конструкций и сооружений. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 5–10.
14. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А., Овсienko М.А. (2019) Впровадження АЕ систем ЕМА четвертого покоління на об'єктах хімічного виробництва (за результатами виконання проекту Р2.6). Неруйнівний контроль та технічна діагностика: 9-а Національна науково-технічна конференція і виставка–2019, Київ, Україна, 19–21 листопада 2019 р.

References

1. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2019) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures: Monography. Ed. by B.E. Paton. 5th Ed. Kyiv, Indprom* [in Russian].
2. Grin, E.A. (2009) *Damageability of boiler drums from 16GNM steel: Monography.* Moscow, Technical Committee on reliable and safe operation of thermal-power station [in Russian].
3. Ababkov, N.V. (2011) Improvement of the technology of evaluation of residual life of welded boiler drums with application of acoustic and magnetic methods. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree.* 05.02.10. Barnaul [in Russian].
4. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2019) Modern technologies for equipment diagnosis in thermal power complex. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 40–44 [in Russian].
5. Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Testing of pressure vessels by an international expert team. *Ibid.*, **3**, 3–10 [in Russian].
6. Nedoseka, A.Ya. (2013) Software of AE diagnostic systems ЕМА-3.9. *Ibid.*, **3**, 16–22 [in Russian].
7. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2005) Diagnostic systems of ЕМА family. Main principles and architectural features (Review). *Ibid.*, **3**, 20–26 [in Russian].
8. (2016) *User Manual.* Software ЕМА-3.91. Kyiv, ТК-78 «ТДНК»/ PWI [in Russian].
9. (2004) МПУ 002/10-22-2004. *Metrology. AE diagnostic complex ЕМА (electronic part). Verification procedure.* Kyiv, Ukrmetrteststandart [in Ukrainian].
10. DSTU EN 13477-1: 2016 (EN 13477-1:2001, IDT) Non-destructive testing. *Acoustic emission. Equipment characterization.* Pt 1: Equipment description [in Ukrainian].
11. DSTU EN 13477-2:2016 (EN 13477-2:2010, IDT) Non-destructive testing. *Acoustic emission. Equipment characterization.* Pt 2: Verification of operating characteristics [in Ukrainian].
12. (2012) SOU 50.10-2012 *Guidelines for design and introduction of systems for acoustic emission control, diagnostics and monitoring of high-risk facilities.* Kyiv, ТК-78 «ТДНК» [in Ukrainian].
13. Nedoseka, A.Ya. et al. (2019) Technology of evaluation of the validity of recording acoustic emission information in diagnostics of structures and constructions. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 5–10 [in Russian].
14. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2019) Introduction of AE systems of the fourth generation in chemical production facilities (by the results of fulfillment of Project P2.6). In: 9th National Sci.-Techn. Conf. and Exposition – 2019 (Kyiv, Ukraine, 19-21 November, 2019) [in Ukrainian].

SYSTEMS OF ACOUSTIC EMISSION MONITORING AT TECHNICAL DIAGNOSTICS OF INDUSTRIAL FACILITIES

A.Ya. Nedoseka, S.A. Nedoseka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper present generalized results of application of continuous acoustic-emission monitoring systems after upgrading the equipment and respective software in high-temperature components of power generating equipment, and potentially hazardous facilities of chemical industry that will promote their reliable accident-free operation. 14 Ref., 14 Fig.

Keywords: AE technology, AE monitoring systems, boiler drum, ammonia storage of ST type

Надійшла до редакції 04.08.2020

СКАНУЮЧІ РЕНТГЕНІВСЬКІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МІНІАТЮРНИХ ТВЕРДОТІЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ*

В.О. Троїцький, М.М. Карманов, С.Р. Михайлов, В.О. Шаласєв, Р.О. Пастовенський

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

В даний час в світовій практиці замість плівкової радіографії отримали розвиток цифрові методи неруйнівного контролю з використанням повноформатних напівпровідникових рентгенівських плоскопанельних детекторів. Ці перетворювачі не можуть знайти в Україні широкого практичного застосування через велику вартість. Нами запропоновано рентгеноелектронні системи на основі відносно недорогих мініатюрних твердотілих перетворювачів. Збільшення зони контролю досягається електромеханічним скануванням з наступним програмним зшиванням отриманих окремих малоформатних цифрових рентгенівських зображень. Бібліогр. 8, рис. 13.

Ключові слова: рентгеноелектронний контроль, цифрові системи, сканер, рентгенівський детектор, мікроконтролер, цифрове зшивання зображень

В медицині, промисловості та на митниці вже сьогодні широко застосовують радіоскопію без проміжних носіїв інформації (радіографічні плівки, запам'ятовуючі пластини) за рахунок складних технологій отримання цифрових зображень [1]. Сучасні плоскопанельні рентгенівські детектори дозволяють отримати повноформатні (сумірні з розмірами рентгенівської плівки 30×40 см) рентгенівські зображення безпосередньо при просвічуванні контрольованого виробу. Основним недоліком таких повноформатних панелей є висока вартість (десятки тисяч доларів США), відносно низька роздільна здатність (близько 100 мкм), що в декілька разів поступається кращим рентгенівським плівкам [2].

В даний час серійно випускаються відносно недорогі малоформатні твердотілих детектори, які використовуються в неруйнівному контролі [3–5]: DR 7 NDT фірми DÜRR NDT, S10811-11 японської фірми Hamamatsu Photonics (рис. 1), The Remote RadEye HR x-ray detector канадської фірми Teledyne Dalsa. Роздільна здатність таких детекторів – 20 мкм. Основний їх недолік – малий розмір робочого поля (30...40 мм). В багатьох випадках цього недостатньо, щоб замінити ними традиційну рентгенівську плівку.

Одним з нових запропонованих нами напрямків цифрової радіографії є створення радіоскопічних перетворювачів (сканерів) з використанням сенсорів на основі недорогих високочутливих мініатюрних твердотілих детекторів, які застосовуються в медицині (стоматології) [1]. Для контролю протяжних зварних швів, які перевищують розміри робочого поля детектора (см. рис. 1), пропонується використовувати принцип сканування зони, що контролюється. Для цього виконується

ся покрокове переміщення рентгенівського детектора, при цьому крок переміщення відповідає його ширині робочого поля. Отримані при скануванні суміжні фрагменти цифрових рентгенівських зображень зварного шва запам'ятовуються в комп'ютері та програмно зшиваються в єдине повноформатне цифрове зображення.

На цьому принципі було створено макет рентгеноелектронної системи (РТВС) з однією лінійною направляючою (рис. 2). В якості електропривода використовується кроковий двигун.

Управління кроковим двигуном відбувається за допомогою мікроконтролера Arduino Uno, який підключено до комп'ютера через кабель USB. Для систем управління електромеханічними приводами передбачено плату розширення CNC Shield v3.0, яка працює з драйверами двигунів A4988 або



Рис. 1. Зовнішній вигляд детектора S10811-11 японської фірми Hamamatsu Photonics з розміром робочого поля 34×24 мм

* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016-2020 рр.



Рис. 2. Макет РТВС: сканер (а), каретка в зборі (б): 1 – корпус каретки, 2 – гвинт приводу, 3 – гайка приводу, 4 – лінійна направляюча, 5 – лінійний підшипник

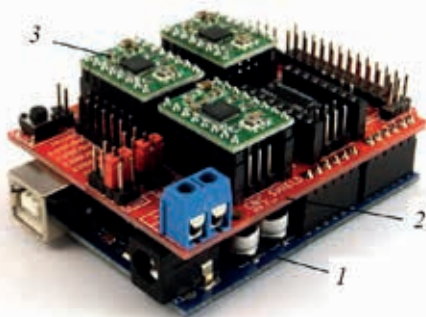


Рис. 3. Контролер управління кроковим двигуном 1 – Arduino Uno; 2 – CNC Shield v3.0, 3 – A4988

DRV8825 [6]. Зручна їх конструкція дозволяє зібрати контролер управління приводом без пайки та додаткових дротів (рис. 3).

Управління детектором S10811-11 здійснюється від комп'ютера через порт USB 2.0 за допомогою модуля обробки сигналів C9266-04, який перетворює аналоговий сигнал детектора в цифровий (АЦП – 12 біт), формує сигнали управління детектором (вмикання/вимикання), визначає формат цифрового зображення (8 або 12 біт), експозицію та виконує ряд налаштувань детектора.

В запропонованій одновісній кінематиці РТВС внаслідок неспіввісності гвинтової передачі та лінійної направляючої при переміщенні каретки сенсора виникали її вібрації. Це призводило до

зниження точності позиціонування каретки та погіршення якості зображень.

Для виключення вібрацій при переміщенні сенсора та усунення люфту електропривода було спроектовано та виготовлено сканер на основі двох направляючих з використанням подвійної безлюфтової гайки з пружиною (рис. 4). В цьому випадку отримуємо точність сканування, порівняну з роздільною здатністю сенсора.

В наступній конструкції РТВС для зменшення габаритів сканера та спрощення його конструкції замість гвинтового приводу та лінійних направляючих застосовано рейкову направляючу (рис. 5, 6) з ременною (зубчатою) передачею [6].

На рис. 7. наведені окремі фрагменти рентгенівського зображення зварного з'єднання (а), повноформатне рентгенівське зображення (б), отримане при цифровому зшиванні окремих фрагментів. Висока роздільна здатність використовуваного плоскочастинного детектора дозволила виконувати значне цифрове збільшення (зум) зображення без погіршення його якості (в).

Для покращення якості цифрового зшивання зображення передбачене програмне доведення зображень до одного контрасту. Для усунення візуалізації границь зшивання зображень передбачені опції вирівнювання фону та розмивання зображень в зоні зшивання.

Для бездротової передачі даних пропонується об'єднати комп'ютери в мережу через Wi-Fi (рис. 8).



Рис. 4. Нова РТВС з двома направляючими привода переміщення рентгенотелевізійного детектора (а), подвійна гайка з пружиною (б) безлюфтового приводу



Рис. 5. Каретка з лінійною рейковою направляючою



Рис. 6. Рентгенотелевізійний сканер з лінійною рейковою направляючою

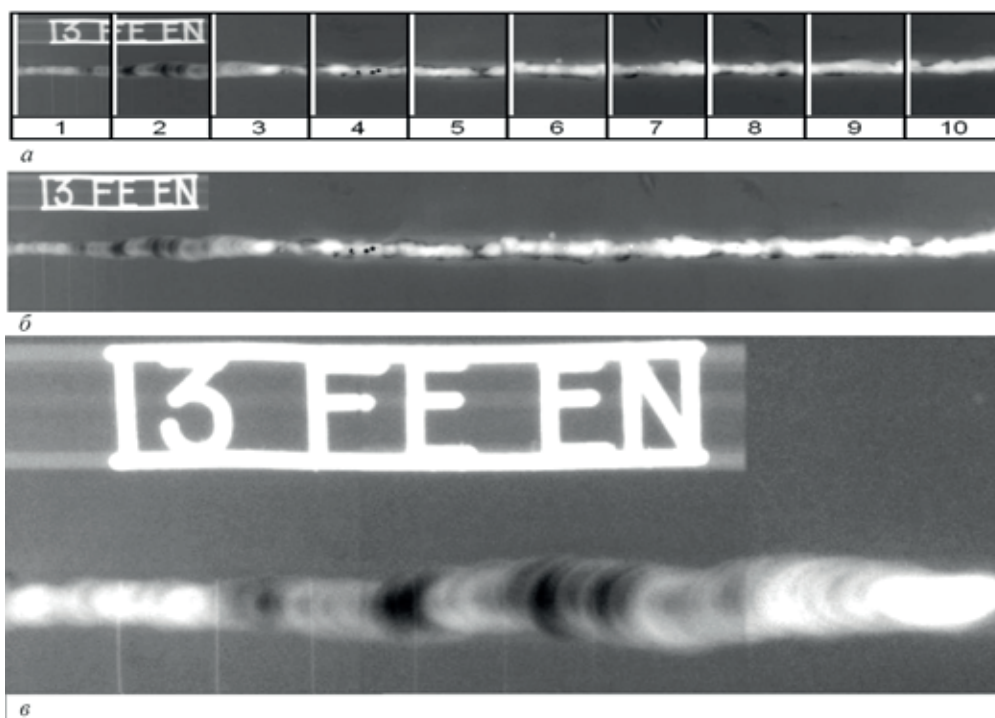


Рис. 7. Рентгенівські зображення, отримані при скануванні зварного з'єднання контрольованого об'єкта: *а* – вихідні фрагменти рентгенівських зображень (24×34 мм); *б* – результати зшивання фрагментів зображень (повноформатне рентгенівське зображення, отримане з окремих фрагментів); *в* – збільшена ділянка цифрового рентгенотелевізійного зображення зварного з'єднання

Один комп'ютер використовується для безпосереднього управління рентгенотелевізійним сканером, через другий комп'ютер оператор локальної бездротової мережі здійснює доступ до першого комп'ютера та дистанційно керує ним.

Було розроблено програмне забезпечення, яке розширює функціональні можливості переносних бездротових РТВС та дозволяє оператору отримувати цифрові рентгенівські зображення, коли він знаходиться на безпечній відстані від контрольованого об'єкта. Це суттєво полегшує роботу дефектоскопіста в процесі пошуку та аналізу дефектів. Програмне забезпечення дозволяє також контролювати рівень бездротового сигналу в мережі та рівень заряду акумуляторної батареї у випадку автономного електроживлення (наприклад, при проведенні контролю в польових умовах). Передбачено також вимірювання рівня рентгенівського випромінювання з автоматичним вимиканням рентгенівської установки у випадку необхідності (рис. 9).

Для організації такої конфігурації системи з дистанційним бездротовим управлінням достатньо замінити стаціонарний комп'ютер на мікрокомп'ютер. Для цих цілей було обрано Raspberry

Pi 3 Model B+ – один з найбільш відомих недорогих та популярних мікрокомп'ютерів [7]. Було проведено дослідження можливості мікрокомп'ютерного управління кроковими двигунами та двигунами постійного струму з використанням драйвера L298, що підключається до Raspberry Pi через інтерфейс GPIO. Було виявлено деякі проблеми при роботі з Windows on ARM, яка не підтримує стандартні драйвери x86. В нашому випадку неможливо до нього підключити рентгенівський детектор. В якості альтернативного варіанта розглянута можливість переходу на мікрокомп'ютер Beelink BT3-X Mini Apollo з вбудованим Windows 10 [8].

