

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

*Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:*

**Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),**

А.Я. Недосека (заст. гол. ред.),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, С.А. Недосека

**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**

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

**З.Т. Назарчук**

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

**Г.І. Прокопенко**

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова

НАН України, м. Київ

**А.Г. Протасов**

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

**В.Р. Скальський**

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

**В.О. Стороженко**

Харківський національний університет радіоелектроніки

**В.О. Стрижало**

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка

НАН України, м. Київ

**В.М. Учанін**

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

**С.К. Фомічов**

НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 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: (044) 200-82-77, 205-23-90, 200-54-84

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

Свідцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до Переліку наукових фахових видань

України затвердженого Міністерством освіти і науки

України

**ЗМІСТ**

Збори присвячені 150-річчю від дня народження

Є.О. Патона ..... 3

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ**

**НЕДОСЕКА С.А., ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А.,  
НЕДОСЕКА А.Я., ЖУРАВЛЬОВ С.В., ОБОДОВСЬКИЙ Б.М.,  
САВЧЕНКО О.К., ЕПОВ С.Г.** Оцінка стану і прогнозування  
руйнівного навантаження при акустико-емісійних випро-  
буваннях посудин під тиском з обмеженим доступом до  
контрольованої поверхні..... 8

**ЮЗЕФОВИЧ Р.М., ЯВОРСЬКИЙ І.М., ДЗЕРИН О.Ю.,  
ТРОХИМ Г.Р., СТЕЦЬКО І.Г., МАЦЬКО І.Й.** Застосування  
спеціалізованого пристрою неруйнівного контролю для  
аналізу вібраційних сигналів підшипникових вузлів мето-  
дами взаємного нестационарного аналізу..... 17

**ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ**

**ТРОЇЦЬКИЙ В.О.** Перспективи радіаційного контролю  
магістральних трубопроводів та інших складних конструкцій..... 28

**ДМИТРИЄНКО Р.І., ЮХИМЕЦЬ П.С., ТОРОП В.М.,  
КИСІЛЬ І.М., ЄГОРЕНКО В.М.** Пошкоджуваність  
та ефективність проведення гідравлічних випробувань  
теплових мереж міста Києва ..... 37

**ГРУЗЕВИЧА В., НІКІФОРОВ Д.Л., ДЕРЕЧА Д.А., СКИРТА Ю.Б.**  
Дослідження впливу структурно-фазових перетворень на  
магнітні властивості металу..... 45

**БУССІ САЛАМ, СУЧКОВ Г.М., ПЛЕСНЕЦОВ С.Ю.** Елек-  
тромагнітно-акустичні перетворювачі з імпульсними  
джерелами поляризованого магнітного поля для контролю  
якості феромагнітних виробів ..... 51

**ІНФОРМАЦІЯ**

Міжгалузовий учбово-атестаційний центр  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона..... 57

Атестаційний центр з неруйнівного контролю  
при ІЕЗ ім. Є.О. Патона..... 59

Міжнародний науково-технічний центр забезпечення  
якості та сертифікації «ПАТОНСЕРТ»..... 61

Пам'яті О.В. Мозгового ..... 63

WireSense: дрововий електрод у якості датчика ..... 64

Видання журналу підтримують:

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

# EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU

**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**

**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 the NAS of Ukraine, Kyiv

**O.M. Karpash**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**L.I. Muravsky**

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

**Z.Th. Nazarchuk**

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

**G.I. Prokopenko**

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

**A.G. Protasov**

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

**V.R. Skalskiy**

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

**V.O. Storozhenko**

Kharkiv National University of Radio Electronics

**V.O. Stryzhalo**

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

**V.M. Uchanin**

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

**S.K. Fomichov**

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

**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 NASU,  
International Association «Welding» (Publisher)

**Address**

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU  
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kasymir Malevych Str.  
Tel./Fax: (044) 200-82-77, 205-23-90, 200-54-84  
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.

Certificate of state registration  
of KB 4787 dated 09.01.2001

# CONTENT

The meeting is dedicated to the 150<sup>th</sup> birthday of

E.O. Paton ..... 3

## SCIENTIFIC AND TECHNICAL

**NEDOSEKA S.A., YAREMENKO M.A., OVSIENKO M.A.,  
NEDOSEKA A.Ya., ZHURAVLJOV S.V., OBODOVSKII B.M.,  
SAVCHENKO O.K., EPOV S.G.** Evaluation of the state and  
prediction of breaking load at acoustic-emission testing of  
pressure vessels with limited access to controlled surface ..... 8

**YUZEFOVYCH R.M., JAVORSKYJ I.M., DZERYN O.Y.,  
TROKHIM G.R., STETSKO I.H., MATSKO I.Y.** Application  
of a specialized nondestructive testing device for analysis  
of vibration signals of bearing assemblies by the methods of  
mutual nonstationary analysis ..... 17

## INDUSTRIAL

**TROITSKII V.A.** Prospects for radiation control of main pipe-  
lines and other complex structures ..... 28

**DMYTRENKO R.I., YUKHYMETS P.S., TOROP V.M.,  
KYSIL I.N., YEHORENKO V.N.** Damageability and effective-  
ness of conducting hydraulic testing of heating systems  
of Kyiv city ..... 37

**GRUZEVICH A.V., NIKIFOROV D.L., DERECHA D.A.,  
SKIRTA Yu.B.** Investigation of the impact of structural-phase  
transformations on the metal magnetic properties ..... 45

**BUSSI SALAM, SUCHKOV G.M., PLESNETSOV S.Yu.**  
Electromagnetoacoustic transducer with pulsed sources  
of polarizing magnetic field for quality control of ferromagnetic  
products ..... 51

## INFORMATION

Paton Electric Welding Institute Training  
and Qualification Center ..... 57

Attestation Center of Non-Destructive Testing of E.O. Paton  
Electric Welding Institute ..... 59

International Scientific-and-Technical Center on Quality  
Assurance and Certification «PATOCERT» ..... 61

In memory of O.V. Mozhgovy ..... 63

WireSense: wire electrode as sensor ..... 64

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

## ЗБОРИ ПРИСВЯЧЕНІ 150-річчю ВІД ДНЯ НАРОДЖЕННЯ Є.О. ПАТОНА

5 березня 2020 р. у конференц-залі Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відбулися Загальні збори НАН України присвячені 150-річчю від дня народження всесвітньо відомого вченого в галузі мостобудування та зварювання академіка НАН України Євгена Оскаровича Патона. У зборах прийняли участь співробітники ІЕЗ, академічних інститутів, КПІ ім. Ігоря Сікорського та представники підприємств зварювальної індустрії України. У зборах також прийняв участь академік Борис Євгенович Патон, якого присутні привітали тривалими оплесками.

З привітанням до учасників Загальних зборів звернувся віце-президент Національної академії наук України академік **А.Г. Наумовець**. Він наголосив, що академік Євген Оскарович Патон, знаний і авторитетний фахівець з мостобудування та електрозварювання, фундатор і керівник першого в світі наукового інституту електрозварювання, засновник і керівник кафедр мостів та електрозварювання Київського Політехнічного інституту все своє життя присвятив інженерній, науковій та організаційній діяльності, підготовці молодих вчених і фахівців у галузі мостобудування та електрозварювання.

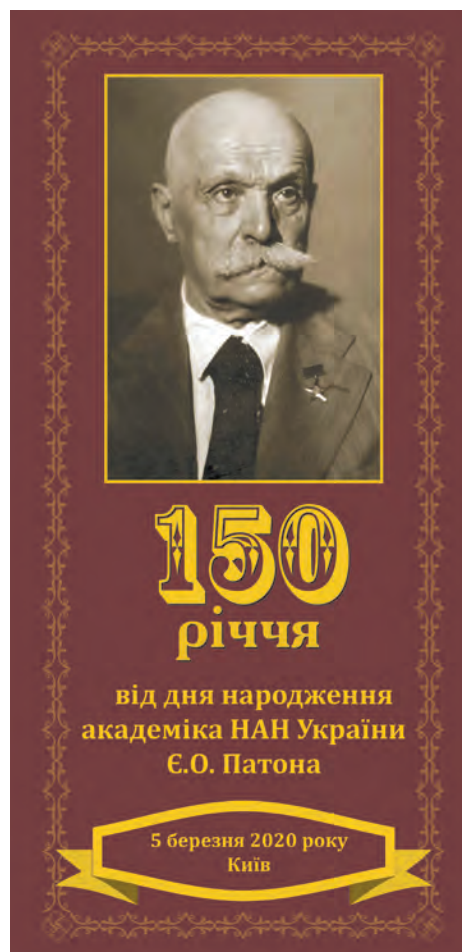
Наприкінці 20-х років ХХ століття Євген Оскарович Патон прийшов до твердого переконання, що технічний прогрес у виробництві металевих конструкцій у значній мірі буде визначатися використанням зварювання на заміну іншим способом нероз'ємного з'єднання деталей.

Євген Оскарович взяв за мету створити технологію електрозварювання та науково довести її перевагу. Вирішенню цієї задачі Євген Оскарович Патон присвятив другу половину своєї творчої діяльності.

У найкоротші терміни Євгеном Оскаровичем у створеному ним у 1934 р. Інституті електрозварювання були вирішені складні наукові проблеми: вивчено особливості роботи зварних конструкцій у стані напруження, що виникає в них у процесі виготовлення, розроблено методи розрахунку на міцність, створено раціональні технологічні конструкції.

Ці перші дослідження разом із багатьма наступними стали теоретичною основою науки про зварювання, перетворили її на потужне знаряддя технічного прогресу, привели до революційних зрушень у багатьох галузях виробництва – нафтохімічній, гірничо-видобувній, металургійній промисловості, та інших галузях.

На початку 1940 р. Євген Оскарович і його співробітники розробили новий спосіб зварювання ме-



талів – автоматичне дугове електрозварювання під флюсом. Це відкриття дозволило перейти від ручного зварювання до індустріального, механізованого високоякісного виробництва зварних конструкцій.

Плідна робота Євгена Оскаровича Патона у роки війни була особливо відзначена танкобудівниками. У важких умовах воєнного часу Патonom і його співробітниками були створені технологія та обладнання для зварювання броньованих корпусів танків, артилерійських снарядів, боєприпасів. Вперше у світі був налагоджений масовий випуск танків з корпусами, звареними автоматами.

Надалі наполеглива робота Євгена Оскаровича Патона перетворила створений ним метод автоматичного зварювання під флюсом у потужне знаряддя технічного прогресу. Широке впровадження автоматичного зварювання дозволило перейти до застосування у багатьох галузях виробництва високопродуктивних механізованих поточних ліній.

Наукові труди Євгена Оскаровича Патона заклали тверду основу для масового впровадження автоматичного зварювання у виробництво мостів. Про що красномовно свідчить перший найбільший



у світі цільнозварний шосейний міст імені Євгена Оскаровича Патона, збудований у Києві у 1953 р.

Євген Оскарович створив в Інституті електрозварювання злагоджений колектив, він став фундатором славнозвісної Патонівської школи, яка здобула величезний авторитет і широке визнання в світі.

За всіма здобутками Євгена Оскаровича Патона бачиться глибока переконаність у непересічному значенні науки в житті суспільства, його захопленість головною справою життя – наукою, цілеспрямованість і наполегливість у досягненні поставленої мети, унікальна працездатність і організованість. Його праця у науці – це як міст через все життя.

У своїй доповіді «Патони і Київський політехнічний інститут» ректор НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» академік **М.З. Згуровський** висвітлює «чи найславетнішу сторінку історії Київського політехнічного інституту», яка розпочалася у 1905 р., коли директор Київського політехнічного інституту імператора Олександра II К.О. Зворикін запросив молодого професора «Імператорського Московського інженерного училища шляхів сполучень» Євгена Оскаровича Патона працювати у КПІ.

На той час Євген Оскарович вже був відомим вченим мостобудівником, автором знаменитого двотомника «Залізні мости», мав чин колезького радника, був удостоєний ордена Анни 3-го ступеня «в нагороду подвигів, совершаемых на поприще госслужбы».

Рішення переїхати в Київ стало доленосним як для родини Патонів, так і для української промисловості, науки і освіти. Талант Євгена Оскаровича поєднувати якості організатора, вченого та викладача відіграв визначальну роль в подальшій долі КПІ. Його система підготовки інженерів нового типу, яка ґрунтувалася на тріаді «Наука – Виробництво – Кадри», вивела КПІ на рівень провідних вищих навчальних закладів у Російській Імперії.

На початку роботи у КПІ Євгена Оскаровича вразила так звана «умоглядність викладання», коли студентам все пояснювалося на словах, без предметної демонстрації. І тому, коли в жовтні 1906 р. Євгена Оскаровича обрали деканом інженерного відділення, він доклав багато зусиль для відкриття нових лабораторій, обладнання навчальних кабінетів наочними посібниками, запрошення відомих професорів і вчених. І вже в наступному 1907 р. на інженерному відділенні було 6 спеціалізацій: архітектура, гідротехніка, залізниця, мости, санітарна техніка, земсько-міська справа.

Окремою великою заслугою Євгена Оскаровича Патона було створення і подальший розвиток Інженерного музею КПІ, прообразу нинішнього державного політехнічного музею України. Інженерним музеєм він керував впродовж семи років – з 1905 по 1912. Саме Євген Оскарович розробив

каталог експонатів, що стали надбанням музею. На той час їх було 1200. З його ініціативи музей був органічно інтегрований в навчальний процес. Під час лекцій викладачі користувалися моделями та зразками для наочного пояснення студентам складних з'єднань, зарубок, вузлів та різних конструктивних частин.

Для наочної демонстрації мостобудування в Інженерному музеї була розміщена унікальна експозиція дерев'яних мостів, виконаних у масштабі від 0,5 до 0,75 натуральної величини. Експозиція була настільки цікавою та корисною, що Московський інститут інженерів шляхів сполучень замовив комплект таких моделей, які були виготовлені для нього в Механічних майстернях КПІ.

Інженерний музей став основою для створення нових навчально-допоміжних підрозділів КПІ: мостової дослідної станції, кабінету моделей та відділення архітектури при музеї.

Також з ініціативи Євгена Оскаровича Патона у КПІ було відкрито кабінет мостів – для напрацювання нових інженерних рішень і виконання проєктів по них. В 1930 р. кабінет мостів, якому Євген Оскарович присвятив 26 років, був переданий до Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту під час його виділення з КПІ.

У 1906-1907 рр. Євген Оскарович Патон видає третій і четвертий томи курсу «Залізні мости», у 1910 р. – «Дерев'яні мости». Одночасно Євген Оскарович був одним з перших мостовиків у Російській Імперії, хто почав залучати студентів до роботи з проєктування реальних споруд. Найбільш відомими проєктами того часу, на яких Євген Оскарович виховав із студентів цілу плеяду майбутніх мостобудівників стали проєкт відомого в Києві пішохідного мосту через Петровську алею, побудованого у 1909-1910 рр. та проєкт Мухранського мосту через річку Куру в Тифлісі, побудованого у 1911 р.

14 квітня 1913 р. Євген Оскарович Патон був нагороджений Імператорським орденом Святого Рівноапостольного князя Володимира 4-го ступеня.

В роки Першої світової війни Євген Оскарович організував роботи з забезпечення армії засобами подолання водних перешкод, зокрема він вирішив проблему швидкої заміни знищених мостів. Маловідомим є той факт, що Євген Оскарович облаштував в маєтку свого старшого брата Михайла приватний госпіталь, в якому після поранення військовослужбовці проходили безкоштовне лікування. У вільний від навчального процесу час він обходив київські госпіталі, спілкувався з лікарями, складав списки поранених для відправки їх до брата в садибу Нова Ушиця.

Під час революції 1917 р. та громадянської війни, навчання у КПІ то припинялося, то відновлю-

валося, кількість студентів і викладачів зменшилась вдвічі, а їх матеріальні умови наблизилися до критичної межі. Для збереження інституту Євген Оskarович організував комітет виживання, який налагодив постачання продуктів із сільської місцевості та надавав допомогу тим, хто її вкрай потребував. Завдяки цьому викладачі та студенти КПІ, їхні сім'ї змогли пережити ті страшні незгоди.

Незважаючи на неймовірні складнощі, того часу, справу свого життя – зведення мостів – Євген Оskarович не припиняв. У 1920 р. він очолив проектування та будівництво на місці зруйнованого поляками Миколаївського Ланцюгового мосту – підвісного балочного мосту імені Євгенії Бош, який був відкритий 10 травня 1925 р.

У вересні 1921 р. з нагоди 25-річчя викладацької діяльності Євгена Патона Рада Механічного факультету КПІ організувала мостову дослідну станцію, названу його ім'ям. Станція призначалася для навчально-методичної роботи та давала студентам можливість брати участь у випробовуванні мостів на практиці.

На загал, спільно зі студентами та науковцями КПІ, підтверджуючи свій девіз «Наука – Виробництво – Кадри», Євген Оskarович Патон створив понад 35 проектів мостів, більшість з яких були втілені в життя.

У 1928 р. Євген Оskarович різко змінив напрям своєї роботи. Він дійшов висновку, що в проектуванні мостів досягнуто великих успіхів, але процес їх виготовлення надто трудомісткий, і для його спрощення він запропонував використання методу електрозварювання. Ця галузь тільки починала розвиватись на основі ідеї дугового електрозварювання Миколи Бенардоса. Але в баченні Патона вона мала стати принципово міждисциплінарною, ґрунтуючись на фізиці, математиці, механіці, металургії, електротехніці, науці про матеріали. Нова справа стала предметом особливого захоплення Євгена Оskarовича.

У 1929 р. Київський політехнічний інститут висунув свого професора для обрання членом Всеукраїнської академії наук. Першою важливою справою академіка Євгена Патона стало започаткування секції матеріалознавства в системі академії наук. Очоливши цю секцію він впродовж декількох років сформував напрям матеріалознавства, як стратегічний для української науки.

Завжди зберігаючи вірність мостобудуванню, Євген Оskarович повністю віддався справі становлення наукової школи зварювання. Для нової галузі була необхідною підготовка відповідних інженерних кадрів. Тому у 1935 р., вже як директор Інституту електрозварювання Всеукраїнської академії наук, Євген Патон організував на механічному факультеті КПІ кафедру зварювального вироб-

ництва та став її першим завідувачем. Провідні викладачі цієї кафедри, як і він сам, одночасно працювали науковими співробітниками Інституту електрозварювання. Заснована Євгеном Оskarовичем наукова школа «Фізико-хімічні і термо-деформаційні основи зварювання та споріднених процесів» і сьогодні є провідною науковою школою кафедри зварювального виробництва КПІ.

Наступною справою Євгена Патона було створення у 1948 р. зварювального факультету КПІ, як унікальної школи підготовки інженерів, що базувалася на загальнонауковому фундаменті математики, механіки, фізики, металургії, матеріалознавства і електротехніки.

За 72 роки зварювальний факультет КПІ став справжнім центром підготовки та перепідготовки висококваліфікованих інженерів-зварювальників. З його лав вийшло понад 6500 інженерів, 55 випускників факультету стали докторами наук, 160 – кандидатами наук, 7 – академіками Національної академії наук України.

На шану Євгена Оskarовича Патона у 2002 р. йому був споруджений пам'ятник роботи скульптора Олександра Скоблікова з вибитими на підніжжі словами «З надією я дивлюся на нашу талановиту молодь». Ці слова Євгена Оskarовича виявилися пророчими. Нові покоління київських політехніків вважають за честь вчитися на прикладі життєвого та трудового подвигу Патонів і ставати продовжувачами їх великих справ.



Академік Б.Є. Патон біля пам'ятника Є.О. Патону в НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Автор-скульптор О.П. Скобліков, 2002 р.



Повноту образу академіка Є.О. Патона можна скласти, лише розглядаючи його діяльність у комплексі як ученого, інженера-практика, педагога, державного та громадського діяча наголосив у своїй доповіді «Суспільне значення творчої спадщини академіка Євгена Оскаровича Патона» академік **О.С. Онищенко**.

Наукові відкриття, технічні та технологічні винаходи стають суспільною силою, коли знаходять широке застосування, вносять зміни у виробництво, побут, способи праці. Електрозварювання служить яскравим прикладом цього. Безперервні ініціативи Євгенія Оскаровича привели до того, що електрозварювання швидко стало та досі залишається загальноприйнятим робочим процесом на всіх ділянках народного господарства, а професія зварника – масовою та престижною.

Велике суспільне значення мала діяльність Євгена Оскаровича спрямована на утвердження в науці гідного статусу інженера та інженерної справи. На власному досвіді, зокрема на прикладі мостобудування та електрозварювання, Є.О. Патон довів, що технічні науки являють собою міждисциплінарні комплекси, де дослідження і впровадження їх результатів зливаються в єдине ціле.

Центральне місце в педагогіці життя академіка займав культ праці. Працю він вважав основою життя. «Праця, – говорив він, – завжди була найголовнішим у моєму житті». Тверде місце в трудовій етиці академіка Є.О. Патона займали оптимізм, упевненість у досягненні науково поставленої мети, долання невіри, сумнівів, розчарувань і категоричне неприйняття поразницьких настроїв. Він справедливо вважав, що наукова думка, помножена на експеримент і волю дослідника, обов'язково знайде вдале рішення нової проблеми.

Інтелектуальний авторитет, талант організатора науки і трудова етика академіка Є.О. Патона породили конкурентні на світовому рівні науково-дослідний інститут, великі наукові школи мостобудівників і електрозварників, когорта видатних учених, інженерів, конструкторів, успішних керівників промислових підприємств і галузей, гігантських новобудов. Як приклад можна назвати Івана Гавриловича Александрова – учня Євгена Оскаровича, який став автором проекту Дніпрогесу, проекту генеральної схеми електрифікації нинішніх країн Центральної Азії, одним з творців Арало-Байкало-Амурської магістралі.

Масштаб особистості академіка Є.О. Патона, ідеї та технології якого революціонізували технічну сферу країни, сам по собі мав суспільне значення. Але Євгену Оскаровичу доводилося і брати безпосередню участь у розв'язанні державних проблем як депутату Верховної Ради СРСР, депутату Київської міської ради, державному раднику та члену машинобудівної ради при РНК СРСР, члену Президії, голові Відділу технічних наук і віце-президенту АН УРСР. А ще на початку трудової діяльності (1905 р.) він був членом Мостової комісії при інженерній раді тодішнього Міністерства шляхів сполучення.

Після закінчення війни Є.О. Патон очолював низку академічних комісій і комітетів, діяльність яких мала широке суспільне значення. Це, насамперед, Комісія по відновленню народного господарства, промисловості та культосвітніх закладів. Є.О. Патон об'єднував зусилля всіх установ АН УРСР для подолання наслідків війни. Головна увага зверталася на допомогу відбудові і розбудові флагманів індустрії в регіонах Великого Дніпра і Великого Донбасу.

Не можна забути і відповідальну діяльність під керівництвом Є.О. Патона Комісії АН УРСР з питань повернення вивезених німецько-фашист-





Президія зборів, зліва на право: Л.М. Лобанов, А.Г. Наумовець, Б.Є. Патон, М.З. Згуровський, О.С. Онищенко, С.І. Кучук-Яценко

ськими окупантами українських цінностей. Євген Оskarович домігся, щоб у Німеччині постійно працювало представництво Академії, на перевалочних базах у Бресті та Ковелі були її постійні уповноважені. Завдяки його прямим виходам на союзних міністрів, АН УРСР отримала право розшукувати у всіх чотирьох зонах окупації Німеччини наше майно, замовляти в порядку репарації наукове обладнання і відправляти все це прямо в Київ. Було повернуто ботанічні гербарії, значну частину бібліотечних, архівних, музейних фондів, лабораторного обладнання.

Академік Є.О. Патон був справжнім дипломатом від науки. Не раз йому доводилося зустрічати спротив консервативних кіл. Але йому вдавалося переконати високопосадовців і керівників промпідприємств у перевагах пропонованих ним технологій. І неодноразово приймалися урядові рішення, спрямовані на впровадження патонівських науково-технічних здобутків. Показовою може бути постанова Ради Міністрів СРСР від 27 березня 1952 р. про заходи щодо впровадження в народне господарство нових способів електрозварювання.

Він послідовно проводив політику керівництва Академії на розширення її науково-технічного сектору як найбільш затребуваного народним господарством. Не тільки в Києві, а й у Харкові, Донецьку, Дніпрі, Львові, Одесі зміцнювалися існуючі та відкривалися нові наукові установи. З їх об'єднання виникли пізніше відомі нам сьогодні регіональні наукові центри, формувалася українська національна наукова система. Це був і шлях становлення АН як головної наукової організації України і одного з провідних міжнародних наукових центрів. У всіх цих трансформаціях Академії Є.О. Патон був реальною рушійною силою.

Громадська діяльність – такий же вагомий складник багатовимірного образу академіка Є.О. Патона як і наукова, педагогічна та державна робота. Він був уключений у різноманітні громадські організації – товариства, спілки, комісії, комітети. Першою знаковою серед них був Комі-

тет електрозварювання – об'єднання науковців, викладачів, представників промислових і будівельних організацій з метою поширення знань і досвіду в галузі електрозварювання. Він його організував і очолював. Так же само з його ініціативи виникло та діяло під його керівництвом у Києві Науково-інженерне товариство працівників зварювальної справи. Він був і членом президії такого ж Всесоюзного товариства.

Республіканська Рада науково-технічної пропаганди та її наступник республіканське Товариство для поширення політичних і наукових знань створювалися та розгортали діяльність за його активної участі.

Академік Є.О. Патон – зіркова постать історії науки. Він утвердив епоху електрозварювання в способах виробництва, наповнив її науковими технологіями та високопродуктивним устаткуванням. Створював прообрази техніки майбутнього – механізми-автомати, які переросли в роботів. Відкрив, що методи з'єднання матеріалів і матеріали для з'єднання невичерпні. Показав, що шлях цивілізації не в постіндустріалізації, а в суперіндустріалізації. На особистому прикладі довів, що творчості всі вікові категорії людей підвладні. Дав переконливі докази, що в критичні часи рятівною силою є наука.

З доповіддю «Життєвий та творчий шлях видатного вченого Є.О. Патона» виступив академік-секретар Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства академік НАН України **Л.М. Лобанов**.

Спогадами про особисті зустрічі з Є.О. Патонем та стиль його роботи та керівництва поділився Перший заступник директора ІЕЗ академік **С.І. Кучук-Яценко**.

По закінченню зборів до присутніх звернувся **Борис Євгенович Патон**. Він подякував за участь у зборах з нагоди дня народження його батька – академіка Євгена Оskarовича Патона. Борис Євгенович побажав усім здоров'я, успіхів та наголосив, що чесне служіння науці це величезна радість, величезна, часом виснажлива, праця, праця на все життя!