Для рентгенівського контролю якості відносно великих конструкцій виконувалось комбіноване просвічування: з використанням великоформатних рентгенотелевізійних камер розробки ІЄЗ ім. Є.О. Патона НАНУ: РТВ-4 (робоче поле 110×80 мм), РТВ-3 (160×120 мм), РТВ (360×270 мм) (рис. 10) [4]. Зазначені підозрілі ділянки додатково просвічувались за допомогою мініатюрного детектора.

Ця технологія рентгенівського контролю якості зварних з'єднань



Рис. 8. Локальна комп'ютерна мережа рентгенотелевізійної системи

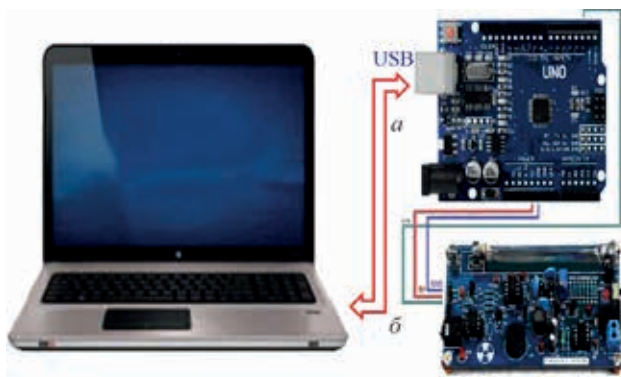


Рис. 9. Мікроконтролерний дозиметр: *а* – мікроконтролер Arduino Uno; *б* – лічильник Гейгера

поліетиленових труб діаметром 110×11 мм. Зварний шов мав ширину 11 мм та висоту 3...3,3 мм (рис. 11). Анодна напруга 30 кВ, струм 10 мА, фокусна відстань 840 мм, час накопичення 10 с.

Для робіт, що виконуються на авіаційному заводі з диверсифікації постачальників напівфабрикатів з алюмінієвих сплавів, які застосовуються при виробництві вузлів з легкосплавних матеріалів, було розроблено технології вхідного контролю труб малого діаметра (рис. 12) діаметром 18×1,3 мм; 36×1,4; 48×1,4.

Рентгенотелевізійна цифрова технологія використовувалась також для контролю кілець з матеріалу СГП-0,5 для торцевих ущільнювачів насосного обладнання атомних електростанцій (рис. 13).

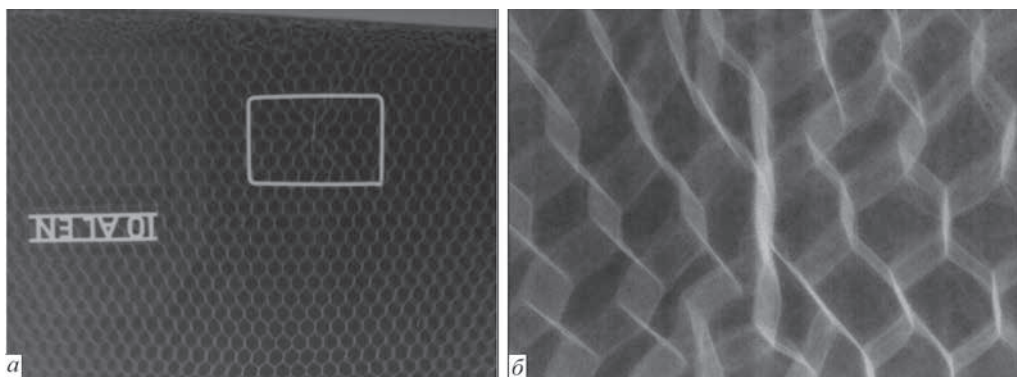


Рис. 10. Цифрове зображення фрагмента сотової конструкції закрilка літака (*а*) з локалізацією дефектної ділянки за допомогою детектора S10811-11 (*б*) (збільшене зображення)

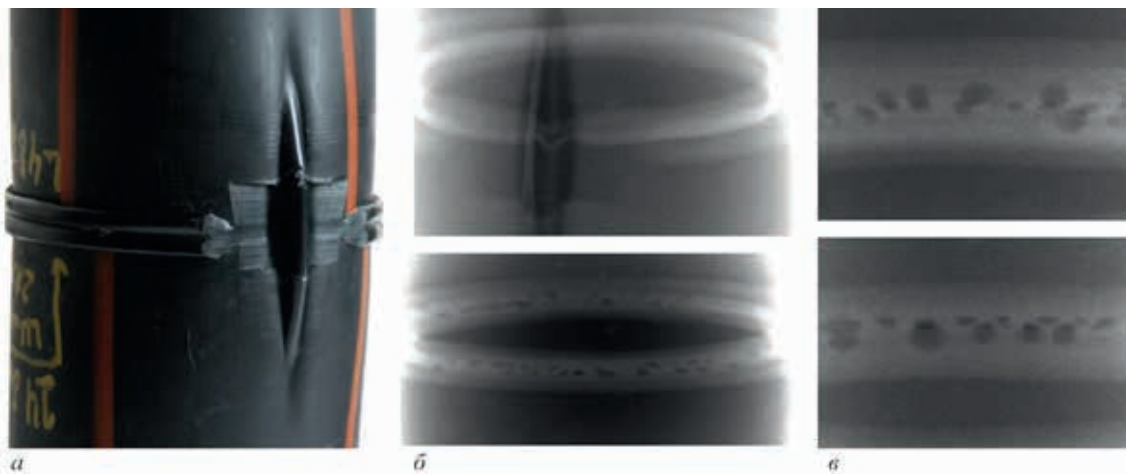


Рис. 11. Результати контролю зразків поліетиленової труби (*а*) з використанням повноформатної камери РТВ-4 (*б*) та мініатюрного детектора (*в*)

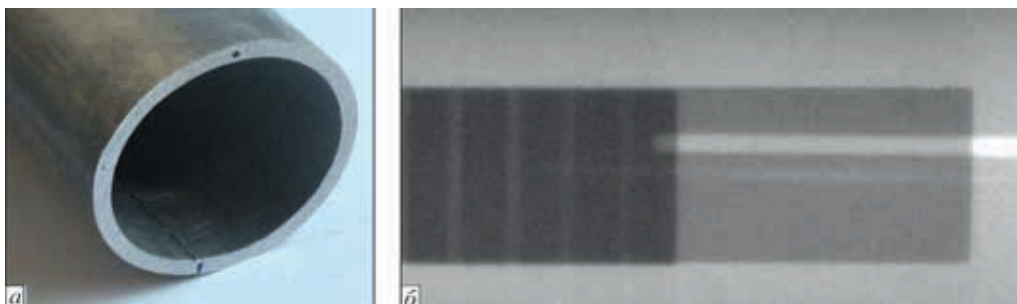


Рис. 12. Штучні дефекти на торці труби діаметром 48 мм: отвори діаметром 1 мм, штучна подряпина глибиною 0,1...0,2 мм (*а*), рентгенограма даної ділянки труби (*б*), чутливість 0,1 мм (мінімальна канавка еталона відповідає значенню 0,1 мм)

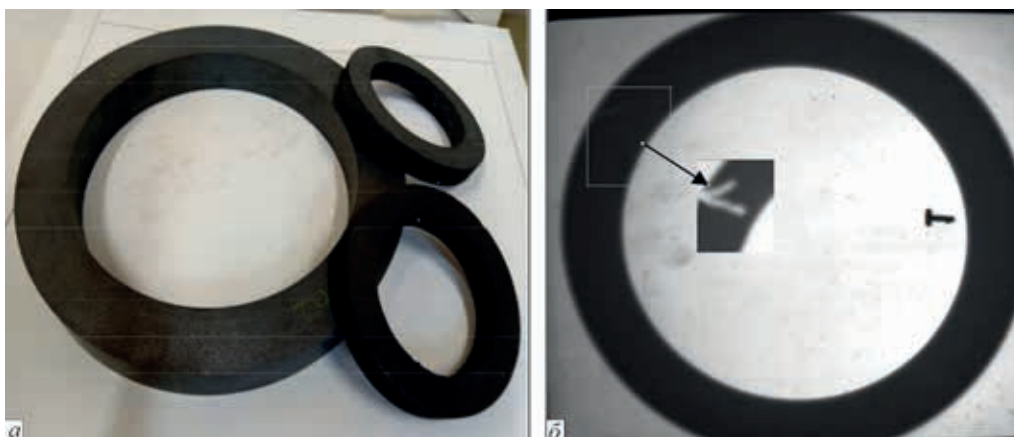


Рис. 13. Зовнішній вигляд кілець для торцевих ущільнювачів (а), цифрова рентгенограма кільця, на якій показано контрастна дефектна ділянка кільця

Висновки

1. Вперше в світовій практиці рентгенівського контролю виконано дослідження можливості використання імпульсних випромінювачів (рентгенівський апарат МИРА-2Д) в цифрових рентгено-телевізійних системах, що містять рентгенівські детектори високої роздільної здатності.

2. Дослідно-промислові випробування підтвердили можливість створення скануючих рентгено-телевізійних систем з використанням малоформатних детекторів, що дозволило суттєво (в декілька разів) знизити вартість рентгеноскопічного контролю в порівнянні з технологіями на основі великоформатних плоскопанельних детекторів.

3. Розроблено та випробувано мікрокомп'ютерні засоби, які забезпечують бездротове дистанційне управління рентгенотелевізійними системами НК, високу точність сканування та цифрове зшивання окремих фрагментів зображень.

Список літератури

1. (2018) Дефектоскопия XXI века. Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по развитию технологий неразрушающего контроля сварных соединений. Троицкий В.А. (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.
2. Майоров А.А. (2007) Рентгеновское телевидение в промышленном НК. *Технология машиностроения*, **11**, 60–67.
3. DR 7 NDT Installation and Operating Instruction. DÜRR NDT.
4. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Михайлов С.Р. и др. (2016) X-ray mini технология контроля на основе твердотельных детекторов. *Збірник доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016»*. Київ, УТ НКТД, 275–284.

5. Remote RadEye Product Family. Teledyne Dalsa. Рекламний проспект.
6. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Шалаев В.А. (2019) Портативная рентгентелевизионная система на основе миниатюрного твердотельного преобразователя. *Збірник доповідей 9-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019»*. Київ, УТ НКТД, 102–106.
7. Raspberry Pi 3 Model B+. URL: <https://www.waveshare.com/raspberry-pi-3-model-b-plus-package-d.htm>.
8. Новый мини-ПК Beelink BT3-X Mini на базе процессора Apollo Lake. URL: <https://hd-mediaplayers.ru/novyj-mini-pk-beelink-bt3-x-mini-na-baze-processora-apollo-lake/>.

References

1. (2018) Flaw detection of the XXIst century. Main directions of work performed by PWI of the NAS of Ukraine on development of technologies of nondestructive testing of welded joints. Ed. by V.A. Troitskyi. Kiev, PWI [in Russian].
2. Majorov, A.A. (2007) X-Ray TV in industrial NDT. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **11**, 60–67 [in Russian].
3. DR 7 NDT Installation and Operating Instruction. DÜRR NDT.
4. Troitskyi, V.A., Karmanov, M.N., Mikhailov, S.R. et al. (2016) X-Ray mini technology of control based on solid-state detectors. In: *Proc. of 8th National Sci.-Techn. Conf. on Nondestructive Testing and Technical Diagnostics – UkrNDT-2016*. Kyiv, US NDT, 275 – 284 [in Russian].
5. Remote RadEye Product Family. Teledyne Dalsa. Advertising material.
6. Troitskyi, V.A., Karmanov, M.N., Shalaev, V.A. (2019) Portable X-Ray TV system based on miniature solid-state transducer. In: *Proc. of 9th National Sci.-Techn. Conf. on Nondestructive Testing and Technical Diagnostics – UkrNDT-2016*. Kyiv, 102–106 [in Russian].
7. Raspberry, Pi. 3 Model B+. URL: <https://www.waveshare.com/raspberry-pi-3-model-b-plus-package-d.htm>.
8. New mini-PC Beelink BT3-X Mini based on Apollo Lake Processor. URL: <https://hd-mediaplayers.ru/novyj-mini-pk-beelink-bt3-x-mini-na-baze-processora-apollo-lake/>.

SCANNING X-RAY SYSTEM BASED ON MINIATURE SOLID-STATE TRANSDUCERS

V.O. Troitskyi, M.M. Karmanov, S.R. Mikhailov, V.O. Shalaev, R.O. Pastovenskyi

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Nowadays digital methods of nondestructive testing using full-scale semi-conductor X-Ray plane-parallel detectors became developed instead of film radiography in the world practice. These transducers cannot find wide practical application in Ukraine, because of their high cost. We proposed X-Ray TV systems based on relatively inexpensive miniature solid-state transducers. Enlargement of the inspected zone is achieved by electromechanical scanning with subsequent program stitching of the obtained separate small format digital X-ray images. 8 Ref., Fig. 13

Keywords: X-ray TV inspection, digital systems, scanner, X-Ray detector, microcontroller, digital stitching of images

Надійшла до редакції 15.07.2020

ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВЕНТИЛЯТОРІВ ГАЗООЧИЩЕННЯ МАРТЕНІВСЬКИХ ПЕЧЕЙ

А.В. Баглай¹, М.М. Кіпін¹, М.О. Дубіна²

¹ДП «ДІАМЕХ-УКРАЇНА». 61105, м. Харків, вул. Киргизька, 19, АБК-1. E-mail: baglay@diamech.com.ua

²ПАТ «Запоріжсталь». 69008, м. Запоріжжя, вул. Південне шосе, 72. E-mail: office@zaporizhstal.com

За допомогою автоматичної системи контролю та діагностики технічного стану вентиляторів газоочищення мартенівських печей в автоматичному режимі виконується аналіз технічного стану підшипників, з'єднувальних муфт, визначається вид і ступінь розвитку дефекту. Наведено результати впровадження. Безперервний моніторинг технічного стану вентиляторів дозволяє конкретизувати обсяг виконання ремонтних робіт та контролювати якість проведення ремонтів. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: автоматична система контролю та діагностики, вентилятор, захисний безперервний моніторинг, вібрація, температура, рівень масла, струмове навантаження, підшипник

Процес видобутку руди, переробка сировини та виробництво чорних металів становлять велику небезпеку для екології. Викид димових газів в атмосферу, забруднення водойм, наявність шкідливих відходів (канцерогени коксохімічного процесу, доменні викиди, газу та пилу при агломерації руди, мартенівського, конвертерного та інших плавильних агрегатів, шлаки всіх металургійних переробок) створюють значну загрозу для екосистеми. Витрати підприємств на забезпечення екологічної чистоти роботи металургійного підприємства можуть досягати до 20 % загальних капіталовкладень.