*О.К. Маковецька, О.Т. Зельніченко*

ОЦІНКА СТАНУ І ПРОГНОЗУВАННЯ РУЙНІВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИХ ВИПРОБУВАННЯХ ПОСУДИН ПІД ТИСКОМ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ ДО КОНТРОЛЬОВАНОЇ ПОВЕРХНІ

С.А. Недосека<sup>1</sup>, М.А. Яременко<sup>1</sup>, М.А. Овсієнко<sup>1</sup>, А.Я. Недосека<sup>1</sup>, С.В. Журавльов<sup>1</sup>,  
Б.М. Ободовський<sup>2</sup>, О.К. Савченко<sup>2</sup>, С.Г. Епов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>АТ «Одеський припортовий завод». 65481, Одеська обл., м. Южне, вул. Заводська, 3. E-mail: [office@opz.odessa.ua](mailto:office@opz.odessa.ua)

Розглянуто особливості проведення акустико-емісійного контролю на прикладі об'єкту станції розподілу повітря К-158 цеху водообробки ОПЗ при проведенні пневмовипробування. Даний об'єкт контролю складається з трьох поєднаних між собою посудин тиску, закритих зовні металевим корпусом, у зв'язку з чим доступ до кожної окремої посудини є обмеженим. Показано, як у такому випадку можливо провести акустико-емісійний контроль і отримати результати, придатні для прогнозування руйнівного навантаження. Відзначено, що застосування зонної локації при таких випробуваннях дозволяє без демонтажу зовнішнього корпусу вирішити проблеми оцінки стану недоступних для контролю поверхонь внутрішніх посудин. Розраховано на основі результатів двох етапів пневмовипробування руйнівне навантаження для кожного з об'єктів контролю. Показано, що їх поточний стан є задовільним і дозволяє подальшу експлуатацію. Рекомендовано враховувати отримані результати при складанні нормативних матеріалів щодо акустико-емісійного контролю. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 8.

*Ключеві слова:* акустико-емісійний контроль, руйнівне навантаження, прогнозування, зонна локація

Одним з найефективніших засобів забезпечення безпечної експлуатації промислових виробів та конструкцій є їх постійний акустико-емісійний (АЕ) моніторинг [1]. У випадках, коли постійний моніторинг забезпечити неможливо, використовують разовий або періодичний АЕ контроль. Як правило, він проводиться під час планових випробувань, коли об'єкти контролю навантажують внутрішнім тиском. У листопаді 2019 р. проведено АЕ контроль посудин тиску (3 шт.) станції розподілу повітря К-158 цеху водообробки відповідно до вимог, викладених у нормативних документах [2–6].

Технічні характеристики об'єктів АЕ контролю (рис. 1) наведені у табл. 1. Основними особливостями контролю вказаних об'єктів є те, що доступ до основного корпусу посудин суттєво обмежений за рахунок зовнішньої оболонки, тому датчики АЕ можливо встановлювати переважно на виходах трубопроводів.

Враховуючи особливість проведення випробувань та поставлене завдання прогнозування руйнівного навантаження, для проведення АЕ контролю використовували одну 16-ти каналну та дві 4-х каналні системи ЕМА-4 останніх мо-

дифікацій, які були об'єднані в єдиний вимірний комплекс, що забезпечило можливість оптимально сформувати локаційні антени та використати зонний режим контролю. Характеристика систем наведена у табл. 2.

Для забезпечення прогнозування руйнівного навантаження при використанні множинних локаційних антен АЕ та зонного режиму контролю, що більш детально описано нижче, використовували оновлене програмне забезпечення ЕМА-3.92, яке має додаткові можливості щодо налаштування параметрів прогнозування порівняно з попередніми версіями 3.9 та 3.91, описаними у роботах [7, 8]. Зокрема, кожна локаційна антена тепер може мати індивідуальні налаштування таких параметрів прогнозування, як тип навантаження та відповідні об'єкту контролю набори коефіцієнтів. Перевірка таких можливостей раніше була виконана під час лабораторних випробувань.

Результати випробування показали, що всі зазначені нововведення дозволяють коректно вирішувати завдання прогнозування руйнівного навантаження за даними АЕ контролю при

Таблиця 1. Технічні характеристики об'єктів АЕ контролю

| Найменування посудини | $P_{\text{розрах.}}$ , кгс/см <sup>2</sup> | $P_{\text{роб.}}$ , кгс/см <sup>2</sup> | $T_{\text{розрах.}}$ , °С | $T_{\text{роб.}}$ , °С | V, л  |
|-----------------------|--|---|---------------------------|------------------------|-------|
| Киснева колона        | 10,2                                       | 1,7                                     | –196                      | –172                   | 3200  |
| Азотна колона         | 10,2                                       | 6,7                                     | –196                      | –172                   | 10035 |
| Головний конденсатор  | 10,2                                       | 3,8                                     | –196                      | –172                   | 3996  |





Рис. 1. Посудини тиску станції розподілу повітря

використанні вимірювального обладнання типу ЕМА, навіть для об'єктів такої складної конфігурації та важкодоступних.

Перед проведенням АЕ контролю вивчена технічна документація на об'єкти контролю та визначена методика його проведення. Визначено місця для розміщення датчиків АЕ на об'єктах контролю з урахуванням наявності доступу до металу та особливостей їх експлуатації, організовано передачу даних щодо навантаження об'єктів.

Місця встановлення датчиків АЕ на об'єктах вибірково показано на рис. 2.

Після проведення тестових прозвучувань для проведення АЕ контролю встановлено 24 датчики АЕ. Всі датчики АЕ підключені у режимі зонної локації, сформовано п'ять локаційних антен згідно з особливістю місць розташування датчиків: антена 1 – датчики 1–8; антена 2 – датчики 9–15; антена 3 – датчики 16, 17; антена 4 – датчики 18, 19; антена 5 – датчики 20–24.

Під час випробувань отримані дані необхідно було попередньо обробити для прогнозування руйнівного навантаження (у разі можливості). З огляду на особливості розміщення датчиків АЕ та відсутність акустичного зв'язку між ними, відповідно,

було неможливо й сформувати локаційні антени для визначення координат джерел АЕ. Тому було прийнято рішення застосувати метод зонної локації та перевірити можливість його використання при прогнозуванні руйнівного навантаження. Перевага зонної локації полягає в тому, що можливо, за необхідності, зіставити дані, отримані різними приладами в одному і тому ж випробуванні, з точки зору прогнозування руйнування. Крім того, не будуть втрачені дані, які відбраковуються програмою при формуванні подій АЕ при координатній локації з застосуванням АЕ антен.

Метод зонної локації заснований на тому, що події АЕ формуються як результат спрацювання одного датчика, на відміну від координатної локації за допомогою антени з рознесених на деяку відстань датчиків, коли подією вважається близьке за часом спрацювання кількох датчиків, що дозволяє визначити координати джерела АЕ. Зонна локація вказує на область об'єкта контролю, в якій знаходиться джерело сигналу АЕ. Вибір теоретично розрахованого значення стробу (мертвого часу) дозволяє чітко визначити, з області розташування якого датчика АЕ надходять сигнали.

Таблиця 2. Технічна характеристика приладів ЕМА-4/16 та ЕМА-4/4

|  |   |                      |
|--|---|----------------------|
| Кількість незалежних каналів АЕ  | 16/4                                    |                      |
| Безперервний потік АЕ імпульсів, що обробляється, за секунду               | > 1000                                  |                      |
| Частотний діапазон АЕ сигналу, що обробляється, кГц                        | 30...1000                               |                      |
| Обробка АЕ сигналу   | цифрова                                 |                      |
| Частота оцифрування АЕ сигналу, МГц  | 16                                      |                      |
| Розрядність АЦП, біт   | 10                                      |                      |
| Програмований цифровий смуговий фільтр                                     | у кожного каналу АЕ                     |                      |
| Діапазон нижніх частот цифрового фільтра, кГц                              | 30...970                                |                      |
| Діапазон верхніх частот цифрового фільтра, кГц                             | 60...1000                               |                      |
| Ширина смуги пропускання цифрового фільтра, кГц                            | не менше 30                             |                      |
| Роздільна здатність при визначенні граничних частот цифрового фільтра, кГц | 1                                       |                      |
| Вимірювані первинні параметри АЕ   |   |                      |
| Параметр АЕ  | Одиниця виміру                          | Максимальне значення |
| Час надходження (Elapse Time)  | 125 нс                                  | 7 років              |
| Час наростання (Rise Time)   | 125 нс                                  | 100 мс               |
| Тривалість (Duration)  | 125 нс                                  | 8 мс                 |
| Число подій АЕ (Counts)  | 1                                       | 65 535               |
| Пікова амплітуда (Peak), лінійний або логарифмічний режим                  | 0,5 дБ                                  | 101 дБмкВ            |
| Середнє значення (Average), лінійний або логарифмічний режим               | 0,5 дБ                                  | 101 дБмкВ            |
| Збереження повної форми імпульсу АЕ  | одночасно по всіх каналах АЕ            |                      |
| Довжина реєстраторів форми імпульсу АЕ                                     | 8 мс по кожному каналу АЕ               |                      |
| Тип внутрішнього підсилювального модуля для кожного каналу АЕ              | LLA 104                                 |                      |
| Кількість низькочастотних (НЧ) вимірювальних каналів                       | 8/4                                     |                      |
| Кількість зовнішніх параметрів навантаження                                | 5/1                                     |                      |
| Зовнішній параметр навантаження  | 0...20 мА (струмова петля) або 0...10 В |                      |
| Розрядність АЦП  | 12 біт                                  |                      |
| Вимірювання напруги живлення   | 0...20 В                                |                      |
| Вимірювання температури всередині корпусу приладу                          | -20...100 °С                            |                      |
| Вимірювання відносної вологості всередині корпусу приладу                  | 0...100 %                               |                      |
| Кількість цифрових входів / виходів ТТЛ                                    | 8/4                                     |                      |
| Тип роз'єму зовнішнього параметра навантаження і цифрових входів-виходів   | HD D-sub                                |                      |
| Інтерфейс зв'язку з комп'ютером  | USB або Ethernet (опційно)              |                      |
| Живлення через мережевий адаптер   | 12 В/1000 мА                            |                      |
| Опційне живлення за стандартом PoE   | 10...57 В/12 Вт                         |                      |

Досвід використання зонної локації під час контролю технічного стану хімічного реактора типу 103-D, що працює у виробництві аміаку, показав, що прогнозування руйнування за даними зонної локації принципово можливе, а результати його є коректними [9]. Там же відзначено, що дана технологія, як і будь-яка технологія, заснована на певних наукових дослідженнях та розробках із застосуванням спеціальних контролюючих приладів і алгоритмів, працює з певною, наперед заданою, вірогідністю, що дозволяє чітко розуміти, в яких межах достовірності слід очікувати коректних висновків щодо технічного стану контрольованих об'єктів, а досвід фахівців ІЕЗ ім. Є.О. Патона в застосуванні методу АЕ для визначення техніч-

ного стану об'єктів, що працюють в різних умовах, показав, що методичні труднощі, пов'язані з установкою датчиків АЕ, проведенням вимірів і оцінкою їх результатів, можуть бути ефективно подолані.

Перед проведенням випробувань підготовлено обладнання для АЕ контролю, встановлено датчики АЕ у місцях доступу до металу об'єктів, проведено підключення датчиків до приладів, налаштовано вихідні дані системи ЕМА, зокрема, задано автоматичний режим визначення порогу амплітудної фільтрації та налагоджено передачу значення тиску до системи, що визначило повну готовність до проведення контролю. Оскільки оброблена інформація подана на копіях



екранів програми ЕМА-3.92 з результатами локації та прогнозу руйнування, наведемо короткий опис даних, які будуть відображені, та засоби їх відображення. У системах типу ЕМА спрацювання датчиків проходять багатоступеневу обробку, потрібну для прогнозування руйнівного навантаження. Кінцевим об'єктом, призначеним



Рис. 2. Визначення місць для встановлення датчиків АЕ (вибірково)

для прогнозування, є кластер подій АЕ. Перед цим отримані дані проходять складну фільтрацію, призначену для вибору з усієї кількості даних АЕ саме тих, які пов'язані з розвитком пошкодження та руйнування матеріалу.

У разі зонної локації кластер формується окремо для кожного датчика АЕ. На екрані програми ЕМА-3.92 він відображається як стовпчик з прапорцем, що знаходиться над зображенням датчика. На прапорці показано число подій АЕ, що потрапили у кластер (рис. 3).

Інформація, що отримується в процесі проведення АЕ контролю, відображається у вікні програми «Випробування», яке містить наступні основні екрани.

Екран «Індикатор і прогноз стану» («Object state parameters») – вікно розрахунку гранично допустимого прогнозного значення НЧ параметра при оцінці стану контролюваного об'єкта. В процесі проведення випробування або його повтору передбачена можливість прогнозування руйнівного навантаження («Destruction forecast») та генерація попереджень про небезпеку кольорним індикатором.

Таблиця зі значеннями прогнозних даних – одночасно і кольорний індикатор стану об'єкта. Поля таблиці показують номер антени та дані кластера («Cluster»), для якого виконано прогноз, а також мінімальне та максимальне значення допуску прогнозного параметра.

На екрані «Антенна» («Antenna») схематично відображаються одна або кілька локаційних антен. Події після необхідної фільтрації об'єднуються за заданими ознаками в кластер. У нижній частині вікна відображаються стовпчиками величина шуму (неперервної емісії) по каналах АЕ, колір стовпчиків відповідає амплітуді сигналів, горизонтальними рисками – встановлені пороги амплітудної дискримінації сигналу для кожного задіяного каналу АЕ (рис. 3).

Екран «Графіки реального часу» («Real time info») – екран у правій частині вікна, що відображає у вигляді графіків зміни обраних

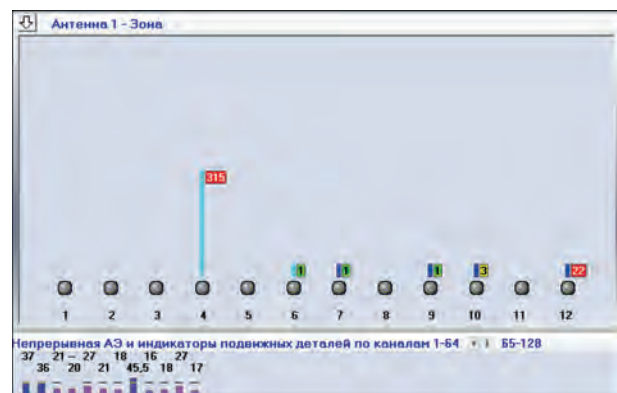


Рис. 3. Кластери АЕ подій при зонній локації



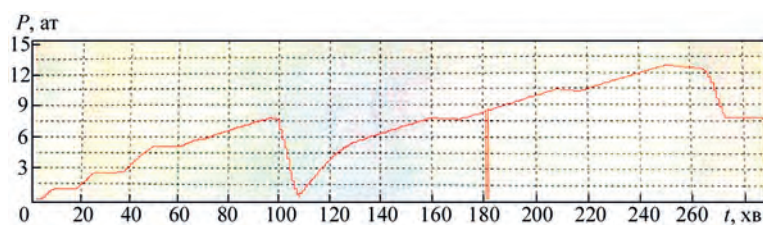


Рис. 4. Зміна тиску при проведенні випробування

користувачем АЕ параметрів у реальному часі при випробуваннях або в умовному часі при комп'ютерному повторі. На кожному графіку відображаються два параметри процесу.

Проведення АЕ контролю посудин тиску відбувалося наступним чином:

- загальна тривалість випробувань – 306 хв;
- тип навантаження – пневматичний;
- максимальний випробувальний тиск – 12,8 ат.

В процесі підйому тиску передбачалися витримки по 5...10 хв кожна з метою виявлення джерел АЕ, які не викликані технологічними шумами при роботі системи навантаження. Дані щодо тиску заведені у систему АЕ контролю шляхом підключення до манометричної системи після проведення відповідного градування. Графік зміни тиску наведено на рис. 4.

Випробування проведено у два етапи, які дали умовно позначені як перше та друге навантаження. Під час першого, в зв'язку з виникненням технічних питань, тиск був піднятий тільки приблизно до 8 ат, потім скинутий до нуля та випробування було повторене.

Перше навантаження записано частково – початок навантаження та кінцева частина до останньої витримки та скидання тиску включно – у двох окремих файлах. Друге – від початку та до кінця – у трьох окремих файлах.

Отриманих в процесі проведених вимірювань даних АЕ достатньо для оцінки стану об'єкта контролю, в тому числі для прогнозування руйнування для окремих ділянок.

**Обробка результатів випробувань.** Основними завданнями при обробці результатів випробування було встановити найбільш небезпечні ділянки об'єктів контролю та, за наявності попереджень про небезпеку першого рівня або вище, отримати прогноз руйнівного навантаження. Кластери, для яких отримане попередження про небезпеку, вказують при зонній локації місце, близьке до розташування відповідного датчика АЕ. Результати випробувань, як було вказано, були записані у п'яти файлах. Для кожного з них окремо встановлювали фільтри технологічних шумів згідно з аналізом кривої неперервної АЕ.

АЕ активність на різних стадіях навантаження суттєво відрізнялася, тому прогноз руйнівного навантаження отриманий лише на тих

з них, на яких зареєстровано достатню для прогнозування кількість подій АЕ. Зазначимо, що на можливість прогнозування впливає не стільки загальна кількість подій АЕ, скільки АЕ активність та загальний розподіл подій у часі. В даному випробуванні достатня для прогнозування руйнування інформація міститься лише у двох з п'яти записаних файлів. Це файли, які відповідають стадіям навантаження, коли вже був досягнутий рівень тиску близько 5 ат, і далі, згідно з програмою випробувань, відбувалося подальше навантаження з витримками.

У зв'язку з цим на рисунках надана лише інформація, що стосується вказаних двох стадій.

Кожна з інформативних стадій випробування представлена наступним чином: спочатку надається знімок вікна програми ЕМА-3.92 після завершення комп'ютерного повтору відповідного етапу випробування, потім для кожної з локаційних антен побудовані графіки, на яких показані в залежності від часу лінійними графіками поточне навантаження ( $P$ , ат) та рівень неперервної емісії, що має характер шуму ( $A_v$ , дБ); стовпчиками – максимальні амплітуди подій ( $A$ , дБ). Якщо у процесі відповідного випробування для певного кластера виявлені необхідні дані для видачі попередження про небезпеку та прогнозування руйнівного навантаження, вони відображаються на екрані програми кольором прапорця на небезпечному кластері та кольором індикатора небезпеки для антени АЕ, до якої відноситься кластер.

На стадії початкового підйому тиску під час першого навантаження небезпечних джерел АЕ зареєстровано не було. Відзначено лише різкі коливання шуму по всіх антенах. На витримках АЕ подій не спостерігалось. При подальшому підйомі тиску до 7 ат і вище (друга стадія), перед початком скидання тиску, зареєстровані події АЕ, що відповідають попередженню про небезпеку першого рівня «Звернути увагу» для всіх сформованих антен АЕ (рис. 5, 6). Відзначимо, що попередження про небезпеку формувалося згідно з ДСТУ 4227-2003 [2]. Можна виділити номери датчиків, для яких видані попередження першого рівня: 1, 10, 16, 17, 18, 21 (жовтий колір прапорців над номерами датчиків). Для інших датчиків попередження відсутні, що відповідає зеленому кольору прапорців.

Узагальнюючи дані прогнозування руйнівного навантаження по всіх антенах, отримаємо діапазон значень прогнозу руйнування у межах 27,9...32,3 ат.

Прогнозні значення для даних об'єктів контролю суттєво перевищують (згідно з їх технічними паспортами) як робочий тиск – 6,7 ат,

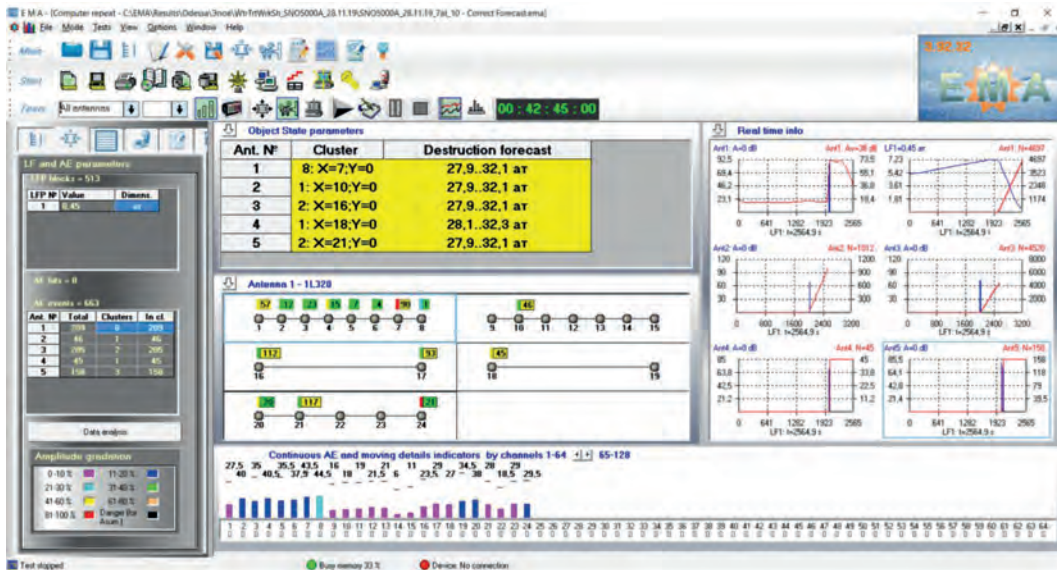


Рис. 5. Вікно програми ЕМА-3.92 на стадії подальшого підйому тиску при першому навантаженні. Спостерігається високий рівень шумів, на максимумі навантаження видані попередження про небезпеку першого рівня «Звернути увагу» для всіх антен. Чітко видно сім кластерів, для яких сформовані попередження (датчики 1, 10, 16, 17, 18, 21 – прапорці жовтого кольору). На індикаторах небезпеки – прогноз руйнівного навантаження для всіх АЕ антен

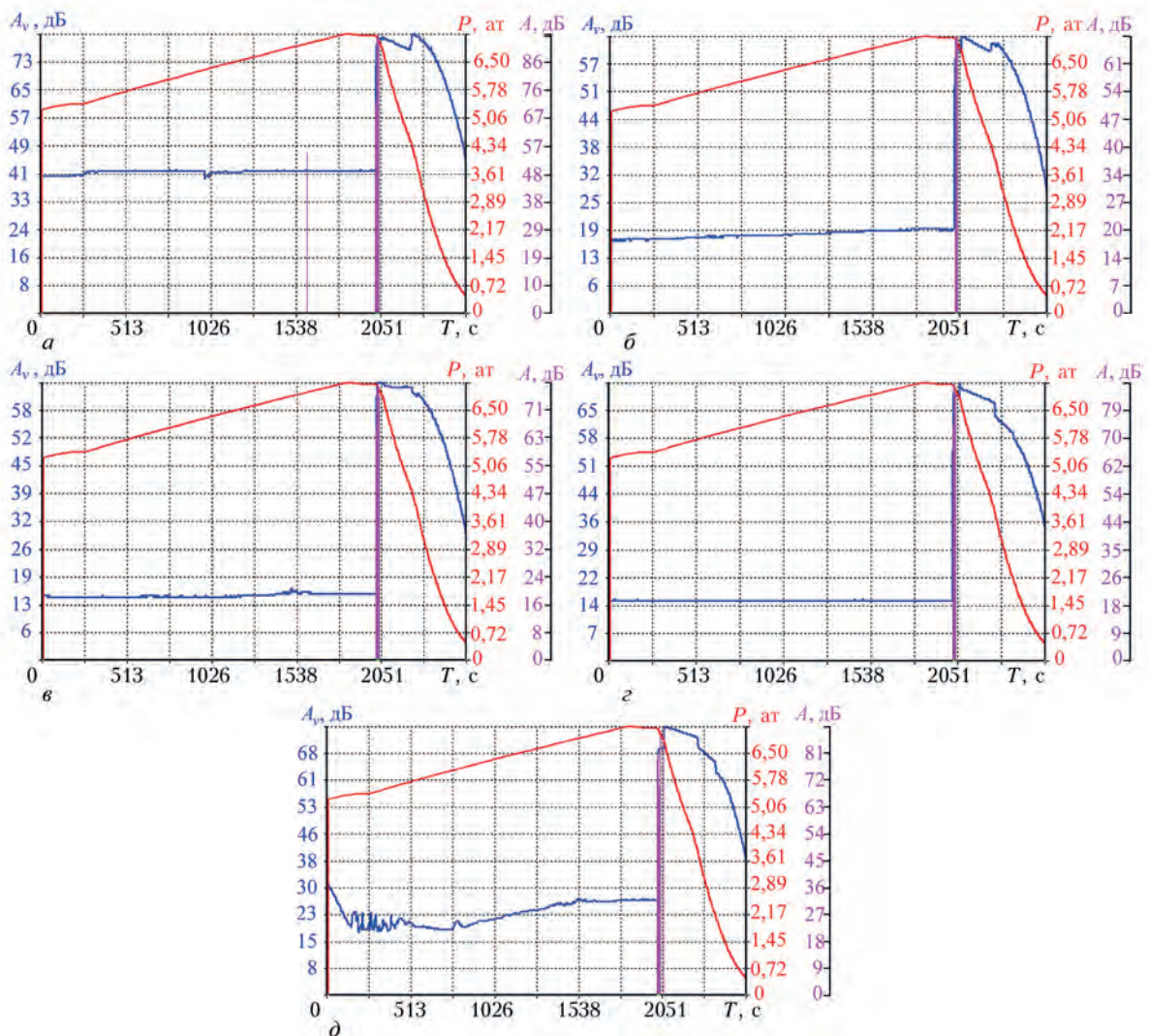


Рис. 6. Графік першого навантаження на стадії подальшого підйому та скидання тиску: а–д – дані для АЕ антен 1–5, відповідно;  $P, at$  – поточне навантаження;  $A_v, dB$  – рівень неперервної АЕ;  $A, dB$  – максимальні амплітуди подій АЕ



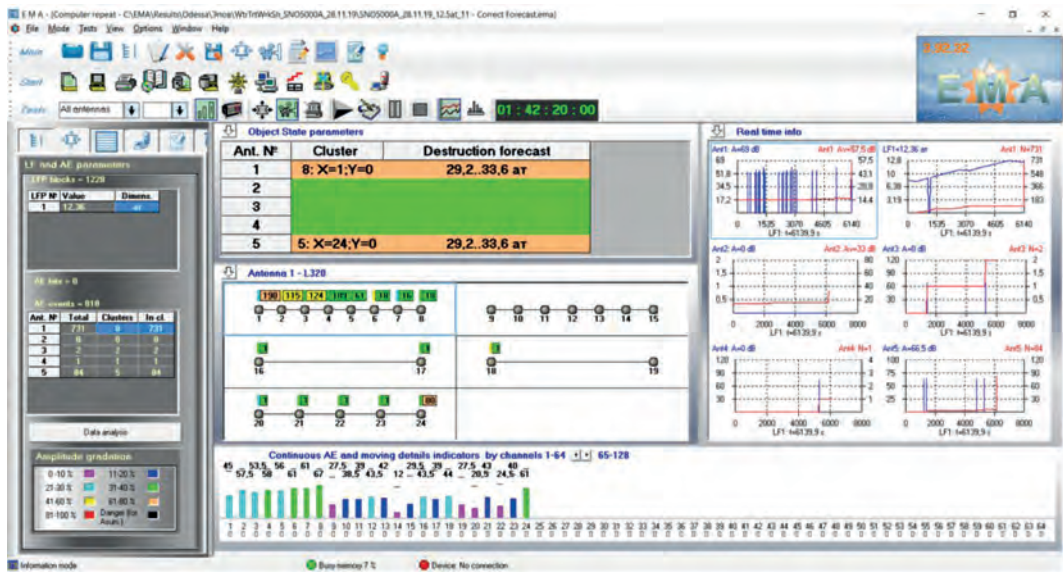


Рис. 7. Вікно програми ЕМА-3.92 після подальшого підйому тиску до максимуму при другому навантаженні. Спостерігається високий рівень шумів, на максимумі навантаження видане попередження про небезпеку другого рівня «Підсилити увагу» для антен 1, 5. Чітко видно чотири кластери, для яких сформовані попередження першого (прапорці жовтого кольору) та другого рівня (прапорці помаранчевого кольору). На індикаторах небезпеки – прогноз руйнівного навантаження для антен АЕ №№ 1, 5