Запилені димові газу від мартенівської печі з температурою 700...800 °С по димовому борову

надходять по одному з трьох напрямків: на димову трубу, на газоочищення та на котел-утилізатор. Робочим режимом є режим, при якому димові газу (ДГ) надходять на котел-утилізатор, потім на газоочищення та крізь вентилятори в димову трубу. При виході з ладу газоочищення димові газу перемикаються на димову трубу. Перемикання режимів проводиться шиберами, які зв'язані блокувкою. Димові газу надходять на батарею труб-розпилювачів, в яких проводиться зрошення газу крізь тангенціальні форсунки з розтинаючим конусом. Остаточне очищення газу проходить в каплеуловлювачі та двох циклонах. Очищений димовий газ (ОДГ) від циклонів турбулентного

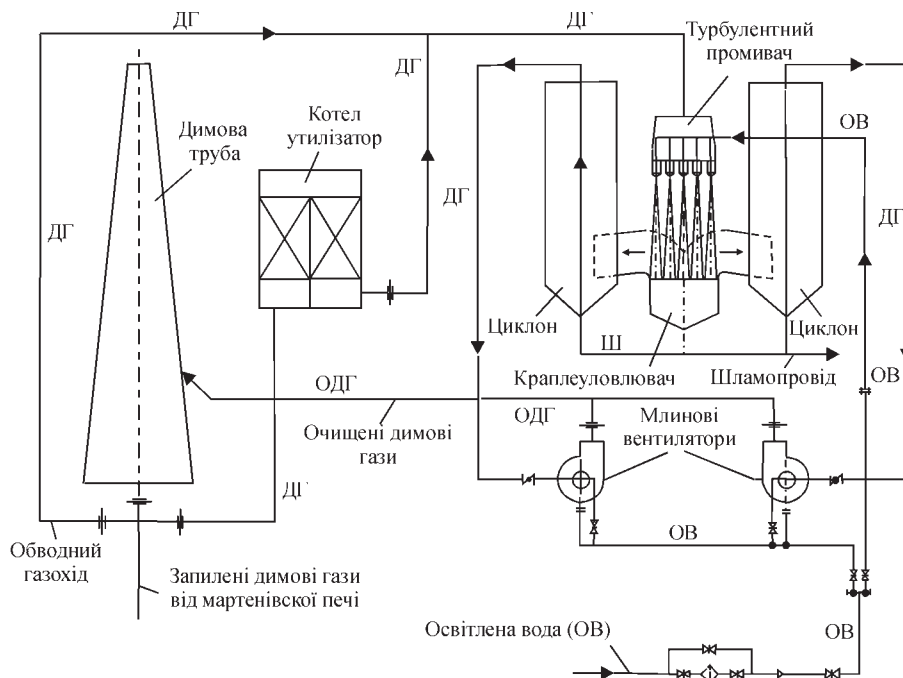


Рис. 1. Схема мокрого газоочищення мартенівських печей №№ 2, 7, 8

В роботі брали участь А.Ю. Гушнін¹, С.С. Годунов¹

© А.В. Баглай, М.М. Кіпін, М.О. Дубіна, 2020

промивача по газоходах надходить до дроселів вентиляторів. Шлам (Ш) від каплеуловлювача та циклонів крізь гідрозатвори відводиться по лотку в приймальний бак шламової насосної. Живлення газоочищення проводиться водою від оборотного цикла кисневого цеху. Циклони та каплеуловлювач захищені від абразивного та коризійного зносів діабазовою плиткою; трійник, труби-розпилювачі, газоходи чистого газу (від вентиляторів до димової труби) виготовляються з нержавіючої сталі; газопроводи від циклонів до вентиляторів (стояки) виготовляються зі сталі 3. Ефективна робота відділень газоочищення мартенівських печей в технологічному ланцюгу цеха передбачає безперебійну роботу млинових вентиляторів.

Ціль роботи. З урахуванням накопиченого досвіду експлуатації системи вібродіагностики (СВД) прокатного обладнання спеціалістами Компанії «ДІАМЕХ» розроблено додатковий діагностичний модуль для контролю технічного стану допоміжного обладнання.

Опис досліджень. На робоче місце діагноста виведено інформацію по газовому цеху, яка відображає поточний технічний стан 12-ти вентиляторів одночасно (рис. 2). Вентилятори сгруповані парами для кожної мартенівської печі. Світлова сигналізація вказує на відповідність рівня вібрації кожного агрегата встановленим нормативним значенням. Транспарант газоочищення мартенівської печі № 1 замальований блакитним кольором. Це означає, що повітрядувки № 1А та № 1Б зупинені для профілактичного огляду та обслуговування. Технічний стан вентиляторів №№ 2АБ, 5АБ, 6АБ, 7АБ, 8АБ, 10АБ, 12АБ задовільний (максимальний рівень вібрації 5,4 мм/с, СКЗ (середнє квадратичне значення), колір транспаранту – зелений). При цьому температура заднього підшипника (т. 12.4А (точка (підшипник) 4-го вентилятора №12А)) досягла значення 60 °С. Необхідно зробити заявку в лабораторію діагностики для проведення тепловізійного контролю даного агрегата, що дозволить перевірити наявність локального нагріву вала або підшипника вентилятора зі сторони робочого колеса.



Рис. 2. Мнемосхема млинових вентиляторів газоочищення мартенівських печей

В додаток до основних технічних параметрів млинових вентиляторів виводиться:

- контроль віброускорення в діапазоні частот 5...10000 Гц, м/с², СКЗ;
- контроль пік-фактора в діапазоні частот 5000...10000 Гц;
- контроль ексцесу в діапазоні частот 5000...10000 Гц.

На транспаранти «Сторона А» та «Сторона Б» виводиться світлофор поточного стану електродвигуна за віброшвидкістю. В трикутниках виводиться сигналізація технічного стану агрегата та ступінь розвитку виявленого дефекта (рис. 3).

В програмі передбачено побудову трендів всіх ідентифікованих частот, що спрощує процес аналізу, і ці результати враховуються в вирішальних правилах при постановці діагнозу. В закладці «Поточні» («Текущие») здійснюється перехід в конкретну пару млинових вентиляторів газоочищення мартенівської печі, в даному випадку печі № 2 (рис. 3).

Натисканням курсора на трикутник розкривається додаток «Діагностика АРМ» з результатами діагностики, виконаними СВД, наприклад, вентилятор № 2А. Періодичність автоматичної діагностики складає 1 годину. За запитом спеціаліста можна виконати позачергове діагностування обладнання. Для індивідуального аналізу вузлів агрегата передбачені додаткові методи, функції та види статистичної обробки. Система формує «Звіт» у вигляді текстового документа про поточний технічний стан агрегата за результатами виконаної діагностики з вказанням актуальних рівнів вібрації (на момент діагностування), схеми агрегата, виявлених дефектів або несправностей, допустимого експлуатаційного ресурса та рекомендації по усуненню виявлених несправностей або дефектів.

Отримані результати. На рис. 2 наведено результат автоматичної діагностики агрегата № 2А від 24.06.2020 р. Системою виявлено наступні



Рис. 3. Закладка «Поточні» («Текущие»), вибір конкретної пари вентиляторів газоочищення № 2АБ

несправності: дефект підшипника 46230 (№ 1) та дефект підшипника 2230 (№ 2), середній ступінь розвитку дефекта. При цьому значення віброшвидкості в стандартній полосі частот знаходиться в межах норми.

В діагностичний модуль внесено додатковий функціонал, що забезпечує превентивне попередження аварійних ситуацій на вентиляторах шляхом контролю температури підшипників, контролю струмового навантаження двигунів та реєстрації рівня масла в картерах агрегатів. Нор-

Межі діапазонів контролюємих параметрів на вентиляторах

Контролюємий параметр	Норма	Попередження	Аварія
Віброшвидкість, мм/с	<8,6 ¹	8,6 ¹ ...11,2	>11,2
Температура, °C	<50	50...60	>60
Струм, А	<70	70...80	>80
Рівень масла, мм	-10мм, +10мм	<-10мм, >+10мм	<-15мм, >+15мм

Примітка. ¹Нормативне значення для даного типу обладнання встановлено Розпорядженням по підприємству № 59/1196474 від 25.11.2006 р.

мативні значення контролюємих параметрів для вентиляторів газоочищення наведені в таблиці.

В газовому цеху службою експлуатації організовано періодичний контроль вібрації повітрядувок кожні 4 години переносними віброметрами СМ-21М. Показним є інцидент, що мав місце 24.12.2019 р. в період пусконаладжувальних робіт на повітрядувці № 12Б. Спеціаліст цеху при плановому обстеженні повітрядувки в 7 год 45 хв зафіксував рівень віброшвидкості ~6 мм/с в т. 4Б (точка (підшипник) 4-ї повітрядувки Б), що відповідає нормальному стану обладнання. Через 15 хв система автоматичного контролю видала оповіщення про виникнення аварійної ситуації на даному агрегаті (рис. 4). Контроль вібрації та температури на підшипниках вентилятора здійснювався комбінованими акселерометрами HS-150ST.

Обслуговуючим персоналом було виконано контрольний замір вібрації переносним приладом, який підтвердив високу вібрацію на підшипнику (~15 мм/с) зі сторони робочого ко-

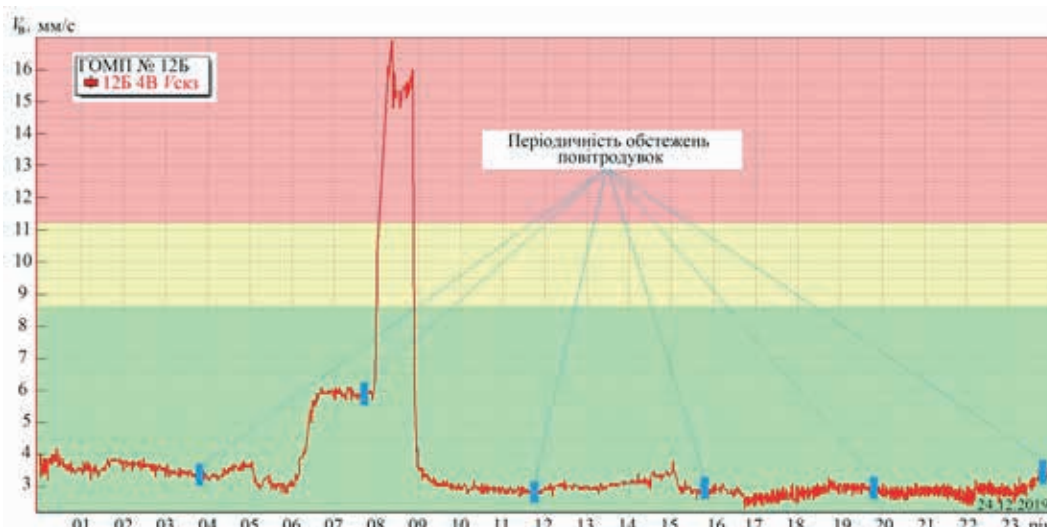


Рис. 4. Тренд віброшвидкості полевого підшипника вентилятора № 12Б, V_b – віброшвидкість

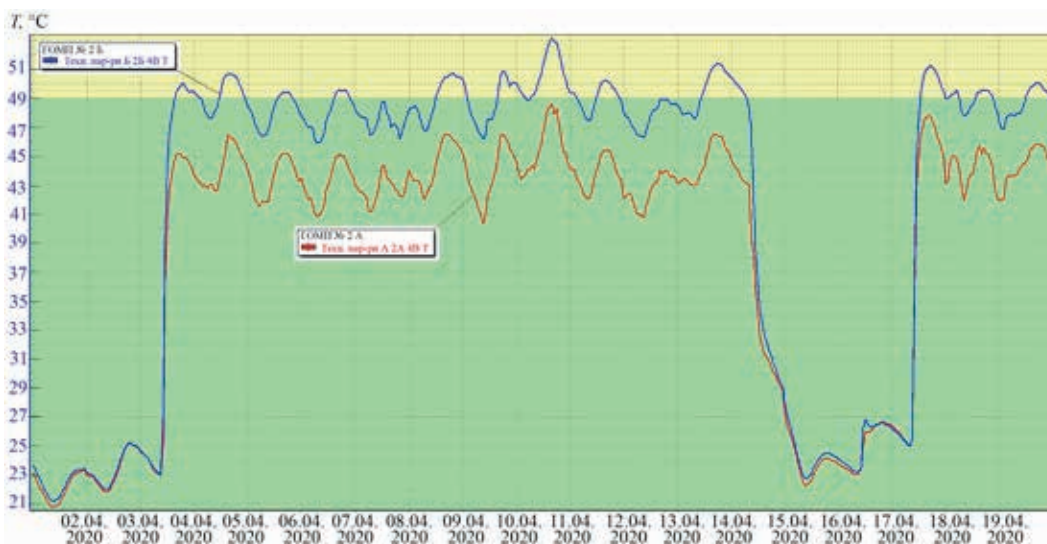


Рис. 5. Тренд температури полевих підшипників вентиляторів № 2А, Б

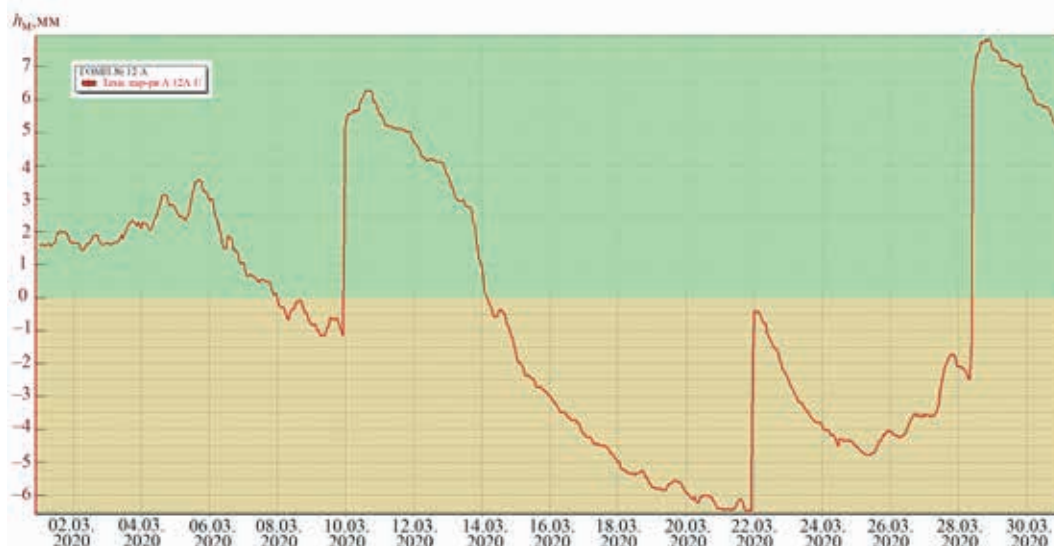
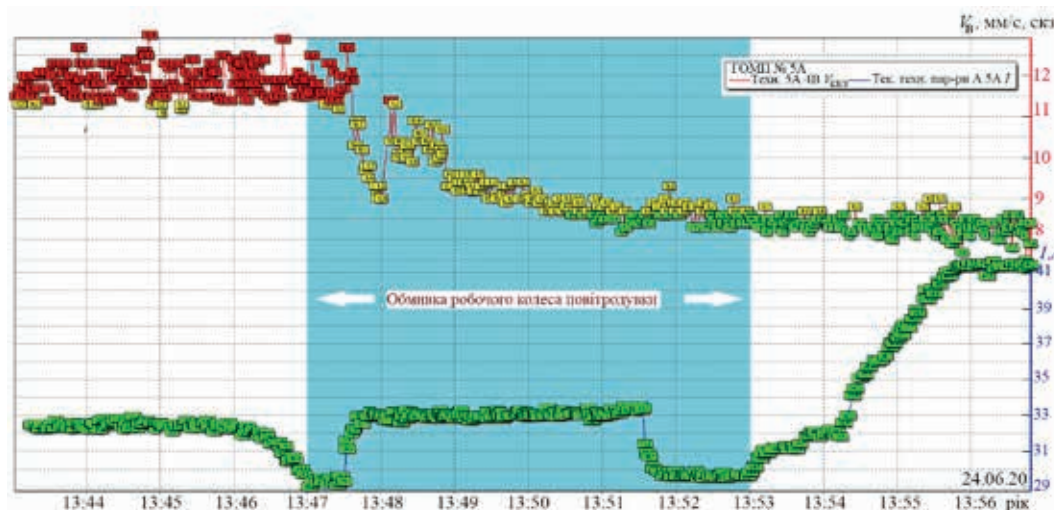
Рис. 6. Тренд рівня масла h_m в картері вентилятора № 12А

Рис. 7. Тренд струмового навантаження та віброшвидкості електродвигуна вентилятора № 5А

леса. Зростання віброшвидкості на полевому підшипнику повітрядувки № 12Б було пов'язане з утворюванням точки роси у димовому газі, що всмоктується, налипанням пилу та окалини на лопатки робочого колеса та, як наслідок, виникненням дисбалансу ротора. Після обмивання колеса рівень вібрації на агрегаті знизився у 5 разів (рис. 4).

На рис. 5 наведено тренд температури млинових вентиляторів № 2А та № 2Б, розташованих в одному приміщенні. Коливання температури підшипників $\pm 3 \dots 5$ °С протягом дня пов'язані зі зміною часу доби (день/ніч).

На рис. 6 наведено тренд рівня масла в картері вентилятора № 12А, який показує зниження рівня масла протягом 12 діб (на ~ 13 мм).

Після додавання масла марки Тп-22 в картер агрегата рівень відновився. Рекомендовано при плановому обслуговуванні повітрядувки виконати ревізію еластичної манжети. При наявності значного зносу слід провести її заміну.

Контроль струмового навантаження електродвигунів виконувався бесконтактними датчиками. Тренд струму наведено на рис. 7.

Тренд дає уявлення про навантаження двигуна в моменти перекидання клапанів згідно графіку перемикачів та його реакції на обмивання робочого колеса агрегата.

Висновки

1. Система вібродіагностики допоміжного обладнання виконує аналіз в автоматичному режимі, оцінює технічний стан підшипників, з'єднувальних муфт, визначає вид та ступінь розвитку дефекта.
2. Методика захисного моніторингу забезпечує своєчасне інформування обслуговуючого персоналу про виникнення позаштатної ситуації на млинових вентиляторах.
3. Безперервний моніторинг технічного стану вентиляторів дозволяє конкретизувати об'єм виконуваних ремонтних робіт та контролювати якість проведення ремонтів. Рішення даної задачі в такій

постановці дозволяє знизити затрати на технічне обслуговування та ремонт обладнання до мінімально можливого рівня.

Список літератури

1. Гольдин А.С. (1999) *Вибрация роторных машин*. Москва, Машиностроение.
2. Гребеник В.М., Иванченко Ф.К., Павленко Б.А. и др. (1990) *Механическое оборудование металлургических заводов. Механическое оборудование конвертерных и мартеновских цехов*. Учебник. Киев, Высшая школа.
3. Иванченко Ф.К., Павленко Б.А. (1964) *Механическое оборудование сталеплавильных цехов. Учебное пособие*. Москва, Металлургия.
4. Кравченко В.М., Сидоров В.А., Седуш В.Я. (2009) *Техническое диагностирование механического оборудования: учеб. пособие*. Донецк, «Юго-Восток, Лтд».

5. Баглай А.В., Воробьев В.В., Гузеев А.Н., Кипин М.М. (2020) Система вибродиагностики для оборудования прокатного производства. *Черные металлы*, 2 (1058), 62–70.

References

1. Goldin, A.S. (1999) Vibration of rotor machines. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Grebenik, V.M., Ivanchenko, F.K., Pavlenko, B.A. et al. (1990) Mechanical equipment of metallurgical plants. Mechanical equipment of converter and open-hearth shops: Manual. Kiev, Vysshaya Shkola [in Russian].
3. Ivanchenko, F.K., Pavlenko, B.A. (1964) Mechanical equipment of steel-making shops: Manual. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Kravchenko, V.M., Sidorov, V.A., Sedush, V.Ya. (2009) Technical diagnostics of mechanical equipment: Manual. Donetsk, Yugo-Vostok Ltd. [in Russian].
5. Baglay, A.V., Vorobiov, V.V., Guzeev, A.N., Kipin, M.M. (2020) System of vibrodiagnostics for rolling production equipment. *Chyornye Metally*, 2 (1058), 62-70 [in Russian].

INTRODUCTION OF AUTOMATIC SYSTEM FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF GAS CLEANING FANS FOR OPEN-HEARTH FURNACES

A.V. Baglay¹, M.M. Kipin¹, M.A. Dubina²

¹SE «DIAMECH-UKRAINE». 19 Kirgizska str., 61105, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: baglay@diamech.com.ua

²PJSC «Zaporizhstal». 72 Yuzhnoje Rd., 69008, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: office@zaporizhstal.com

Automatic system for monitoring and diagnosing the technical condition of fans for gas treatment of open-hearth furnaces is used for automatic performance of analysis of the technical condition of bearings and couplings, and determination of the type and degree of development of a defect. The results of implementation are given. Continuous monitoring of the technical condition of the fans allows specifying the amount of repair work and controlling the quality of repairs. 5 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: automatic control and diagnostic system, fan, continuous protective monitoring, vibration, temperature, oil level, current load, bearing

Надійшла до редакції 10.07.2020

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1 IN THE WORLD

LET'S JOIN
THE WORLD!

13. – 17. September, 2021

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПРИСТРОЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЕРТОВИХ ТА НЕОБЕРТОВИХ ЧАСТИН МЕХАНІЗМІВ*

М.Г. Шульженко¹, О.Ф. Поліщук¹, Ю.Г. Єфремов², К.В. Аврамов¹

¹Інститут проблем машинобудування НАН України ім. А.М. Підгорного. 61046, м. Харків,
вул. Пожарського, 2/10. E-mail: ipmach@ipmach.kharkov.ua

²ТОВ «СКБ Вібрації та ресурсу». 61072, м. Харків, пр. Науки, 60. E-mail: iefremov.ua@gmail.com

Викладено результати розробок інтелектуальних датчиків вібрації та спеціалізованих пристроїв діагностування і неруйнівного контролю технічного стану агрегатів та вузлів енергетичного обладнання. Створено інтелектуальні датчики вібропереміщення та віброшвидкості, що складаються з первинного та функціонального перетворювачів. Вони забезпечують автоматичну компенсацію впливу температури та нелінійності амплітудно-частотної характеристики датчика, автоматичне налаштування амплітудного діапазону вимірювання, контроль вібропараметрів у заданих смугах частот і автоматичну перевірку справності функціонування. Створено вихороструміві пристрої для виявлення тріщин в деталях нарізних з'єднань та теплових канавках роторів. Розроблені інтелектуальні датчики та пристрої використовуються для контролю вібрації потужних турбоагрегатів та наявності тріщин в нарізних елементах. Бібліогр. 4, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: інтелектуальний датчик вібрації, вихорострумівий перетворювач, вібрація, діагностування турбоагрегатів, виявлення тріщин

Сучасний рівень розвитку мікроелектроніки дозволяє створити інтелектуальні датчики та спеціалізовані пристрої неруйнівного контролю, що забезпечують необхідний рівень метрологічних та експлуатаційних характеристик в режимі реально-го часу.

Метою роботи є створення новітніх інтелектуальних датчиків та спеціалізованих пристроїв для оцінки наявного технічного стану обладнання агрегатів та вузлів ТЕС та ТЕЦ України.

Інтелектуальний датчик являє собою засіб вимірювання з мікроконтролером, що виконує наступні функції:

- цифрову обробку сигналів;
- автоматичну компенсацію впливу параметрів навколишнього середовища;
- автоматичну перевірку справності функціонування (самодіагностування);
- дистанційне конфігурування (діапазону вимірювань, одиниць вимірювань);
- передавання отриманої інформації з використанням протоколів промислових мереж.

Інтелектуальний датчик віброшвидкості для оцінки вібраційного стану необертюваних частин обладнання. Датчик складається з первинного та функціонального перетворювачів. Функціональний перетворювач призначений для цифрової обробки сигналу первинного перетворювача та видачі інфор-

мації у аналоговому та цифровому вигляді. Функціональний перетворювач включає наступні модулі:

- вхідний модуль для подачі електроживлення на первинний перетворювач, посилення і обмеження частотно-модульованого сигналу;
- мікроконтролер типу STM32 для обробки сигналу первинного перетворювача;
- вихідний модуль для нормування сигналу, пропорційного вимірюваній величині [1].

Створені інтелектуальні датчики віброшвидкості з однокомпонентним вихорострумівим первинним перетворювачем використовуються для контролю вібрації опор трьох турбоагрегатів К-300-240. Вимірювання проводяться паралельно на всіх опорах турбоагрегата у трьох напрямках (вертикальному, горизонтально-поперечному та осьовому). Для реєстрації вібраційних параметрів датчики підключаються до робочої станції штатної автоматизованої системи вібродіагностики (АСВД), впровадженої раніше Інститутом проблем машинобудування НАН України на турбоагрегатах. Для перетворення аналогового сигналу з інтелектуальних датчиків віброшвидкості у цифровий сигнал використовується плата АЦП Е-14-440 (виробництва LCard) робочої станції системи. З аналогового виходу інтелектуальних датчиків сигнал по напрузі подається на вхід плати АЦП Е-14-440. Реєстрація вібропараметрів здійсню-

* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016-2020 рр.

Єфремов Ю.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-2559-5747>

© М.Г. Шульженко, О.Ф. Поліщук, Ю.Г. Єфремов, К.В. Аврамов, 2020

ється з використанням програмного забезпечення АСВД турбоагрегата.

Інтелектуальний датчик вібропереміщення для оцінки вібраційного стану обертових частин обладнання. Датчик складається з однокомпонентного вихорострумowego безконтактного первинного та вторинного функціональних перетворювачів. Структура вихорострумowych

перетворювачів та принцип їх функціонування описані у [2].

Безконтактний однокомпонентний вихорострум-овий первинний перетворювач вібропереміщення V-01.1 та його модифікації V-01.2, V-01.K, V-01.3 наводяться на рис. 1. Вони різняться за формою і розміром вимірювальної котушки індуктивності та матеріалами, з яких зроблено корпус первинного перетворювача. Розмір та форма вимірювальної котушки індуктивності впливають на діапазон вимірювання вібропереміщення (переміщення). У таблиці приводяться діапазони вимірювання вібропереміщення (переміщення) для різних модифікацій первинного перетворювача та рекомендації щодо їх використання (призначення).

Відмінність нового вихорострумowego первинного перетворювача від раніше створених полягає в тому, що в ньому використано додаткові елементи для забезпечення функції компенсації впливу



Рис. 1. Зовнішній вигляд первинних перетворювачів: а – V-01.1; б – V-01.2; в – V-01.K; г – V-01.3

Рекомендації щодо використання первинних перетворювачів

Модифікація	Діапазон вимірювання розмаху вібропереміщення, мкм	Діапазон вимірювання переміщення, мм	Призначення
V-01.1	20...500	0...4	Контроль вібропереміщення ротора, осьового зсуву, викривлення ротора
V-01.2	20...1000	0...10	Контроль вібропереміщення ротора, відносного розширення ротора
V-01.K	20...1000	0...10	Контроль вібропереміщення контактних кілець щітково-контактного апарата турбоагрегата
V-01.3	20...1000	0...100	Контроль теплового розширення циліндра турбіни

температури (датчик температури, мікроконтролер

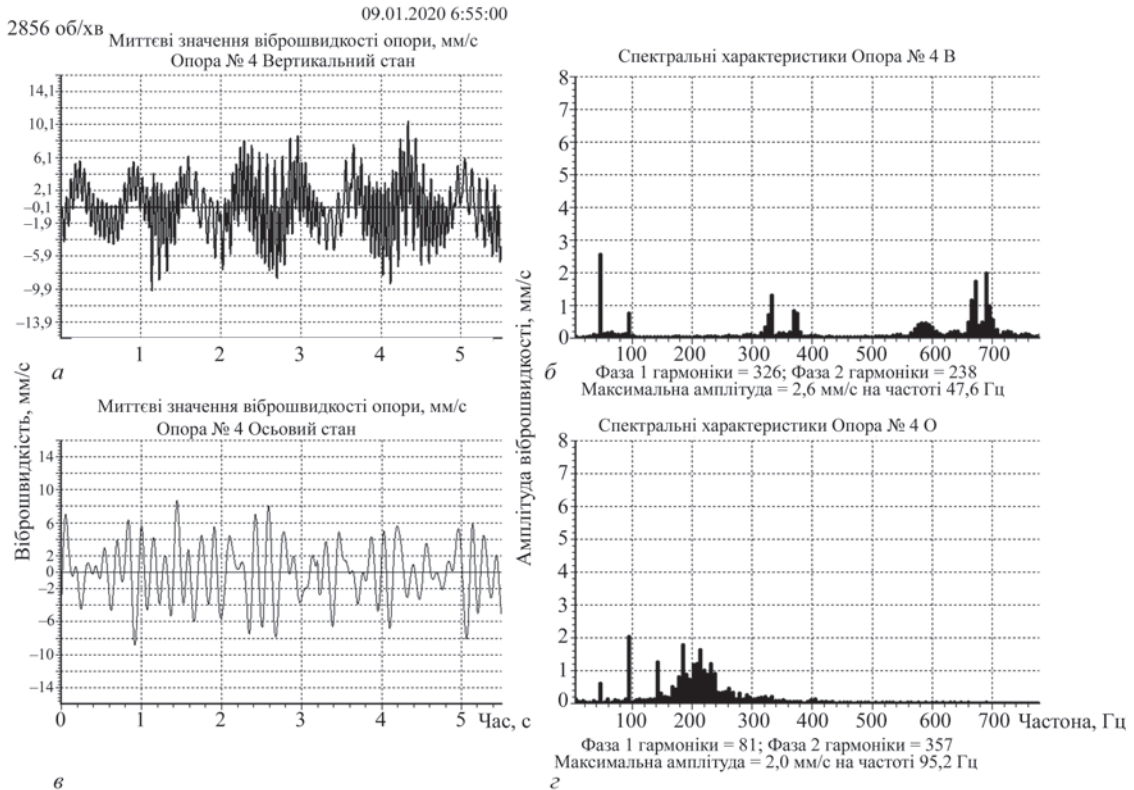


Рис. 2. Значення та спектри віброшвидкості опори на перехідному режимі роботи агрегату.