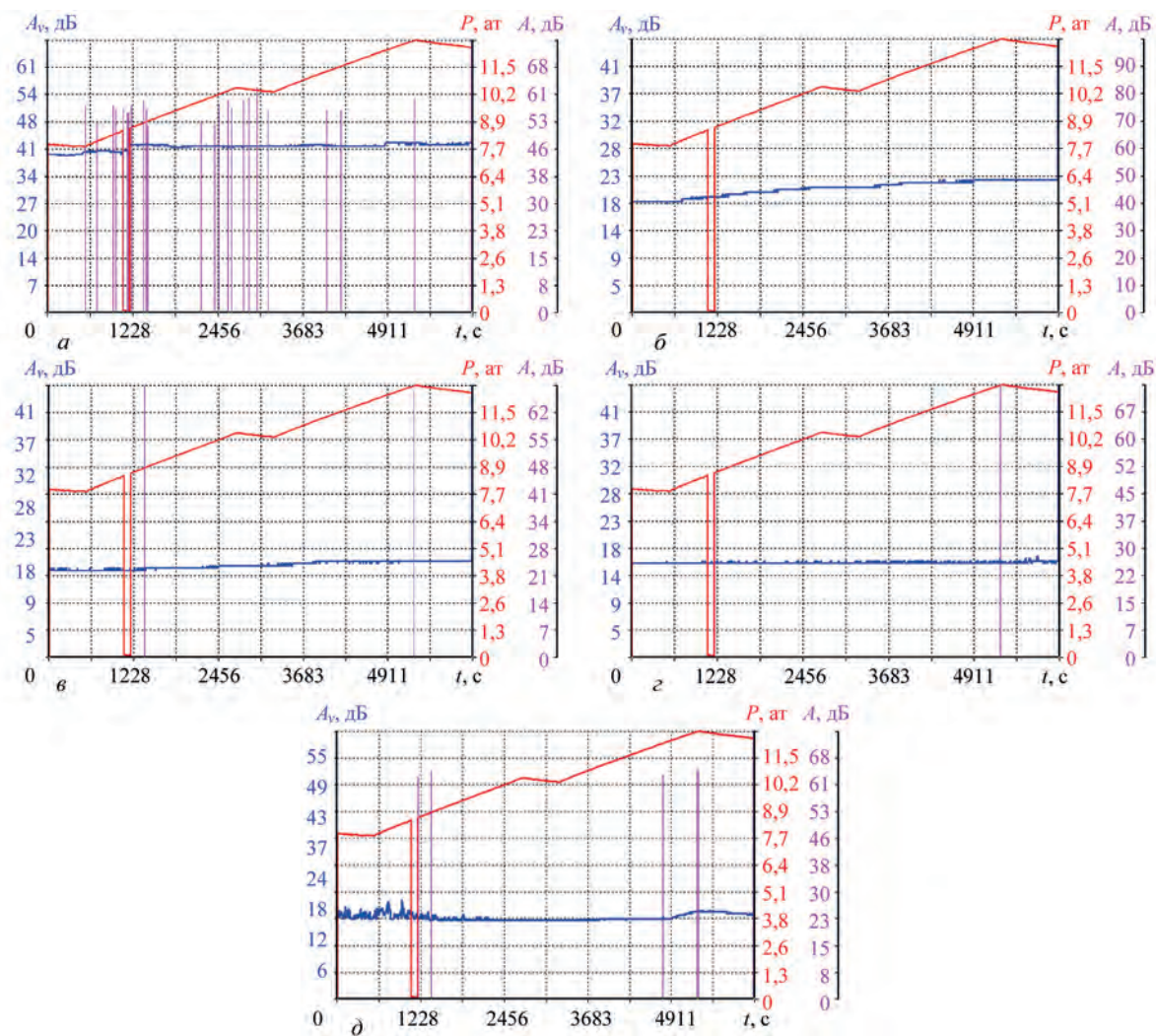


Рис. 8. Графік другого навантаження на стадії подальшого підйому тиску до максимуму: а-д – дані для АЕ антен 1, 2, 3, 4, 5, відповідно; P, ат – поточне навантаження; A<sub>н</sub>, дБ – рівень неперервної АЕ; A, дБ – максимальні амплітуди подій АЕ



розрахунковий тиск – 10,2 ат, так і випробувальний тиск – 12,8 ат. За даними першого навантаження можна відзначити, що об'єкти контролю знаходяться у задовільному стані та можуть експлуатуватися далі за умови періодичного АЕ контролю та спостереження за виявленими ділянками підвищеної акустичної активності.

Окрім сказаного вище, слід відзначити суттєві коливання шуму для антени 5 протягом усього першого етапу випробування. В значній мірі це стосується датчика 20. Перше навантаження закінчилося скиданням тиску до мінімуму без досягнення максимального випробувального тиску. Після вирішення технічних питань почався другий етап, під час якого навантаження досягло значення 12,8 ат.

На другому етапі навантаження під час початкового підйому тиску (перша стадія) небезпечних джерел АЕ зареєстровано не було. Слід відзначити різкий підйом шуму на самому початку випробування по всіх антенах, із плавним зниженням його під час росту навантаження. Також зареєстроване короточасне виникнення джерел АЕ на самому початку випробування, яке, скоріш за все, пов'язано з роботою систем навантаження. Далі АЕ події не спостерігалися.

Попереджень про небезпеку на першій стадії не генерувалося, відповідно, індикатори небезпеки мали зелений колір, а дані для прогнозу руйнування не формувалися.

При подальшому підйомі тиску до максимуму (рис. 7, 8) зареєстровані події АЕ, що відповідають попередженню про небезпеку другого рівня «Підсилити увагу» для двох антен АЕ №№ 1, 5. Можна визначити номери датчиків, для яких саме видані попередження: першого рівня – датчики 2, 3 (жовтий колір прапорців над номерами датчиків); другого – датчики 1, 24 (помаранчевий колір прапорців над номерами датчиків). Для інших датчиків попередження відсутні, чому відповідає зелений колір прапорців.

Узагальнюючи дані прогнозування руйнівного навантаження по всіх антенах, отримуємо діапазон значень прогнозу руйнування у межах 27,9...32,3 ат.

Прогнозні значення руйнівного тиску, як і на першому етапі навантаження, суттєво перевищують максимально допустимі для даних об'єктів контролю. За даними другого етапу випробувань, як і першого етапу, можна відзначити, що об'єкти контролю знаходяться у задовільному стані та можуть експлуатуватися далі за умови періодичного АЕ контролю та спостереження за небезпечними ділянками.

На етапі другого навантаження та під час скидання тиску небезпечних джерел АЕ зареєстрова-

но не було. Слід відзначити різкий підйом шуму на самому початку скидання по всіх антенах, з плавним зниженням його услід за падінням тиску. Також слід звернути увагу на короточасне виникнення джерел АЕ на відносно пологій ділянці скидання, але вони є поодинокими та не призвели до генерації попереджень про небезпеку; відповідно, індикатори небезпеки мали зелений колір, дані щодо прогнозу руйнування не формувалися безпосередньо до завершення випробування.

Таким чином, при проведенні АЕ контролю під час пневмовипробування трьох посудин тиску станції розподілу повітря у режимі зонної локації зареєстровані сигнали АЕ. Отримана інформація збережена для порівняння при проведенні наступного АЕ контролю для аналізу можливого розвитку зон підвищеної акустичної активності.

На підставі аналізу даних, отриманих при проведенні АЕ контролю під час пневмовипробування кисневої колони, азотної колони та головного конденсатора станції розподілу повітря К-158 цеху водообробки, а також додаткової обробки даних АЕ контролю встановлено наступне:

1. Попередження першого рівня небезпеки «Звернути увагу» згенероване для зонних антен – датчиків з номерами: 1, 2, 3, 10, 16, 17, 18, 21.

2. Попередження другого рівня небезпеки «Підсилити увагу» згенероване для зонних антен – датчиків з номерами: 1, 24.

3. Незважаючи на відсутність для датчика 20 попереджень про небезпеку, у зоні його чутливості зареєстровано відхилення значень АЕ параметрів від таких для інших датчиків, тому рекомендовано звернути увагу також і на ділянку навколо його розташування.

4. Значення прогнозу руйнівного навантаження складають 27,9...32,3 ат на першому етапі випробування; 29,2...33,6 ат – на другому. Поля допуску отриманих прогнозних значень руйнівного навантаження не перевищують тих, що дозволяються технічною документацією на системи ЕМА ( $\pm 15\%$ ).

5. Прогнозні значення руйнівного навантаження суттєво перевищують як робочий тиск – 6,7 ат, розрахунковий тиск – 10,2 ат, так і випробувальний тиск – 12,8 ат для об'єктів АЕ контролю.

На вказаних потенційно небезпечних ділянках наявність та характер виявлених джерел АЕ не впливає на можливість подальшої експлуатації випробуваного обладнання. Подальша експлуатація проконтрольованих посудин тиску подовжена з вимогою обов'язкового проведення АЕ контролю та спостереження за виявленими ділянками підвищеної акустичної активності один раз на рік.

Таким чином, застосування при випробуваннях посудин тиску з обмеженим доступом до основного корпусу АЕ систем типу ЕМА дозволяє у режимі зонної локації виявити найбільш небезпечні ділянки об'єктів контролю та отримати прогноз руйнівного навантаження при проведенні пневмовипробування.

## Висновки

1. Показано, що при випробуваннях посудин тиску з обмеженим доступом до контрольованої поверхні можливо провести ефективний АЕ контроль і отримати результати, придатні для прогнозування руйнівного навантаження.

2. Відзначено, що застосування зонної локації при таких випробуваннях дозволяє без демонтажу зовнішнього корпусу вирішити проблеми оцінки стану недоступних для контролю поверхонь внутрішніх посудин і визначити найбільш небезпечні ділянки.

3. Розраховано на основі результатів двох етапів пневмовипробування руйнівне навантаження для кожного з об'єктів контролю. Показано, що їх поточний стан є задовільним і дозволяє подальшу експлуатацію.

4. Отримані результати можуть бути враховані при створенні нормативних матеріалів з АЕ контролю аналогічних об'єктів.

## Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. (2011) Непрерывный мониторинг магистральных газопроводов и газопереработных станций методом акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 3–13.
2. (2003) ДСТУ 4227-2003 *Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки*. Держстандарт України.
3. (2003) ДСТУ 4223-2003 *«Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Технічне діагностування. Загальні вимоги»*.
4. (2014) *Правила організації і проведення акустико-емісійного контролю посудин, апаратів, котлів і технологічних трубопроводів. Загальні вимоги*. ТК-78 «ТДНК», Київ.

5. (2006) СОУ 50.07-2006 *«Методичні рекомендації з акустико-емісійного діагностування обладнання основних виробництв хімічної, нафтохімічної та нафтогазопереробної промисловості. Загальні вимоги»*. ТК-78 «ТДНК», Київ.
6. (1995) Методика *«Акустико-емісійна діагностика працездатності трубопровідних систем і посудин нафтопереробних, нафтохімічних і хімічних виробництв, що працюють під тиском до 16 МПа»* (затверджена Держнаглядохоронпраці).
7. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2013) Програмное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 16–22.
8. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе). *Там же*, **2**, 3–18.
9. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А., Овсиенко М.А. (2018) Применение технологии акустико-эмиссионного контроля при оценке состояния сосудов химического производства. *Там же*, **1**, 34–41.

## References

1. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. (2011) Continuous monitoring of main gas pipelines and gas compressor stations by acoustic emission method. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 3–13 [in Russian].
2. (2003) DSTU 4227-2003 [in Ukrainian].
3. (2003) DSTU 4223-2003: *Boilers, pressure vessels and pipelines. Technical diagnostics. General requirements* [in Ukrainian].
4. (2014) *General requirements*. TK-78 TDNK, Kyiv [in Ukrainian].
5. (2006) SOU 50.07-2006: *Procedural recommendations on acoustic emission diagnostics. General requirements*. TK-78 TDNK, Kyiv [in Ukrainian].
6. (1995) Procedure «Acoustic emission diagnostics» (approved by State Health Protection) [in Ukrainian].
7. Nedoseka A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2013) Software of AE diagnostic systems ЕМА-3.9. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 16–22 [in Russian].
8. Paton B.E., Lobanov L.M., Nedoseka A.Ya. et al. (2016) Smart technologies for evaluation of structure state (AE technologies and new generation control equipment on its basis). *Ibid*, **2**, 3–18 [in Russian].
9. Nedoseka A.Ya., Nedoseka S.A., Yaremenko M.A., Ovsienko M.A. (2018) Application of the technology of acoustic emission monitoring at evaluation of the condition of vessels in chemical production. *Ibid*, **1**, 34–41 [in Russian].