типу PIC10 та ін.). Для мікроконтролера первинного перетворювача розроблено програму обробки сигналу з температурного датчика та формування значення температури у цифровому вигляді. Датчики використовуються на турбоагрегатах К-300-240, К-200-130 та Т-250/300-240. За допомогою датчиків отримуються спектральні характеристики вібропереміщення роторів турбоагрегатів і тренди розмаху вібропереміщення контактних кілець щітково-контактних апаратів. У ННЦ «Інститут метрології» отримано сертифікат калібрування інтелектуального датчика вібропереміщення.

Пристрій діагностування вібраційного стану енергетичного обладнання. Пристрій має функції моніторингу, візуалізації, аналізу параметрів коливань та архівації даних на постійному носії. За результатами випробування створених раніше інтелектуальних датчиків вібрації в умовах ТЕЦ розроблено нове програмне забезпечення для мікроконтролерів функціональних перетворювачів, що дозволило розширити функціональні можливості створених датчиків [3]. Проведено модернізацію пристроїв контролю середньоквадратичних значень віброшвидкості опор автоматизованих систем вібродіагностики турбоагрегата К-300-240 (енергоблоки №№ 1, 3, 4 Трипільська ТЕС) та отримано відповідні метрологічні документи на системи.

Приклад представлення інформації про вібраційний стан турбоагрегата наводиться на рис. 2, 3, де показано миттєві значення та спектральні складові

ві віброшвидкості опори у двох напрямках – вертикальному та вздовж осі агрегату у різний час доби.

Наведені графіки свідчать, що вібраційні характеристики, отримані за допомогою інтелектуальних датчиків, характеризують різні режими роботи турбоагрегата. В даному прикладі на перехідному режимі включається трьохплунжерна помпа, що відображається на спектрі вібрації в діапазоні 600...700 Гц. Окрім наведених на рис. 3, 4 параметрів, візуалізуються також в графічній формі зміни середньоквадратичного значення віброшвидкості опор протягом доби та фазові характеристики для всіх опор турбоагрегата. Останні використовуються для оцінки стійкості вібрації агрегату.

Дослідження вібраційних характеристик турбоагрегатів великої потужності. Створені інтелектуальні датчики визначення параметрів вібрації обертових та необертових вузлів енергетичного обладнання застосовано для оцінки вібраційного стану турбоагрегатів потужністю 200 та 300 МВт. За результатами дослідження вібраційних характеристик турбоагрегата К-200-130 (Луганська ТЕС) виявлено причини нестабільного вібраційного стану контактних кілець ротора генератора ТГ-9. Для цього персоналом служби віброналагодження та діагностики була розроблена програма випробувань на різних перехідних та номінальних режимах роботи турбоагрегата. Аналіз вібрації контактних кілець проведено на основі визначення їх вібраційного переміщення за допомогою інтелектуальних датчиків ІД-ВП-01(К).

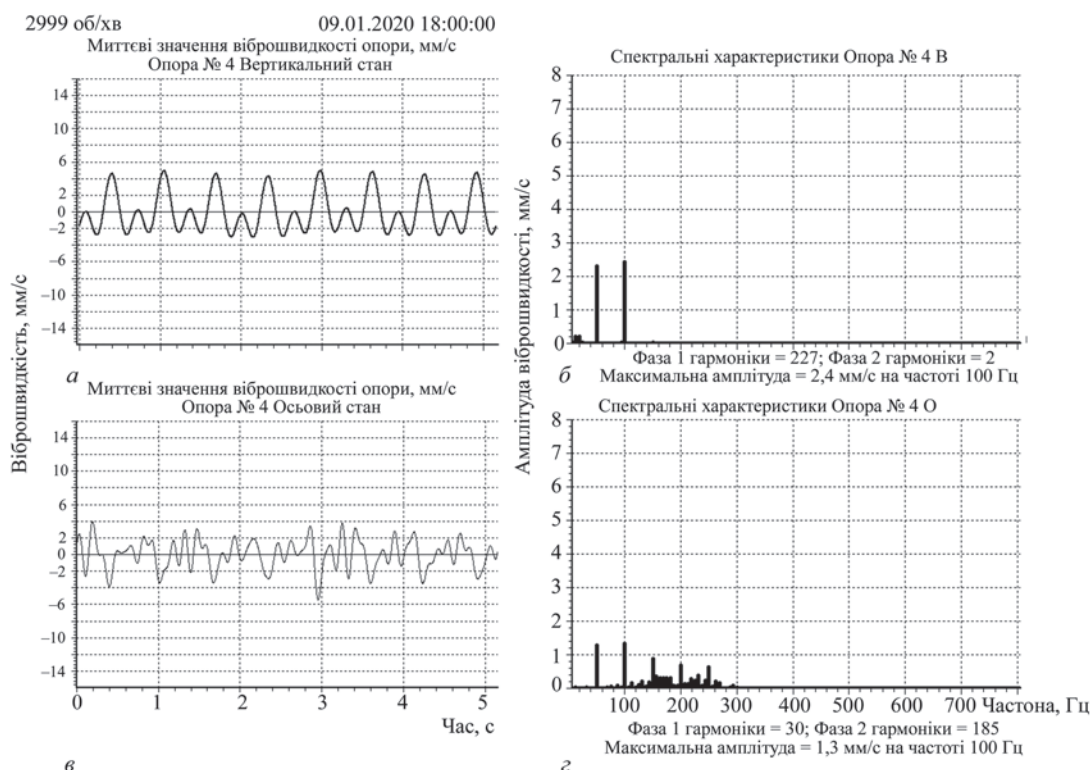


Рис. 3. Значення та спектри віброшвидкості опори на стаціонарному режимі роботи агрегату



Рис. 4. Вихорострумів пристрій

Для турбоагрегатів К-300-240 енергоблоків №№ 3, 4 Трипільської ТЕС проводився аналіз вібрації семи підшипникових опор. За допомогою впроваджених інтелектуальних датчиків встановлено залежність вібраційних характеристик від режимів роботи агрегатів. За результатами досліджень параметрів вібрації турбоагрегатів розроблено рекомендації щодо покращення вібраційного стану та підвищення надійності роботи енергоблоків.

Вихорострумів пристрій для контролю наявності тріщин в деталях нарізних з'єднань. Створено пристрій для оцінки наявності тріщин у нарізних з'єднаннях вузлів енергетичного та транспортного обладнання (рис. 4, а), та експериментальний зразок вихорострумів пристрою для виявлення тріщин в теплових канавках роторів (рис. 4, б).

Експериментальними дослідженнями створених вихорострумів перетворювачів та їх удосконаленням досягнуті амплітудні та фазові характеристики, що забезпечують виявлення дефектів у розрізі глибиною до 4 мм – для феромагнітних та до 10 мм – для неферомагнітних металів.

У пристрої для виявлення тріщин в теплових канавках роторів використовується спеціально розроблений вихорострумів перетворювач на Ш-подібному феритовому осердді. Експериментальні дослідження таких перетворювачів показали їх високу чутливість до дефекту із допустимим робочим проміжком до 4 мм при контролі деталей з феромагнітних металів [4]. Наявність такого проміжку важлива тому, що в процесі експлуатації турбоагрегата в теплових канавках з'являються різного роду нашарування, які заважають проведенню якісної дефектоскопії. Профіль перетворювача повторює форму теплової канавки, товщина робочої частини разом з екраном 3 мм. Сигналізація про наявність тріщини світлова та звукова. Пристрій успішно випробувано на зразку з тепловою канавкою при виявленні в ній штучної тріщини.

Створені при виконанні роботи за вказаним проектом інтелектуальні датчики, пристрої та системи діагностування можуть бути застосовані для

діагностування технічного стану інших об'єктів промисловості.

Висновки

1. Вперше в Україні розроблено інтелектуальний датчик вібропереміщення (переміщення) для оцінки вібраційного стану обертових та датчик віброшвидкості для необертових частин обладнання.

2. Створено пристрій діагностування вібраційного стану обладнання з функціями моніторингу, візуалізації, аналізу параметрів коливань та архівації даних на постійному носії з використанням створених інтелектуальних датчиків вібрації.

3. Проведено модернізацію пристроїв контролю вібрації автоматизованих систем вібродіагностики турбоагрегату К-300-240 (енергоблоки №№ 1, 3 Трипільська ТЕС) та отримано відповідні метрологічні документи на системи.

4. Створені інтелектуальні датчики визначення параметрів вібрації обертових та необертових вузлів енергетичного обладнання використовуються для оцінки вібраційного стану турбоагрегатів потужністю 200 та 300 МВт.

5. Створені вихорострумів пристрої з перетворювачами різних типів використовується для контролю деталей та вузлів бурового обладнання в управлінні «Укрбургаз», а також для контролю бабітового шару шатунних підшипників газомоторних компресорів.

Список літератури

1. Шульженко М.Г., Єфремов Ю.Г., Депарма О.В., Цибулько В.Й. (2017) Датчик віброшвидкості з функціями контролю і аналізу вібраційних параметрів енергообладнання. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків, НТУ «ХПІ», 8 (1230), 63–68. ISSN 2078-774X.
2. Шульженко М.Г., Гармаш Н.Г., Єфремов Ю.Г. та ін. (2018) Інтелектуальний датчик вібропереміщення з функціями контролю й аналізу вібраційних параметрів енергообладнання. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків, НТУ «ХПІ», 11 (1287), 40–46.
3. Єфремов Ю.Г. (2015) Методико-алгоритмічне забезпечення функціонування мобільного комплексу з оцінки вібраційного стану енергетичних агрегатів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків, НТУ «ХПІ», 17 (1126), 111–116.
4. Поліщук О., Тертишний І., Шульженко М. (2019) Контроль наявності тріщин у нарізних з'єднаннях вихорострумів методом. 14-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 23–24 травня 2019 р.). Матеріали симпозіуму. Львів, КІНПА-ТРІ ЛТД, 40–42.

References

1. Shulzhenko, M.G., Efremov, Yu.G., Deparma, O.V., Tsybulko, V.Yo. (2017) Sensor of vibration velocity with functions of monitoring and analysis of vibration parameters of power equipment. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Energetychni ta Teploekhnichni Protsesi i Ustatkuvannia*. Kharkiv, NTU KhPI, 8(1230), 63–68. – ISSN 2078-774X [in Ukrainian].
2. Shulzhenko, M.G., Efremov, Yu.G., Deparma, O.V., Tsybulko, V.Yo. (2018) Intelligent sensor of vibration displacement with

- functions of monitoring and analysis of vibration parameters of power equipment. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Energetychni ta Teplotekhnichni Protsessy i Ustatkuvannia. Kharkiv, NTU KhPI*, 11(1287), 40–46 [in Ukrainian].
3. Efremov, Yu.G. (2015) Procedural-algorithmic support of functioning of a mobile complex for evaluation of vibration condition of power units. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Energetychni ta Teplotekhnichni Protsessy i Ustatkuvannia. Kharkiv, NTU KhPI*, 17(1126), 111–116 [in Ukrainian].
4. Polishchuk, O., Tertyshnyi, I., Shulzhenko, M. (2019) *Control of cracking in threaded connections by eddy-current method. In: Proc. of 14th Int. Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers* (Lviv, 23–24 May, 2019). Lviv, KIN-PATRI Ltd, 40–42 [in Ukrainian]

SPECIALIZED NON-DESTRUCTIVE TESTING DEVICES FOR EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF ROTARY AND NON-ROTARY PARTS OF MECHANISMS

M.G. Shulzhenko¹, O.F. Polishchuk¹, Yu.G. Iefremov², K.V. Avramov¹

¹A.M. Pidhorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine. 2/10 Pozharsky Str., 61000, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: ipmach@ipmach.kharkov.ua

²«JDB Vibratsii ta resurs», LTD. 60 Nauki Prosp., 61072, Kharkiv, Ukraine. E-mail: iefremov.ua@gmail.com

Results of development of intelligent vibration sensors and specialized devices for diagnosing and nondestructive testing of the technical condition of units and components of power equipment are presented. Intelligent vibration displacement and vibration velocity sensors, consisting of the primary and functional transducers, were developed. They provide automatic compensation for the impact of temperature and nonlinearity of the sensor amplitude-frequency characteristics, automatic setting up of the amplitude measurement range, monitoring vibration parameters in the set frequency bands and automatic checking of correct functioning. Eddy current devices for detecting cracks in the parts of threaded connections and heat flutes of rotors were designed. The developed intelligent sensors and devices are used for monitoring vibration of powerful turbosets and detecting cracks in threaded elements. 4 Ref., 1 Table, 4 Fig.

Keywords: intelligent sensor; vibrations; eddy current transducer; vibration; diagnosing turbosets; crack detection

Надійшла до редакції
09.07.2020

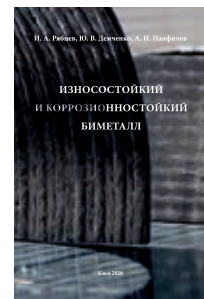
НОВА КНИГА

Рябцев И.А., Демченко Ю.В., Панфилов А.И. Износостойкий и коррозионностойкий биметалл. — Киев: Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2020. — 224 с.

Наведено класифікацію багат шарових металів, описано основні способи їх виробництва, охарактеризовано структуру і властивості матеріалів, які застосовуються в якості основного і плакуючого шарів. Висвітлено питання теорії і практики отримання багат шарових матеріалів, наведено методики оцінки якості і властивостей багат шарових матеріалів, отриманих різними способами. Велику увагу приділено особливостям їх зварювання і застосування в різних галузях промисловості.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників, зайнятих в області наплавного і ремонтного виробництва. Може бути корисною викладачам, аспірантам і студентам технічних університетів.

Замовлення на книгу прохання надсилати в редакцію журналу.



НОВА КНИГА (анонс)

«ОСНОВЫ СТРУКТУРНОЙ ЦЕЛЕСОБНОСТИ ТА РУЙНУВАНЬ»

(The Fundamentals of Structural Integrity and Failure)

Richard M. Wilcox (редактор)

Серія: Конструкційні матеріали та техніка

ISBN: 978-1-53618-778-6: 2021, Nova Science and Technology

Дата публікації: січень 2021 р. Статус: в виробництві. 195 дол.

ЗМІСТ

Передмова

Глава 1. Оцінка структурної цілісності відпрацьованого ядерного палива (Belal Almohamdi, Department of Nuclear and Quantum Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea)

Глава 2. Питання структурної цілісності внаслідок зародження тріщин, ініціювання та зростання (Xijia Wu and Zhong Zhang, Aerospace Research Center, National Research Council Canada, Ottawa, Canada)

Глава 3. Моделювання, обчислення, вимірювання та обробка сигналів для оцінки цілісності інженерних конструкцій в умовах невизначеності (Ajoy Kumar Das, Big Top Manufacturing, Перрі, Флорида, США)

Глава 4. Виявлення вихрострумів тріщин у феромагнітних сталевих конструкціях (Валентин Учанін та Джузеппе Нардоні, Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАНУ, Львів, Україна та інші)

Глава 5. Вимірювання коерцетивної сили для моніторингу цілісності конструкцій

(Валентин Учанін, Орест Осташ, Джузеппе Нардоні та Роман Соломаха, Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАНУ, Львів, Україна та інші)

Глава 6. Прогнозування та виявлення несправностей у посудинах під тиском: Фільтр Вінера, застосований до негативно відібраних штучних імунізаційних систем

(R. Outa, F. R. Chavarette, A. P. Gonçalves and S. L. Da Silva, FATEC Araçatuba, Faculty of Technology of Araçatuba, Department of Biofuels, Ipanema, Araçatuba, SP, Brazil, and others)

Замовляйте книгу зі знижкою по посиланню:

<https://novapublishers.com/shop/the-fundamentals-of-structural-integrity-and-failure/>

ДИНАМІКА ТА ДІАГНОСТИКА ЗАЗОРІВ В КЛІТЯХ З БАГАТОНІТКОВОЮ ПРОКАТКОЮ

А.В. Баглай¹, В.В. Веренев²

¹ДП «ДІАМЕХ-УКРАЇНА». 61105, м. Харків, вул. Киргизька, 19, АБК-1. E-mail: baglay@diamech.com.ua

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. 49050, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1.

E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Представлено види перехідних процесів по крутильному моменту в клітях дрібносортового стану при двохнітковій прокатці. Описано їхні особливості під час захвату першої полоси, а потім другої полоси. Запропоновано метод розрахунку коефіцієнта динамічності та максимального пікового навантаження при вході в валки, що знаходяться під навантаженням, наступних полос. Показана можливість визначення технічного стану лінії приводу відносно зносу та зазорів. Бібліогр. 2, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: захват полоси, калібр, двохніткова прокатка, момент, коливання, зазор, лінія приводу, коефіцієнт динамічності

В безперервних дрібносортовних станах в декілька клітях ведеться прокатка в дві або чотири нитки. Послідовність подачі полоси в калібри валків не регламентовано. Один з чотирьох калібрів може заповнюватись полосою, другий калібр вивільнюється від полоси, в той час як в двох інших ведеться прокатка. В підсумку в лініях приводу валків формуються різні режими навантаження, розвантаження та різні види перехідних процесів. Суттєвий вплив при цьому на ударні навантаження та коливальні явища чинять знос зчленувань та зазори, що утворюються. Розмикання та замикання зазорів має специфічний характер та недостатньо досліджено. Крім того, на прокатних станах відсутні надійні вимірювачі, які дозволяють під час роботи визначати стан зчленувань.

У зв'язку з цим доцільно на конкретних прикладах розглянути особливості динамічних процесів в деяких клітях з багатонитковою прокаткою в їх зв'язку з зазорами та встановити діагностичну цінність подібної інформації.

Розглянемо результати вимірювань крутильного моменту, які виконані на проміжному валу між двигуном та редуктором трьох клітей двохніткового дрібносортового стану 250. Крутильний момент від тихохідного валу редуктора передається через шестеренну кліть та шпінделі робочим валкам.

Типовий вид перехідних процесів в лініях приводу трьох клітей №№ 5, 6, 7 при захваті першої полоси (нитки) в одному з калібрів та захваті другої полоси в іншому калібрі в той час, коли прокатують першу полоси, наведено на рис. 1. При захваті першої полоси після першого піку в клітях №№ 6, 7 момент зменшується до нуля. Це означає, що відбувається короткочасне розмикання зазорів в зубчатих зчепленнях на ділянці редук-

тор–двигун. Дослід вимірювань показує, що після ремонту обладнання дане явище не відбувається.

Важливою характеристикою перехідного процесу є коефіцієнт динамічності K – відношення максимального пікового моменту M_{\max} до моменту $M_{\text{ст}}$ в усталеному режимі прокатки: $K = M_{\max} / M_{\text{ст}}$. Наявністю зазорів пояснюються суттєві значення коефіцієнта динамічності в клітях №№ 6, 7: $K_6 = 4,3$; $K_7 = 4,2$ на відміну від кліті № 5, де $K_5 = 2,2$ та розмикання зазорів не спостерігається. Частота коливань моменту в клітях складає ~ 20 Гц, отже, динамічні властивості ліній приводу валків клітей близькі. Тому менше значення K_5 можливо пояснити кращим технічним станом лінії цієї кліті.

Значення коефіцієнтів динамічності в клітях №№ 5, 6, 7 при захваті першої полоси K_1 та другої полоси (абсолютне $K_{\text{аб}}$ та відносне $K_{\text{від}}$) під час прокатки першої полоси наведені в таблиці.

Номер кліті	Коефіцієнт динамічності		
	Перша полоса		Друга полоса
	K_1	$K_{\text{аб}}$	$K_{\text{від}}$
5	2,2	1,2	1,5
6	4,3	1,6	2,4
7	4,2	1,8	2,5

Захват полоси валками клітей №№ 5, 6, 7 під час прокатки другої полоси також супроводжується коливаннями моменту з тією ж частотою. Однак коефіцієнт динамічності в клітях суттєво зменшився (див. таблицю). Це пояснюється тим, що кутові зазори в зчленуваннях лінії знаходяться в замкнутому стані, тому вони не впливають на максимальне пікове навантаження.

Дану особливість можна використовувати для оцінки впливу зазорів на M_{\max} , а також з метою діагностики зносу та зазорів.

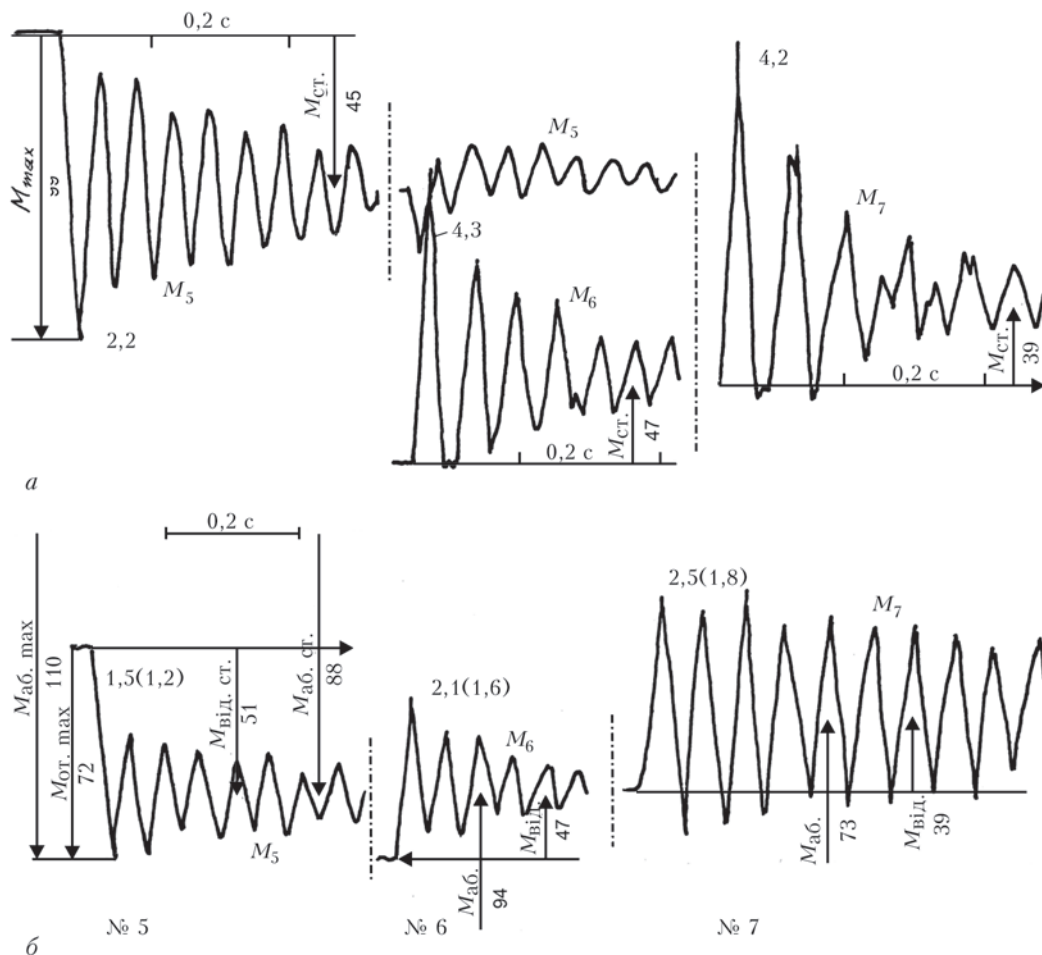


Рис. 1. Моменти сил пружності (кНм) в головних лініях клітей № 5, 6, 7 стану 250 при послідовному захваті першої (а) та другої (б) полоси з указанням коефіцієнтів динамічності: а – захват першої полоси в клітях №№ 5, 6, 7; б – захват другої полоси в іншому калібрі клітей №№ 5, 6, 7

Якщо визначення коефіцієнта динамічності при захваті першої полоси однозначне, то для наступних полос він може бути визначений двояко.

1. Береться до уваги абсолютне значення навантаження: $K_{\text{аб}} = M_{\text{абmax}} / M_{\text{абст}}$ для кліті № 6 при захваті другої полоси $K_{\text{аб6}} = 1,6$, для кліті № 7 $K_{\text{аб7}} = 1,8$.

2. Враховується відносне значення навантаження: $K_{\text{від}} = M_{\text{відmax}} / M_{\text{відст}}$. Для другої полоси (таблиця) $K_{\text{від6}} = 2,4$, $K_{\text{від7}} = 2,5$. Як бачимо, різниця в значеннях коефіцієнтів суттєва. Тому виникає необхідність визначитися, в яких випадках і де слід використовувати вказані значення коефіцієнта K і в чому їх інформативність.

Якщо мова іде про динаміку перехідного процесу, то динамічність лінії приводу слід характеризувати відносним коефіцієнтом $K_{\text{від}}$. В такому випадку при розрахунку максимального навантаження додатково враховують складову статичного навантаження, обумовлену моментом «зайнятого» металом калібру: $M_{\text{max}} = K_{\text{від}} \cdot M_{\text{відст}} + M_{\text{ст}}$. При захваті наступної полоси коливання моменту відбуваються відносно нового значення статичного навантаження.

Коефіцієнт $K_{\text{від}}$ залежить від динамічних властивостей лінії приводу, в той же час як коефіцієнт $K_{\text{аб}}$ залежить від абсолютного навантаження: чим останнє більше (для даної системи), тим він менший. Отже, для визначення $M_{\text{абmax}} = K_{\text{аб}} \cdot M_{\text{відст}}$ необхідно знати відзначену залежність. В цьому полягає незручність його застосування. На відносну динамічну складову навантаження та $K_{\text{від}}$ при захваті першої полоси, як відзначалося, впливають знос та кутові зазори в зчленуваннях, породжені їми. При захваті другої полоси цей вплив відсутній, оскільки зазори замкнуті. Тому при використанні коефіцієнта $K_{\text{від}}$ можна оцінити вплив зазорів. З виразу для $K_{\text{від}}$ легко отримати відносну динамічну складову моменту сил пружності $\delta M_{\text{д}} = \Delta M_{\text{дmax}} / M_{\text{ствід}} = K_{\text{від}} - 1$. Для першої полоси згідно таблиці в кліті № 6 $\delta M_{\text{д6}} = 3,3$, для другої – $\delta M_{\text{д6}} = 1,4$. Відношення $n_6 = \delta M_{\text{д6}} / \delta M_{\text{д6}} = 2,4$ показує, у скільки разів збільшується відносна динамічна складова через вплив зазорів в кліті №6. Аналогічно для кліті № 7: $n_7 = 2,1$. Використовувати значення $K_{\text{аб}}$ для цих цілей не є можливим. Якщо періодично вимірювати момент в суміжних клітях при

захваті першої полоси (нитки) в одному з калібрів, а потім другої полоси в іншому калібрі в той час, коли перша полоса прокатується, то за значенням коефіцієнта n можна відслідкувати розвиток зносу та зазорів в зчленуваннях та приходити до певних діагностичних висновків відносно зміни технічного стану ліній головного приводу в клітках з двох- та чотирьохнитковою прокаткою [1, 2].

Висновки

1. В клітках з багатонитковою прокаткою формуються суттєві динамічні процеси не тільки при захваті першої полоси, але й наступних полос.

2. Для розрахунку абсолютного максимального динамічного навантаження в лінії приводу під час заповнення інших калібрів та коефіцієнта динамічності запропоновано брати до уваги значення відносного максимального та статичного навантаження, а також складову навантаження від прокатки інших полос. Такий підхід дозволяє точніше враховувати змінну складову моменту при розрахунках на міцність та довговічність обладнання.