## EVALUATION OF THE STATE AND PREDICTION OF BREAKING LOAD AT ACOUSTIC-EMISSION TESTING OF PRESSURE VESSELS WITH LIMITED ACCESS TO CONTROLLED SURFACE

S.A. Nedoseka<sup>1</sup>, M.A. Yaremenko<sup>1</sup>, M.A. Ovsienko<sup>1</sup>, A.Ya. Nedoseka<sup>1</sup>, S.V. Zhuravljov<sup>1</sup>, B.M. Obodovskii<sup>2</sup>, O.K. Savchenko<sup>2</sup>, S.G.Epov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>JSC «Odessa Port Plant», 3 Zavodskaya Str., 65481, Yuzhne, Odessa distr., Ukraine. E-Mail: office@opz.odessa.ua

Peculiarities of conducting acoustic-emission control are considered in the case of the object of air distribution station K-158 of water treatment shop of OPP during pneumatic testing. This object of control consists of three interconnected pressure vessels, enclosed into a metal case, so that access to each individual vessel is limited. It is shown that how it is possible to conduct acoustic-emission control in such a case, and obtain results, suitable for prediction of breaking load. It is noted that application of zone location at such testing allows solving the problem of evaluation of the state of inner vessel surfaces inaccessible for control without dismantling the outer case. Destructive loading for each of the objects of control was calculated, proceeding from the results of two stages of pneumatic testing. It is shown that their current state is satisfactory and allows their further operation. It is recommended to take into account the obtained results, when preparing the normative materials on acoustic-emission control. 9 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

*Keywords: acoustic-emission control, breaking load, prediction, zone location*

Надійшла до редакції 10.01.2020

# ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРИСТРОЮ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ МЕТОДАМИ ВЗАЄМНОГО НЕСТАЦІОНАРНОГО АНАЛІЗУ

Р.М. Юзефович<sup>1,2</sup>, І.М. Яворський<sup>1,3</sup>, О.Ю. Дзерин<sup>1</sup>, Г.Р. Трохим<sup>1</sup>, І.Г. Стецько<sup>1</sup>, І.Й. Мацько<sup>1</sup>

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

E-mail: [roman.yuzefovych@gmail.com](mailto:roman.yuzefovych@gmail.com)

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

<sup>3</sup>Технологічно-природничий університет. 85796, Польща, Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

Вібраційні сигнали від складних механічних систем, які знаходяться під впливом динамічних навантажень, сформовані відгуками від багатьох вузлів. При дослідженні таких сигналів виникає питання про аналіз впливу на їх структуру можливих дефектів, які виникають у кожному з елементів підшипникового вузла. Виникнення дефектів у елементах механічних систем спричиняє нелінійні ефекти у властивостях вібраційних коливань. Такі ефекти приводять як до появи нових гармонік у детермінованій складовій вібрації, так і до взаємодії цієї складової зі стохастичними коливаннями, які зумовлені флуктуаціями товщини та в'язкості змазки, змінами сил тертя, спонтанними й некерованими змінами робочих навантажень тощо. У результаті вказаної взаємодії порушується строга періодичність детермінованих коливань, вони модулюються за фазою та амплітудою. Відмічені властивості вібрацій можуть бути адекватно описані математичною моделлю у вигляді взаємних періодично корельованих випадкових процесів. У роботі представлено інтегральну функцію когерентності, яка кількісно характеризує стохастичний взаємозв'язок між властивостями нестационарності двох періодично корельованих випадкових сигналів, що проявляється в періодичній зміні за часом їх взаємних спектральних характеристик, а також покомпонентну функцію когерентності, яка визначається взаємоспектральними густинами окремих модулюючих процесів. Наведено технічні характеристики розробленого спеціалізованого пристрою неруйнівного контролю «Компакт-Вібро». Розглянуто результати, отримані з використанням цього пристрою при виконанні вібраційних обстежень промислових об'єктів України. Бібліогр. 6, рис. 32.

*Ключові слова:* періодично корельовані випадкові процеси, функція когерентності, пристрій неруйнівного контролю, вібраційний сигнал, діагностика

На даний час ефективними методами для вирішення задач технічної діагностики є методи статистичного аналізу зареєстрованих сигналів, що ґрунтуються на теорії та методах періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) [1]. Однією з таких задач є оцінювання контролю роботи елементів складних механічних систем, визначення дефектів, які зароджуються, і реагують на незначні відхилення параметрів технічного стану від норми.

Дослідження проведені у відділі «Методів і засобів відбору та обробки діагностичних сигналів» Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України показали, що використання імовірнісної моделі зареєстрованих вібраційних сигналів у вигляді ПКВП відкриває нові можливості при діагностиці дефектів обертових механізмів на ранніх стадіях їх виникнення.

**Властивості взаємкореляційних характеристик сигналів.** При розв'язуванні задач вібродіагностики часто також виникає потреба аналізу взаємозв'язків між сигналами, які відібрані в різних точках механічної системи. Вібраційний сигнал, що є носієм інформації про певні дефекти

системи, має властивості як повторюваності, так і стохастичності [2–4]. Ці його властивості, з єдиної, а не з альтернативних позицій, дають можливість описати та дослідити математичну модель у вигляді ПКВП [1]. Імовірнісні характеристики ПКВП відображають модуляційну взаємодію стохастичної та детермінованої складових вібрацій, яка виникає в разі появи дефектів. І власне, останні з використанням цих характеристик, вдається виявляти вже на ранніх стадіях їх розвитку. Тому, актуальною є задача взаємного ПКВП-аналізу вібросигналів, відібраних у різних точках, що може суттєво полегшити визначення типу дефектів, а також їх розрізнення та локалізацію. Метою даної роботи є визначення основних властивостей взаємкореляційних характеристик пов'язаних між собою ПКВП [5, 6].

Задачу взаємного аналізу для спрощення розглянемо тільки для двох ПКВП-сигналів  $\xi(t)$  та  $\eta(t)$ . Їх математичні сподівання та кореляційні функції є періодичними функціями часу

$$m_{\xi}(t) = E\xi(t) = m_{\xi}(t + T),$$



$$b_{\xi}(t, u) = E \dot{\xi}(t) \dot{\xi}(t+T) = b_{\xi}(t+T, u),$$

$$\dot{\xi}(t) = \xi(t) - m_{\xi}(t), \quad m_{\xi}(t) = E \eta(t) = m_{\eta}(t+T),$$

$$b_{\eta}(t, u) = E \dot{\eta}(t) \dot{\eta}(t+T) = b_{\eta}(t+T, u),$$

$$\dot{\eta}(t) = \eta(t) - m_{\eta}(t),$$

і можуть бути подані рядами Фур'є:

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

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

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

Припустимо, що взаємкореляційна функція  $b_{\xi\eta}(t, u) = E \dot{\xi}(t) \dot{\eta}(t+u)$  також змінюється за часом періодично. Тоді

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

де

$$B_k^{(\xi\eta)}(u) = \frac{1}{T} \int_0^T b_{\xi\eta}(t, u) e^{-ik\omega_0 t} dt.$$

Величини  $B_k^{(\xi\eta)}(u)$  будемо називати взаємкореляційними компонентами. Оскільки

$$b_{\xi\eta}(t, u) = E \dot{\xi}(t) \dot{\eta}(t+u) = E \dot{\eta}(t+u) \dot{\xi}(t) = b_{\eta\xi}(t+u, -u),$$

то

$$\sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k^{(\xi\eta)}(u) e^{ik\omega_0 t} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k^{(\eta\xi)}(-u) e^{ik\omega_0(t+u)},$$

а звідси

$$B_k^{(\xi\eta)}(-u) = B_k^{(\eta\xi)}(u) e^{-ik\omega_0 u}. \quad (2)$$

Для нульового взаємкореляційного компонента маємо  $B_0^{(\xi\eta)}(-u) = B_0^{(\eta\xi)}(u)$ .

Кожен із сигналів  $\xi(t)$  та  $\eta(t)$  як ПКВП може бути поданий у вигляді ряду

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \xi_k(t) e^{ik\omega_0 t}, \quad (3)$$

$$\eta(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \eta_k(t) e^{ik\omega_0 t}. \quad (4)$$

З випадковими процесами  $\xi(t)$  та  $\eta(t)$ , які описують амплітудну та фазову стохастичні модуляції гармонічних складових вібрисигналів, безпосередньо пов'язана інформація про ті чи інші дефекти обертових вузлів. Тому, на основі взає-

мкореляційних функцій  $R_{pq}^{(\xi\eta)}(u)$ , а отже і взаємкореляційних компонентів, можна судити про наявність чи відсутність зв'язків між дефектами. Якщо кореляційні зв'язки між компонентами  $\xi_p(t)$  та  $\eta_q(t)$  різних номерів  $p$  та  $q$  відсутні, тобто  $R_{pq}^{(\xi\eta)}(u) = R_p^{(\xi\eta)}(u) \delta_{pq}$  ( $\delta_{pq}$  – символ Кронекера), то всі взаємкореляційні компоненти, крім нульового, дорівнюють нулю. Взаємкореляційна функція в цьому випадку не змінюється з часом, а це означає, що два ПКВП-сигнали є стаціонарно зв'язаними. Очевидно, що при  $R_p^{(\xi\eta)}(u) = 0$  ці сигнали взагалі будуть некорельованими.

Для характеристики пов'язаності двох ПКВП-сигналів у частотній області введено інтегральну функцію когерентності:

$$\gamma_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{\left| f_k^{(\xi\eta)}\left(\omega + k \frac{\omega_0}{2}\right) \right|}{\left[ f_0^{(\xi\eta)}\left(\omega - k \frac{\omega_0}{2}\right) f_0^{(\xi\eta)}\left(\omega + k \frac{\omega_0}{2}\right) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (5)$$

Ця величина характеризує ступінь корельованості між спектральними компонентами сигналу  $\xi(t)$  на частоті  $\omega - k \frac{\omega_0}{2}$  та сигналу  $\eta(t)$  на частоті  $\omega + k \frac{\omega_0}{2}$ . Визначення цієї величини зводиться до знаходження характеристик корельованості гармонічних складових двох періодично нестаціонарно зв'язаних сигналів (3) і (4) – їх взаємоспектральних компонентів. Така корельованість ніяк не може бути відображена в характеристиках їх стаціонарних наближень. Функція когерентності, побудована на основі останніх, дозволяє проаналізувати тільки взаємозв'язки між спектральними густинами середньої потужності сигналів. Вибрана характеристика нестаціонарного взаємозв'язку сигналів не змінюється при лінійних перетвореннях. Властивість інваріантності дає можливість використати введену величину при розв'язуванні різноманітних задач, в тому числі, при виявленні нелінійних спотворень сигналів, розділення їх джерел, ідентифікації шляхів їх поширення і т. п. [4]

У випадку, коли існують такі  $k \neq l$ , що  $f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) \neq 0$ ,  $f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega)$  – взаємоспектральні густини стаціонарних компонентів  $\xi_k(t)$  та  $\eta_l(t)$ , періодично нестаціонарні процеси будуть взаємозв'язаними, а для визначення характеристик такої зв'язності введено покомпонентну функцію когерентності, яка визначається формулою:

$$\gamma_{kl}(\omega) = \frac{\left| f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) \right|}{\left[ f_{kk}^{(\xi)}(\omega) f_{ll}^{(\eta)}(\omega) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (6)$$

Ця функція, як і величина (5), не змінюється при лінійних перетвореннях і визначається взаємоспектральними характеристиками окремих випадкових процесів, які модулюють несучі гармоніки ПКВС. У порівнянні з інтегральною функцією когерентності вона дає змогу детальніше проаналізувати взаємозв'язаність ПНВС, уникаючи при цьому впливу переносу частот, який виникає при модуляції.

**Пристрій неруйнівного контролю.** У ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ розроблений пристрій неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» (рис. 1), у якому поєднано відбір вібраційного сигналу, застосування методів періодично нестаціонарних випадкових процесів, методи взаємного кореляційного і спектрального аналізів, а також методики цифрової обробки відібраних сигналів для ранньої діагностики обертових механізмів.

На рис. 2 наведена схема структурна пристрою неруйнівного контролю для ранньої діагностики об'єктів. Схеми електричні принципові уточнені та відкоректовані на підставі натурних випробувань на реальних промислових об'єктах.

Допоміжними елементами служать буферні каскади та кабелі з'єднання. Живлення пристрою неруйнівного контролю відбувається від шини USB 2.0 персонального комп'ютера (ПК). Аналоговий вібраційний сигнал перетворюється в цифровий 12-ти розрядним аналого-цифровим перетво-

рювачем та за допомогою шини USB передається для запам'ятовування та обробки на ПК. Обробка вібраційних сигналів відбувається спеціалізованим програмним забезпеченням. На екран монітора виводяться середньоквадратичні значення віброприскорення або віброшвидкості вібраційних сигналів, кореляційна функція, а також спектральні характеристики сигналів.

У режимі налаштування перед початком запису можна вибрати тип сигналу (віброприскорення чи віброшвидкість), номер каналу, частоту квантування, час запису вібраційного сигналу на жорсткий диск ПК, смугу частот вхідного сигналу, коефіцієнт підсилення.

Живлення пристрою забезпечується двоканальним DC-DC перетворювачем. Струм споживання не перевищує 80 мА. Електронні компоненти розміщені на друкованій платі розміром 80×130 мм. Довжина сигнальних кабелів більше 7 м. Для надання механічної міцності та додаткового екранування в жорстких умовах експлуатації сигнальні кабелі змонтовані в гнучких броньованих кожухах.

Розроблений пристрій «Компакт-Вібро» дозволяє здійснювати відбір та запис сигналів: віброприскорення від 0,1 до 196,2 м/с<sup>2</sup> в діапазоні частот від 5 Гц до 12 кГц при нерівномірності АЧХ до ±3 дБ; віброшвидкості від 0 до 100 мм/с в діапазоні частот від 5 Гц до 1 кГц при нерівномірності АЧХ до ±3 дБ.