3. Наведені види перехідних процесів з урахуванням частоти та затухання коливань, коефіцієнта динамічності можуть бути використані для ідентифікації математичних моделей динаміки захвату – виходу полос при багатонитковій прокатці.

4. Результати періодичних вимірювань крутячого моменту за допомогою тензорезисторів при захваті полоси в першому калібрі, а потім в інших калібрах дозволяють діагностувати стан лінії приводу в частині зносу та зазорів.

Список літератури

1. Веренев В.В. (2007) *Диагностика и динамика прокатных станов*. Днепропетровск, ИМА–пресс.
2. Веренев В.В. (2014) *Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах*. Никополь, СПД Фельдман О. О.

References

1. Verenev, V.V. (2007) *Diagnostics and dynamics of rolling mills*. Dnepropetrovsk, IMA–press [in Russian].
2. Verenev, V.V. (2014) *Lowering of dynamic loads and diagnostics of broadband mills in transient modes*. Nikopol, SPD Feldman O.O. [in Russian].

DYNAMICS AND DIAGNOSTICS OF CLEARANCES IN MULTI-STAND ROLLING

A.V. Baglay¹, V.V. Verenev²

¹SE «DIAMECH-UKRAINE». 19 Kirgizska str., 61105, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: baglay@diamech.com.ua

²Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of NAS of Ukraine, 1 Academician Starodubov Square, 49050, Dnipro, Ukraine.

E-mail: office.isi@nas.gov.ua

The types of transients on the torque in three stands of a small-grade mill at two-thread rolling are presented. Their features during the capture of the first strip and then the second strip are described. A method is proposed for calculating the coefficient of dynamism and the maximum peak load, when the next strips enter the rolls under load. The possibility of determination of the technical condition of the drive line in terms of wear and clearances is shown. 2 Ref., 1 Tabl., 1 Fig.

Keywords: strip capture, caliber, two-thread rolling, torque, oscillations, clearance, drive line, dynamism factor

Надійшла до редакції 10.07.2020

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.15407/tdnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111
doi.org/10.15407/as
Передплатний індекс 70031



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.15407/sem
Передплатний індекс 70693

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України

(380-44) 200-8277
journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Л.М. ЛОБАНОВУ – 80!



29 вересня виповнилось 80 років Лобанову Леоніду Михайловичу, Академіку НАН України, доктору технічних наук, професору, Академік-секретарю Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України, заступнику директора з наукової роботи Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

У 1962 р. Л.М. Лобанов закінчив факультет промислового та цивільного будівництва Київського інженерно-будівельного інституту, а у 1968 р. – вечірнє відділення механіко-математичного факультету Київського державного університету.

З 1963 р. працює в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. З 1985 р. – завідувач відділу оптимізації зварних конструкцій нової техніки та заступник директора з наукової роботи.

У 1969 р. Л.М. Лобанов захистив кандидатську дисертацію, а в 1984 р. – дисертацію на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук. У 1991 р. Леоніду Михайловичу надано звання професора. У 1990 р. Л.М. Лобанов обрано членом-кореспондентом Академії наук УРСР, у 1997 р. – академіком Національної академії наук України, а у 2015 р. – академіком-секретарем Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України.

Л.М. Лобанов – відомий вчений у галузі матеріалознавства, міцності матеріалів і зварних конструкцій, його праці присвячені дослідженню поведінки матеріалів при зварюванні, розвитку теорії зварювальних напружень і деформацій, розробці методів дослідження і регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань, створенню високоефективних зварних конструкцій нової техніки та розробленню методів і засобів їх діагностики.

Велике наукове і практичне значення мають роботи Л.М. Лобанова з підвищення міцності, якості і точності виготовлення зварних конструкцій в аерокосмічній промисловості, суднобудуванні, енергетичному машинобудуванні, будівництві. Широке визнання одержали його праці, присвячені розробленню методів лазерної інтерферометрії для дослідження якості і напружено-деформованих станів зварних з'єднань. Завдяки працям Л.М. Лобанова та його учнів сформовано новий науковий напрям – бездеформаційне зварювання конструкцій.

Під його науковим керівництвом виконано комплекс фундаментальних досліджень в галузі міцності конструкційних матеріалів і зварних з'єднань, розвинуті наукові підходи для забезпечення надійності і довговічності зварних конструкцій та оцінки їх залишкового ресурсу,

створені нові типи високоефективних зварних конструкцій, включаючи легкі будівельні конструкції, важконавантажені конструкції із високоміцних сталей, унікальні конструкції перетвореного об'єму космічного призначення.

За участю Л.М. Лобанова розроблено та введено в практику Державні стандарти України, які регламентують вимоги до якості зварних конструкцій і технологій їх виготовлення, організовано систему сертифікації зварювальних технологій, матеріалів та обладнання.

Л.М. Лобанов – автор понад 800 наукових праць, серед яких 8 монографій та книжок, більше 90 авторських свідоцтв і патентів. Він створив визнану наукову школу в галузі зварних конструкцій. Підготував 10 докторів та 17 кандидатів технічних наук.

Він проводить велику науково-організаційну роботу як голова Українського і Міжнародного технічних комітетів із стандартизації в галузі зварювання і споріднених технологій; голова секції «Зварні конструкції» вченої ради Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона; головний редактор журналу «Технічна діагностика і неруйнівний контроль», член редколегії низки науково-технічних вітчизняних і закордонних журналів, заступник голови Українського товариства з механіки руйнування конструкцій, член Національного комітету України з технічної та прикладної механіки та Європейського товариства з цілісності конструкцій (ESIS), член Американського зварювального товариства, член Комітету державних премій в галузі науки і техніки України.

За розроблення та впровадження нових фізичних методів дослідження й вдосконалення металургійних процесів і конструкцій нової техніки Л.М. Лобанову присуджено премію Ради міністрів СРСР за 1981 р. У 1994 р. за цикл наукових праць «Теорія розрахунку просторових конструкцій будівель і споруд на статичні та динамічні навантаження» йому присуджено Державну премію України в галузі науки і техніки. Нагороджений орденами: «Ярослава Мудрого V ст.» (2018), «За заслуги» I (2014), II (2009), III (1997) ступенів, «Знак пошани» (1982), відзнакою НАН України «За наукові досягнення» (2007), а також медалями, зокрема, за участь у космічній діяльності – медаллю Ю.В. Кондратюка (1997). За цикл робіт з питань міцності, діагностики та подовження ресурсу зварних конструкцій відзначений премією ім. Є.О. Патона (2004), почесним золотим знаком Польського науково-технічного товариства (2014), Заслужений діяч науки і техніки України (2004).

Сердечно вітаємо ювіляра, бажаємо йому міцного здоров'я, творчої активності, довголіття та благополуччя.

*ІЕЗ ім. Є.О. Патона,
редколегія журналу «Технічна діагностика та
неруйнівний контроль»*

В.О. ЦЕЧАЛЮ – 90!



Колективи Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та ТОВ «Технічний комітет «Спецмонтаж», правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, редколегія журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» від щирого серця поздоровляють з 90-річним ювілеєм Віктора Олександровича Цечалю!

В.О. Цечаль закінчив фізичний факультет Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка в 1953 р. за спеціальністю фізик-дослідник і вся його трудова та творча діяльність пов'язана з дослідженнями та розробками в галузі фізичних методів неруйнівного контролю.

Більше 20 років В.О. Цечаль працював в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, де в 50-х роках Б.Є. Патоном було започатковано розвиток методів та засобів неруйнівного контролю.

На основі виконаних В.О. Цечалем та колективом лабораторії №28 робіт було розроблено нові технології та апаратура неруйнівного контролю виробів з подальшим впровадженням на підприємствах країни.

В.О. Цечалем було теоретично обґрунтовано сегментний відбивач як модель дефекту для еталонування чутливості ультразвукового контролю (запропонований та внесений до ГОСТ 14782 спільно з НДІХімашем та НДІ мостів ЛПЖТа. ГОСТ не втратив актуальності і в наш час).

Більш як 43 роки В.О. Цечаль працює в галузі монтажних та спеціальних будівельних робіт, з 1977 р. – в інституті «Укрспецмонтажпроект»,

з 1995 р. – в ТОВ «Технічний комітет «Спецмонтаж»; займається розробкою та впровадженням методів неруйнівного контролю, проводить велику роботу з підготовки кадрів, очолює Атестаційний центр неруйнівного контролю ТК «Спецмонтаж».

В.О. Цечаль – спеціаліст третього рівня кваліфікації з ультразвукового, радіаційного, магнітного та капілярного контролю.

Він є автором як наукових, так і методичних робіт. В.О. Цечаль приділяє велику увагу проблемі переходу організацій, підприємств на європейські та міжнародні стандарти на заміну вітчизняних нормативних документів. Його рекомендації оприлюднені в статтях та доповідях на конференціях і семінарах з неруйнівного контролю, беззмінним учасником яких він є з початку своєї трудової діяльності і до теперішнього часу.

Віктор Олександрович підтримує ділові зв'язки з багатьма спеціалістами, науково-дослідними організаціями та спеціалізованими підприємствами, що дозволяє йому знаходитись на передових позиціях науки і техніки. Він ніколи не замикається в собі, завжди відкликається на події, що відбуваються, і на діяльність колег, причому не тільки прозою, але й віршами. Періодично публіковані та неопубліковані його твори і поетичні портрети дишають доброзичливістю та добрим гумором.

Щиро бажаємо Вам, вельмишановний Вікторе Олександровичу, активного творчого довголіття, сімейного добробуту, любові, поваги оточуючих та успіхів у всіх справах.

Нехай не вичерпуються Ваші талант та прищипані Вам життєва мудрість!



МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ»

14-18 вересня 2020 року в Одесі в готелі «Аркадія» відбулась XXIII міжнародна конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану», яка була організована Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, Українським товариством неруйнівного контролю і технічної діагностики та Міжнародною Асоціацією «Зварювання». Інформаційну підтримку конференції надали журнали «Автоматичне зварювання» та «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Перед оргкомітетом конференції стояло складне завдання – організація і проведення конференції в непростих умовах епідемії, обмеження спілкування та пересування на транспорті, закриття кордонів України. В цих умовах вирішальною стала підтримка генерального спонсора конференції ПрАТ «УкрНДІНК» (директор Луценко Г.Г.). А колектив готелю «Аркадія» створив умови для комфорту та безпеки учасників конференції, надавши просторий конференц-зал, додаткову кількість медичних масок та дезінфікуючої рідини.

Конференцію відкрив вітальним словом академік НАН України, в.о. директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона акад. Кривцун І.В. Він відзначив значну роль неруйнівного контролю та моніторингу технічного стану в промисловості, будівництві та на транспорті в сучасній Україні. З привітаннями також виступили Луценко Т.М. (заст. директора ПрАТ «УкрНДІНК», м. Київ), Ткаченко А.А. (директор «INTROSKOP NDT SRL», м. Кишинів, Республіка Молдова), Мешков С.М. (директор НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків).

Конференція хвилиною мовчання віддала шану колегам, що пішли з життя в останній рік: академіку Патону Б.Є., проф. Білокуру І.П., докт. Тетерку А.Я., Мозговому О.В., Бухенському В.М. Разом з тим конференція привітала ювілярів Цечала В.О. (90 років) та Шевченка І.Я. (80 років).

В пленарних засіданнях конференції взяли участь 40 учених та спеціалістів з України та Республіки Молдова. На них було заслухано 20 доповідей. Ще 21-у стендову доповідь було представлено авторами, які з різних причин не змогли приїхати в Одесу. В цілому на конференцію подали доповіді або брали участь в роботі без доповіді представники 26-и підприємств та організацій з 15-и міст. Тези доповідей, що були подані на конференцію, видано окремою збіркою. Її співавторами стали 75 фахівців.

Одночасно працювала виставка засобів та матеріалів неруйнівного контролю та технічної діагностики, на якій 8 провідних підприємств України демонстрували свої найкращі розробки останніх років та пропонували передові технології і обладнання від своїх закордонних партнерів з усього світу.

ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ. Ветерани-дефектоскопісти пам'ятають «Всесоюзний науково-дослідний інститут неруйнівного контролю НВО «Волна» з м. Кишинева. Колись це був головний інститут з розробки ультразвукових дефектоскопів та автоматизованих систем контролю. В його розбудову вніс вклад і акад. Патон Б.Є. В 1990-х роках в ньому утворилось кілька приватних фірм, які успішно працюють в Молдові та Росії. До речі, Луценко Г.Г та Луценко Т.М, спон-





сори нашої конференції, починали свою трудову діяльність саме там. Сьогодні, після реорганізацій та акціонування, це «INTROSKOP NDT SRL», а його директор д.т.н. Ткаченко А.А. виступив з розгорнутою доповіддю «Розвиток методів і засобів ультразвукового контролю при виробництві електрозварних труб великого діаметру». В доповіді розглянуті значущі операції технологічного потоку виробництва електрозварних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів, включаючи важливі контрольні операції, та представлені установки ультразвукового контролю зварного шва та кінців труб на різних стадіях потоку. Було досліджено та розроблено методи підвищення інформативності автоматизованого УЗК зварного шва, що включають способи забезпечення управління положенням строб-імпульсу при наявності поперечних зміщень шва та зміни кута вводу ультразвукових коливань в метал стінки труби; способи стеження за зварним швом; ефективні способи реєстрації сигналів від дефекту в умовах наявності різного роду завад, що співпадають за часом із зонами контролю; визначення виду виявлених дефектів комбінованим способом.

Чотири рази протягом конференції виходив на трибуну к.т.н. Мешков С.М., директор НТЦ «Термоконтроль» ХНУРЕ, представник відомої Харківської школи теплового неруйнівного контролю д.т.н., проф. Стороженка В.О. В своїй першій доповіді «Досвід НТЦ «Термоконтроль» в області теплового неруйнівного контролю» він розповів про дослідження і розробки технологій теплового неруйнівного контролю. За 40 років свого існування колектив НТЦ впровадив десятки технологій та обладнання у розвиток авіакосмічної, енергетичної, нафтогазової та інших галузей промисловості України. Свої наступні виступи він присвятив висвітленню нових розробок, що стосуються конкретних важливих об'єктів:

- «Застосування теплового методу для дефектоскопії трубопроводів АЕС»,



- «Термографічне діагностування стану газоперекачуючого обладнання»,
- «Застосування теплобачення в енергозберігаючих технологіях».