**Взаємний нестаціонарний аналіз вібраційних сигналів.** Проведено детальний аналіз структури вібраційних сигналів відібраних з підшипникових вузлів центрифуги Flottweg Z4E ( $P = 19$  кВт,  $N = 3650$  об./хв) за допомогою розробленого пристрою неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» в режимі роботи при навантаженні. Відповідно до стандартів ДСТУ ISO 2372, ISO 10816-1-97 даний електродвигун відноситься до другого класу механізмів. Частоту дискретизації при відборі вібраційних сигналів вибрано 10 кГц, час запису реалізацій 20 с. Згідно з



Рис. 1. Загальний вигляд пристрою неруйнівного контролю

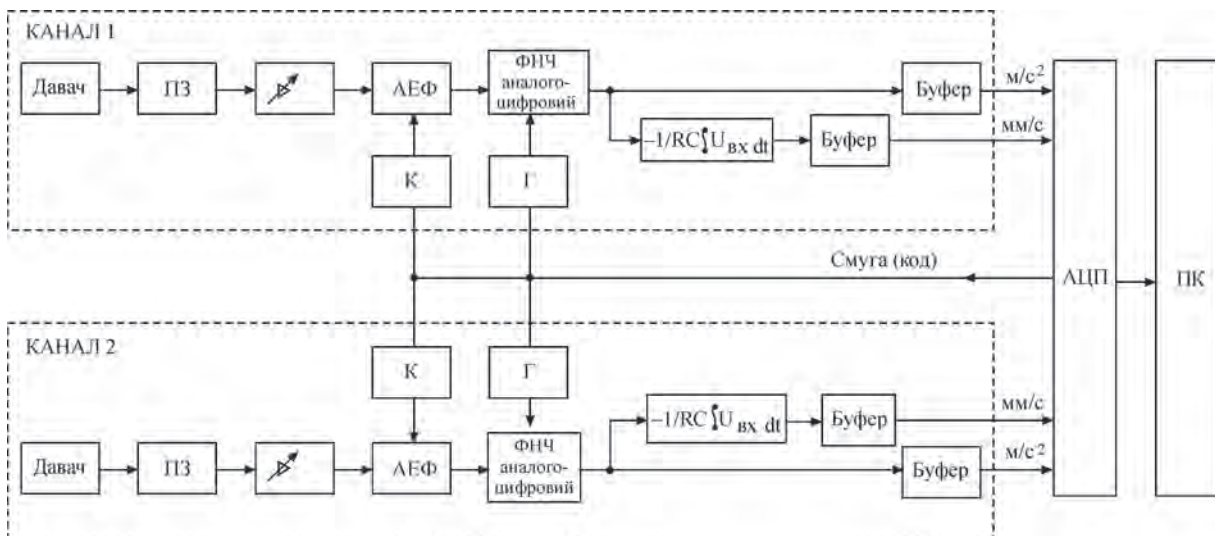


Рис. 2. Схема структурна пристрою неруйнівного контролю для ранньої діагностики об'єктів

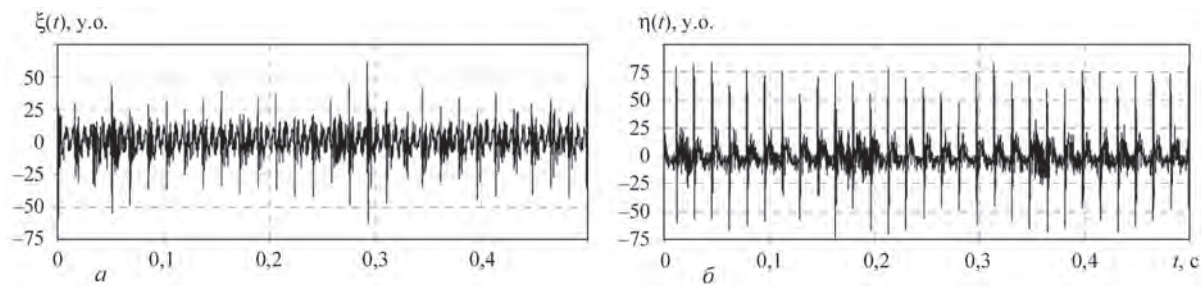


Рис. 3. Фрагмент реалізації вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

[1, 2] така довжина реалізації вібраційного сигналу забезпечує похибку обробки не більше 5 %.

На рис. 3 наведено фрагменти реалізації вертикальної та горизонтальної складових вібрації. З наведених рисунків чітко видно коливання основної гармонічної складової (60 Гц).

Графіки кореляційної функції (рис. 4) вібраційного сигналу в стаціонарному наближенні вказують на те, що у сигналі присутня потужна детермінована складова, а співвідношення сигнал/шум для вертикальної складової складає 2:1, а для горизонтальної – 4:1. Хвости кореляційної функції як для горизонтальної, так і вертикальної складових мають характер незаникаючих коливань і містять потужні викиди з частотою, що відповідає частоті обертання валу (60 Гц).

Спектральна густина потужності вертикальної та горизонтальної складових вібраційного сигналу в стаціонарному наближенні містить основну гармонічну складову, що відповідає частоті обертання валу (60 Гц), та кратні до неї гармоніки, причому для вертикальної складової найпотужнішою є третя гармоніка на яку припадає понад 70 % потужності детермінованих коливань вібраційного сигналу (рис. 5, а). Для горизонтальної складової спектральна густина потужності вібраційного сигналу в стаціонарному наближенні зосереджена у смузі частот до 2500 Гц (рис. 5, б).

З використанням методу найменших квадратів [6] розділено детерміновану та стохастичну складові вібраційного сигналу та проведено аналіз кожної з них окремо.

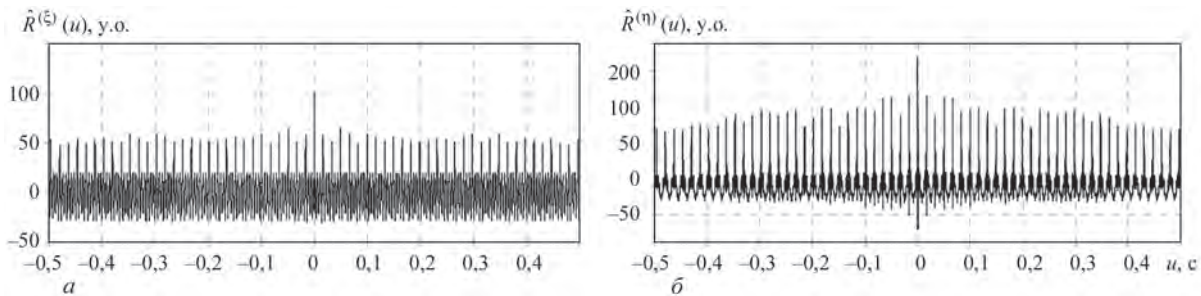


Рис. 4. Кореляційна функція вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

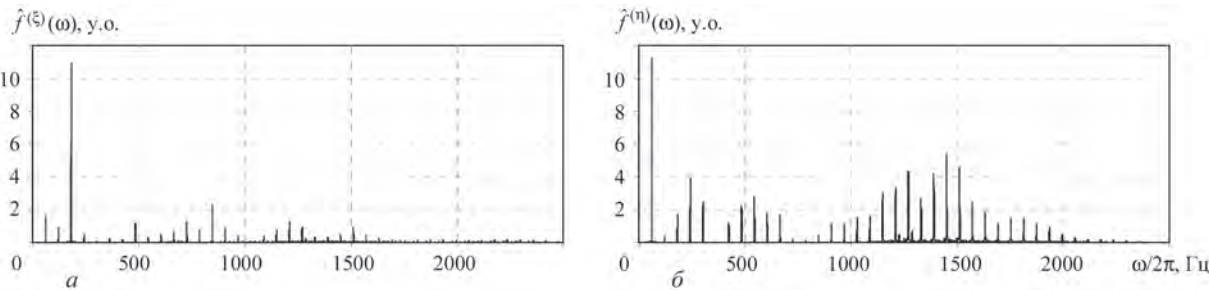


Рис. 5. Спектральна густина вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

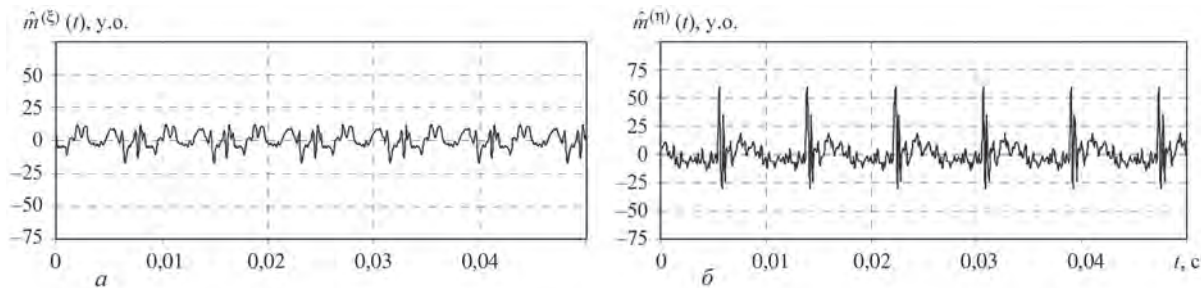


Рис. 6. Математичне сподівання вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги



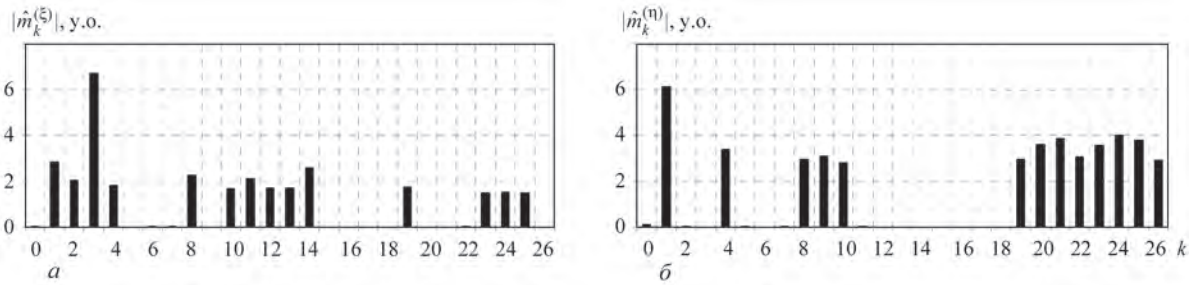


Рис. 7. Компоненти математичного сподівання вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

На рис. 6 наведено графіки математичного сподівання вертикальної та горизонтальної складових сигналу, на яких чітко проявляються коливання основного періоду, при чому для горизонтальної складової спостерігаються викиди з частотою, що відповідає частоті обертання валу.

Компоненти Фур'є математичного сподівання для вертикальної і горизонтальної складових зображено на рис. 7. Для вертикальної складової вібрації центрифуги значущими є чотирнадцять гармонік, а для горизонтальної – тринадцять.

Графіки стохастичної складової для вертикальної та горизонтальної складових вібраційного сигналу центрифуги показано на рис. 8. З графіків видно, що в стохастичній складовій присутні викиди з частотою, що відповідає частоті обертання валу.

Заникаючий хвіст кореляційної функції для вертикальної та горизонтальної вібрації стохастичної складової центрифуги (рис. 9) свідчить про відсутність у ній детермінованих коливань. З графіків кореляційних функцій чітко видно, що на їх хвостах присутні викиди, що відповідають частоті обертання валу (60 Гц).

Спектральна густина потужності стохастичної складової вертикальної вібрації в стаціонарному наближенні має резонансне підняття в області частот від 500 до 2500 Гц, а горизонтальної вібрації – в області частот від 1000 до 2000 Гц та містить піки, кратні до частоти обертання вала (рис. 10).