Спільну доповідь від Одеського припортового заводу та Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона представив начальник відділу технічного нагляду ОПЗ Ободовський Б.М. – **«Використання результатів акустико-емісійного моніторингу технічного стану аміакосховищ Одеського припортового заводу при підготовці та проведенні капітального ремонту»**. Він зазначив, що на ОПЗ приділяється велика увага забезпеченню безпечної експлуатації відповідальних промислових об'єктів. На заводі використовуються сучасні методи та обладнання контролю та діагностики їх стану, в тому числі застосовуються системи АЕ моніторингу аміакосховищ, що безперервно працюють вже майже 20 років. Мета застосування АЕ моніторингу аміакосховищ: визначення зон підвищеної АЕ активності, відстеження в реальному часі динаміки АЕ процесів на резервуарах, оцінка ступеня небезпеки зареєстрованих кластерів АЕ подій згідно з нормативними документами та видача попереднього прогнозу залишкового ресурсу резервуарів, рекомендації щодо подальшого режиму експлуатації сховищ аміаку, оперативне оповіщення відповідного персоналу для своєчасного реагування, видача інформації щодо координат та ступеня небезпеки зареєстрованих джерел АЕ (у вигляді таблиць, графіків та локалізація їх на загальній схемі аміакосховищ) для проведення додаткового контролю неруйнівними методами при проведенні ремонту. Автоматизовані системи ЕМА, розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України спільно з угорськими фахівцями, визначають ступінь небезпеки стану об'єктів з локалізацією місць можливого руйнування, прогнозують руйнівне навантаження при поточних умовах експлуатації, оцінюють залишковий ресурс конструкцій. Роботи проводяться у тісному контакті з фахівцями ОПЗ.

Директор науково-виробничого підприємства «Діамех-Україна» Баглай А.В. зробив доповідь «Впровадження автоматичної системи контролю та діагностики технічного стану вентиляторів газоочищення мартенівських печей». Така система впроваджена на ПАТ «Запоріжсталь» і виконує аналіз технічного стану підшипників та з'єднувальних муфт. Він також зробив два коротких повідомлення – «Динаміка та діагностика зазорів у клітках з багатонитковою прокаткою» та «Використання особливостей технологій та режимів роботи прокатних клітей у діагностичних цілях».

Надзвичайно цікавими та інформативним були виступи представників підприємств, що брали участь у виставці, що своєю працею створюють засоби технічного контролю.

Доповідь заст. директора УкрНДІНК Луценко Т.М. «Стратегія розвитку УкрНДІНК та інших компаній Асоціації «ОКО» в умовах глобалізації ринку» змусила багатьох колег подивитись на нашу діяльність з економічного боку. УкрНДІНК має великий науково-дослідний досвід та потенціал, які дозволяють розробляти сучасні засоби неруйнівного контролю та досліджувати методи контролю. У тісному співробітництві з виробничими підприємствами Асоціації «ОКО» («Ультракон-Сервіс», «Промприлад») УкрНДІНК успішно впроваджує останні розробки в провідних галузях промисловості. Виробничими організаціями Асоціації «ОКО» налагоджено виробництво портативних дефектоскопів для ручного контролю, механізованих та автоматизованих засобів контролю ультразвуковим, вихрострумовим, акустико-емісійним, магнітопорошковим методами і методом вібродіагностики. На сьогоднішній день прилади та системи, розроблені Асоціацією «ОКО», використовуються майже у шістдесяті країнах світу, таких, як: США, Німеччина, Туреччина, Китай, Японія, Канада, Франція, Сінгапур, Індонезія, Італія, країни СНД та інші.

У доповіді провідного спеціаліста УкрНДІНК Дідика А.В. «Комплексний контроль зварних з'єднань за технологіями ФАР + TOFD» розгля-

нуто як переваги, так і недоліки кожної з технологій – ФАР і TOFD (дифракційно-часової технології) при контролі зварних з'єднань. Показано можливості і переваги їх одночасного використання. Описано систему OKOSCAN-14-PAUT, в якій реалізовано суміщену технологію УЗК – ФАР + TOFD. Виділено переваги її застосування для контролю зварних з'єднань магістральних трубопроводів, резервуарів, цистерн та інших протяжних зварних з'єднань.

В другій доповіді «Актуальні розробки підприємства «УкрНДІНК» в галузі вихрострумового контролю» Дідик А.В. розповів про сучасні розробки УкрНДІНК в сфері вихрострумового контролю та надав приклади реалізації засобів неруйнівного контролю в різноманітних виробничих секторах. Розглянуто також пріоритетні напрямки застосування обладнання для вихрострумового контролю та шляхи розвитку та визначення сучасних тенденцій цього методу.

Новий, незнайомий для багатьох погляд на рентгенографію виклав директор НВФ «Діагностичні прилади» Павлій О.В. в доповіді «Використання зеленочутливих рентгенівських плівок для дефектоскопії зварних з'єднань». На основі досліджень та технічних характеристик він доводить, що застосування зеленочутливих плівкових систем відкриває нову сторінку в класичній промислової радіографії. Впровадження подібної технології несе істотні переваги: знижує трудомісткість контролю, радіаційне навантаження на персонал, підвищує швидкість робіт.

В другій доповіді «Українським підприємствам – найкращі засоби неруйнівного контролю від НПФ «Діагностичні прилади» Павлій О.В. розповів про численні засоби технічного контролю від провідних світових виробників, що постачає фірма на вітчизняний ринок. Відчувалась особлива прихильність доповідача до портативних моноблочних рентгенівських апаратів. Він також прокоментував розробку нових екологічних матеріалів для капілярної і магнітопорошкової дефектоскопії, що не містять шкідливих компонентів.





Провідний спеціаліст НВФ «Ультракон» Глабець С.М. в доповіді «Нові розробки НПФ «Ультракон» розповів про власні розробки фірми. Особливу увагу він приділив портативному ультразвуковому дефектоскопу УД2-50 – результату багаторічних досліджень та випробувань. Це компактний багатофункціональний прилад з яскравим кольоровим екраном і акумуляторним живленням, що забезпечує тривалу роботу без підзарядки.

Провідний спеціаліст ТОВ «Хімлаборреактив» Піщанюк Б.В. у своєму виступі «ХЛР – рішення для лабораторій» розповів про нещодавно створений напрямок в роботі підприємства – контроль якості в промисловості (фізико-механічні випробування, твердометрія, пробопідготовка, корозійні випробування, мікроскопія, випробування лакофарбових і будівельних матеріалів, обладнання для неруйнівного контролю).

Щупак С.О., відповідальний секретар Технічного комітету стандартизації 78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», у своїй доповіді «Стандартизація і сертифікація в сфері неруйнівного контролю в Україні» розповіла про новини стандартизації і сертифікації, про структуру, напрямки діяльності та основні досягнення ТК 78. Слід відзначити, що на сьогодні в Україні введено в дію близько 200 міжнародних та європейських стандартів в галузі неруйнівного контролю. Також прийняті всі чинні міжнародні та європейські стандарти, що встановлюють вимоги до підготовки, атестації та підтвердження кваліфікації персоналу НК, а також вимоги до організацій, які надають такі послуги.

Цікавість викликали об'єкти контролю, про які розповів у своєму виступі Посипайко Ю.М. з Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона – «Моніторинг технічного стану резервуарів на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський». Він відзначив, що в 2016 році розпочато, а в 2019 році продовжено роботи з моніторингу технічного стану та профілактичного ремонту резервуарів на УАС «Академік Вернадський» на острові Галіндез в архіпелазі Аргентинських островів. На станції знахо-

дяться два резервуари, призначені для приймання і зберігання дизельного пального: РГС-150 (1979 року) і РВС-200 (2007 року). Аналіз результатів технічного діагностування стану резервуарів дозволив зробити висновок, що всі елементи резервуарів знаходяться в задовільному технічному стані, стінки, днище та покрівля не мають недопустимих деформацій чи дефектів, що можуть вплинути на надійність експлуатації та працездатність резервуарів. На металоконструкціях резервуара не виявлені сліди протікання пального, що свідчить про герметичність внутрішньої оболонки. Незначні відступи від вимог проекту та чинних норм не впливають на його працездатність.

Посипайко Ю.М. у другому виступі «Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики: 30 років від дня заснування» розповів про історію заснування Товариства та про основні напрямки його діяльності (www.usndt.com.ua).

СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ. Цілий ряд доповідей не виголошувались на конференції, а були віднесені до стендових – їх автори з різних причин не змогли бути присутні в залі засідань. Тези цих доповідей теж включені до збірки.

Організації та автори, що надали найпомітніші стендові доповіді:

- Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона (м. Київ) – 7 доповідей (автори Троїцький В.О., Михайлов С.Р., Бондаренко О.Г., Карманов М.М., Глуховський В.Ю., Пастовенський Р.О. та інші);
- Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка (м. Львів) – 7 доповідей (автори Назарчук З.Т., Учанін В.М., Юзефович Р.М., Джала Р.М., Рибачук В.Г. та інші);
- Харківський національний університет радіоелектроніки (м. Харків) – 3 доповіді (автори Стороженко В.О., Мягкий А.В. та інші);
- Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (м. Київ) – 1 доповідь (автори Куц Ю.В., Редька М.О.);

- Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу – 1 доповідь (автори Середюк О.Є., Криницький О.С.);
- Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна (м. Дніпро) – 1 доповідь (автор Пуларія А.Л.);
- Одеський авіаремонтний завод (м. Одеса) – 1 доповідь (автор Шебордаєв О.М.).

УЧАСНИКИ ВИСТАВКИ ПРИЛАДІВ, ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ.

- Група компаній «Асоціація «ОКО», керівники Луценко Г.Г. і Луценко Т.М.:
- УкрНДІНК (www.ndt.com.ua, www.autondt.com) займається розробкою і створенням технологій та засобів неруйнівного контролю, їх інтеграцією в технологічні процеси виробництва. Інститут було створено у 2004 році. За цей час він перетворився у центр наукових досліджень, об'єднання провідних вчених та спеціалістів, які присвятили себе вдосконаленню методів, технологій та засобів НК. Механізовані та автоматизовані системи, які розробляє УкрНДІНК, застосовуються у різних галузях промисловості, дозволяючи контролювати залізничні рейки, колісні пари, осі, авіаційні колеса, труби, зварні шви тощо при виготовленні та експлуатації.
- «Ультракон-сервіс» (www.ultracon-servise.com.ua) є відомим розробником засобів неруйнівного контролю, першою компанією в Україні, яка зайнялася виробництвом обладнання НК. Підприємство вже протягом більш ніж 27 років виробляє портативні прилади і автоматизовані системи НК, серед яких є розробки, які не мають аналогів у світі. Підприємство пропонує своїм замовникам виготовлення обладнання НК «під ключ» – на даний момент дефектоскопи та автоматизовані системи, які розробляє «Ультракон-Сервіс», успішно працюють у майже 60 країнах по всьому світу, створюючи Україні репутацію провідного експерта та надійного партнера у галузі неруйнівного контролю.
- «Промприлад» (www.promprilad.com.ua) займається розробкою та виробництвом обладнання ультразвукового, вихрострумового, акустико-емісійного, магнітного, візуально-оптичного, електромагнітно-акустичного та капілярного методів неруйнівного контролю. Прилади та системи НК, які розробляються НВФ «Промприлад», використовуються для суцільного контролю обладнання, перевірки окремих виробів та ділянок, виявлення дефектів та пошкоджень, підтвердження даних, отриманих при первинних виробничих або експлуатаційних інспекціях, тощо.
- НВФ «Діагностичні прилади», керівник Павлій О.В. (www.ndt-ua.com) більше 20 років допома-

гає підприємства України вирішувати завдання контролю якості продукції і діагностування технічних об'єктів. Фірма поставляє обладнання і матеріали для неруйнівного контролю, розробляє технології, виконує роботи з діагностування, навчає персонал. НВФ «Діагностичні прилади» представляє в Україні світових лідерів: Olympus, MR-Chemie, Teledyne ICM, Galdabini, Ernst, K+D Flux-Technic, Carestream, Spectroline, Parker.

- НВФ «Новотест», керівник Черкасов С. С., (www.novotest.ua) – це прилади і системи контролю якості від виробника. У виробничій програмі фірми твердоміри, товщиноміри, дефектоскопи металів, пластмас, покриттів і багато іншого. Фірма є постійним учасником міжнародних виставок і її прилади та обладнання працюють в багатьох країнах світу.
- НВФ «Ультракон», керівник Павлій І.В. (www.ultracon.com.ua) пропонує підприємствам комплексне обслуговування: поставку широкого спектру обладнання для неруйнівного контролю та технічної діагностики, впровадження обладнання, консультативне і методологічне сприяння в процесі експлуатації. Для вирішення завдань підвищення безпеки і якості, що стоять безпосередньо перед підприємствами, спеціалісти фірми допоможуть оптимально підібрати, придбати, ввести в експлуатацію необхідне обладнання неруйнівного контролю.
- ТОВ «Хімлаборреактив» (www.hlr.ua) – багатопрофільна компанія, що комплексно оснащує лабораторії (обладнання, меблі, реактиви, посуд і т. п.). Департамент неруйнівного контролю пропонує лінійку найсучасніших дефектоскопів для ультразвукового і вихрострумового контролю та аналізу матеріалів і захисних покриттів, представляє в Україні засоби технічного контролю фірм Zetec (Франція), Guided Ultrasonics (Великобританія), Helmut Fischer (ФРН), Sonotec (ФРН).
- ПАТ Одеський припортовий завод (www.opz.odessa.net) демонстрував на своєму стенді систему акустико-емісійного діагностування технічного стану резервуарів-аміакосховищ, встановлених на заводі.

Оргкомітет вдячний спонсору – Українському науково-дослідному інституту неруйнівного контролю, учасникам виставки, авторам доповідей та всім, хто приїхав на конференцію в Одесу. Бажано всім професійних успіхів та особистого щастя. Ми сподіваємось, що конференція, виставка та час, проведений в Одесі, були корисні для Вас. І ми ще не раз зустрінемося з Вами в цьому чудовому місті!

Ю.М. Посипайко, С.О. Щупак
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

ПЕРЕДПЛАТА 2021

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	пів року	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	240	720	1440	2880
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	240	480	960
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	240	480	960
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	520	1560	3120	6240

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделоллю.

**«The Paton Welding Journal» – переклад журналу «Автоматичне зварювання» на англійську мову.

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

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2020 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2018 рр.



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



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



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

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200x290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200x290 мм.

Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм. А5 – 185x130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель СМΥΚ, роздільна здатність 300 dpi.

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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

ВИДАВНИЦТВО

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