Використовуючи когерентний кореляційний функціонал для пошуку прихованих періодичностей другого порядку у стохастичних складових вертикальної та горизонтальної вібрації виявлено

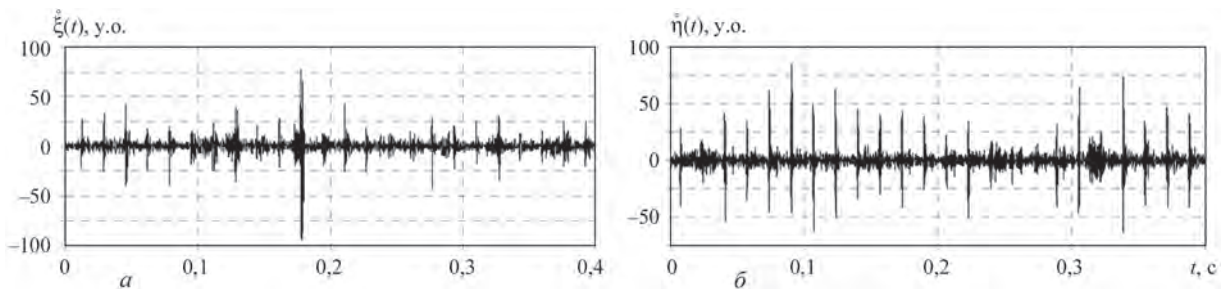


Рис. 8. Стохастична складова сигналу вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

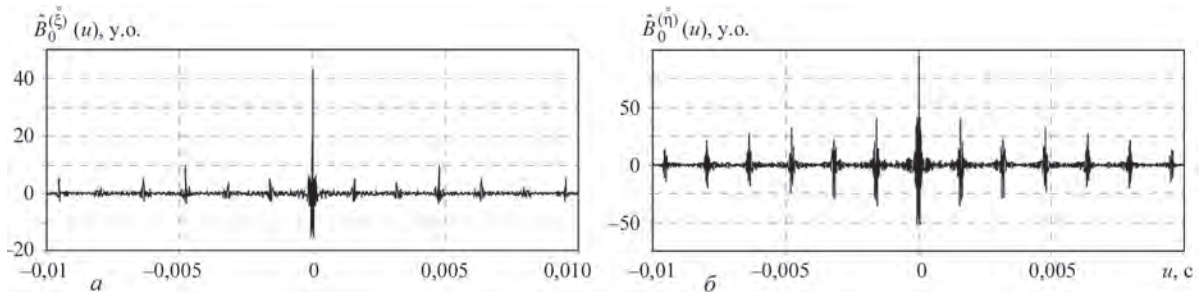


Рис. 9. Кореляційна функція стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

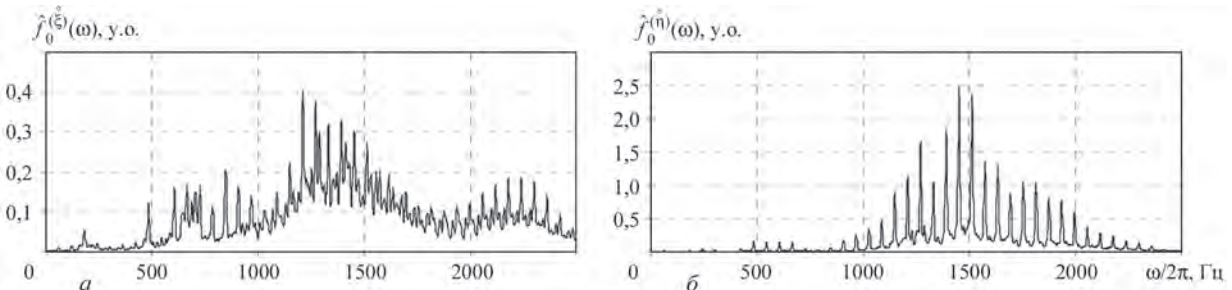


Рис. 10. Спектр стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

потужну модуляцію стаціонарними випадковими процесами частоти 60,45 Гц, що відповідає частоті обертання валу. Залежність даних функціоналів від пробного періоду показано на рис. 11.

Оцінивши значення періоду нестационарності проведемо ПКВП аналіз структури стохастичної складової вібраційного сигналу. За допомогою компонентного методу оцінено дисперсію та її компоненти Фур'є. Відношення мінімального значення дисперсії для вертикальної складової за період до максимального складає 0,03 (рис. 12, а), а для горизонтальної – 0,035 (рис. 12, б).

Серед значущих компонентів дисперсії для вертикальної складової вібраційного сигналу центрифуги є перші вісім (рис. 13, а), а для горизонтальної – сімнадцять (рис. 13, б).

Проведемо аналіз нульових (рис. 14), перших двох косинусних кореляційних компонентів вертикальної та горизонтальної стохастичних складових кореляційної функції стохастичної складової сигналу центрифуги (рис. 15, 16).

Як видно з наведених рисунків усі складові косинусних кореляційних компонентів вертикальної та горизонтальної складових мають вигляд швидкозникаючих коливань, на хвостах яких присутні потужні викиди. Значущими є нульові кореляційні компоненти вертикальної та горизонтальної складових, другий компонент вертикальної складової вібрації, а також перший, другий, косинусний компонент горизонтальної складової. Рештою складових можна знехтувати.

Проведемо також аналіз перших двох синусних кореляційних компонентів вертикальної та

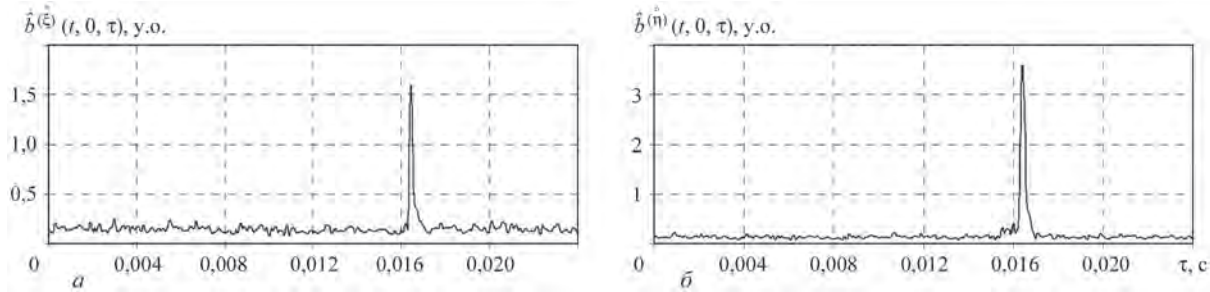


Рис. 11. Функціонал визначення періоду стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

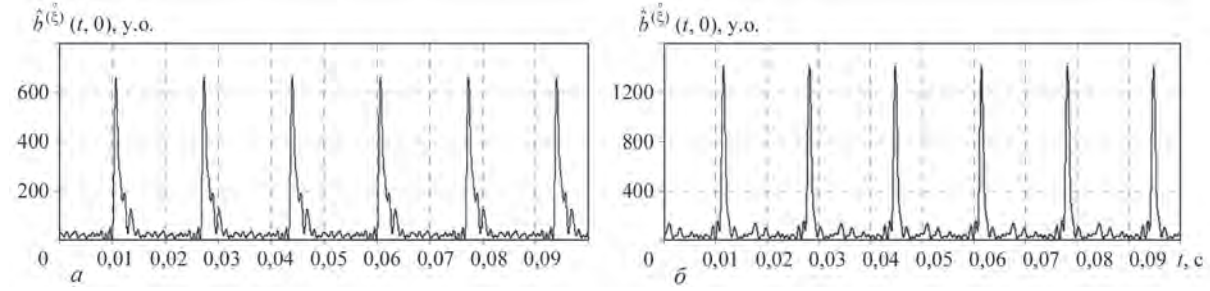


Рис. 12. Дисперсія стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

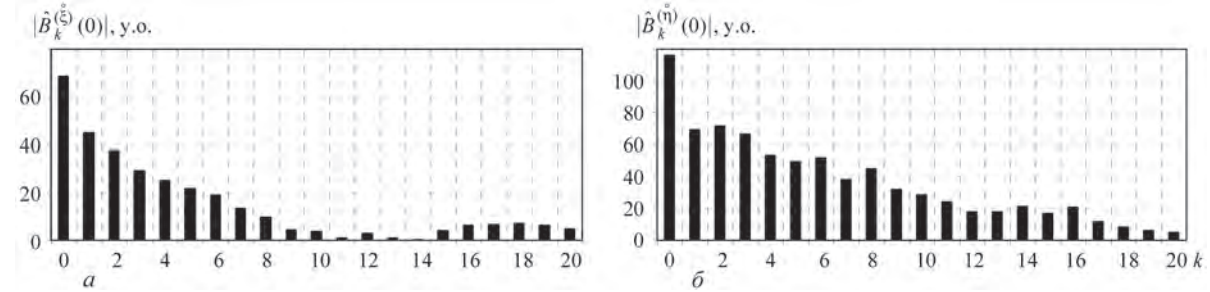


Рис. 13. Компоненти дисперсії стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

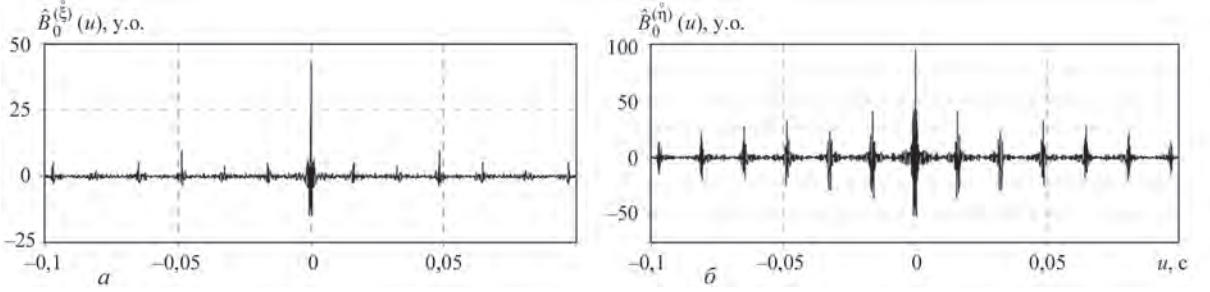


Рис. 14. Нульовий кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

горизонтальної складових кореляційної функції стохастичної складової сигналу (рис. 17, 18). Як видно з наведених рисунків складові синусних кореляційних компонентів мають вигляд швидкозникаючих коливань, на хвостах яких присутні

потужні викиди. Значущими є перший та компоненти вертикальної складової вібрації.

Нульовий спектральний компонент, а також дійсні та уявні частини спектральних компонентів спектральної густини стохастичної складової для вер-

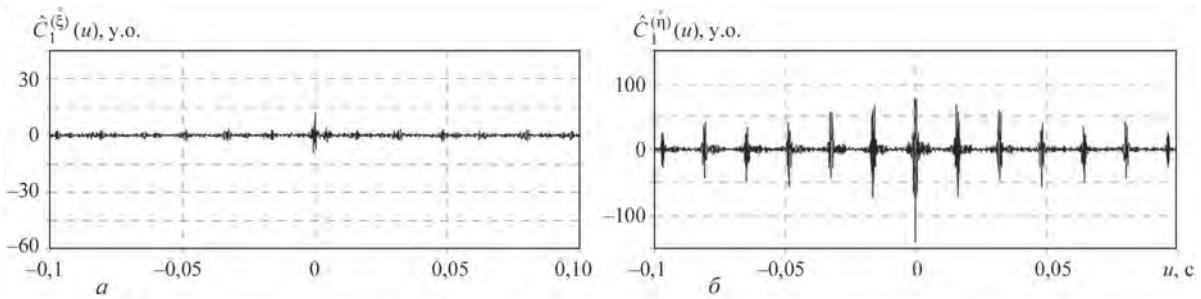


Рис. 15. Перший косинусний кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

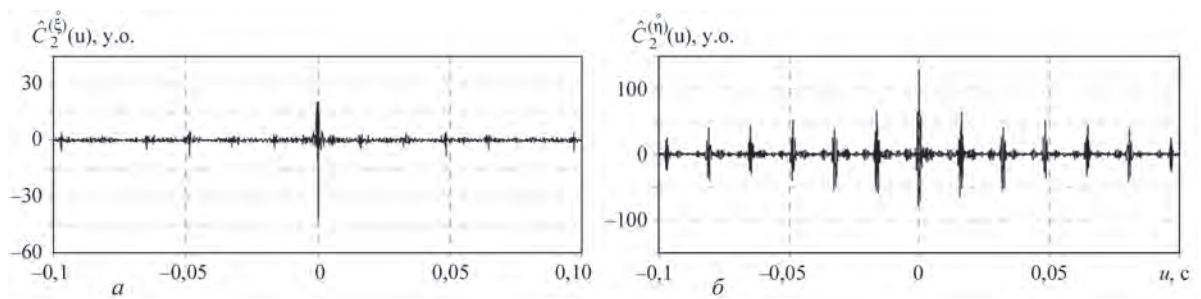


Рис. 16. Другий косинусний кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

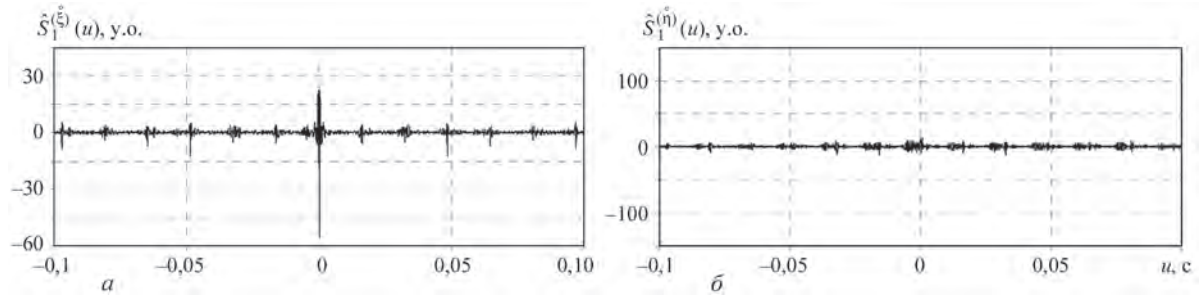


Рис. 17. Перший синусний кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

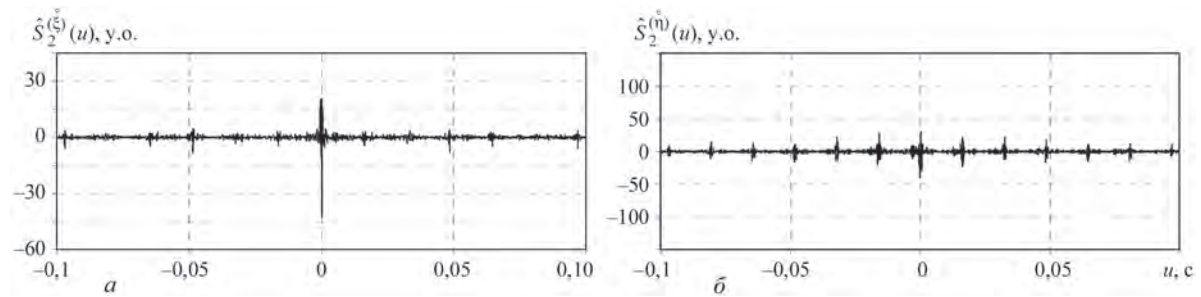


Рис. 18. Другий синусний кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

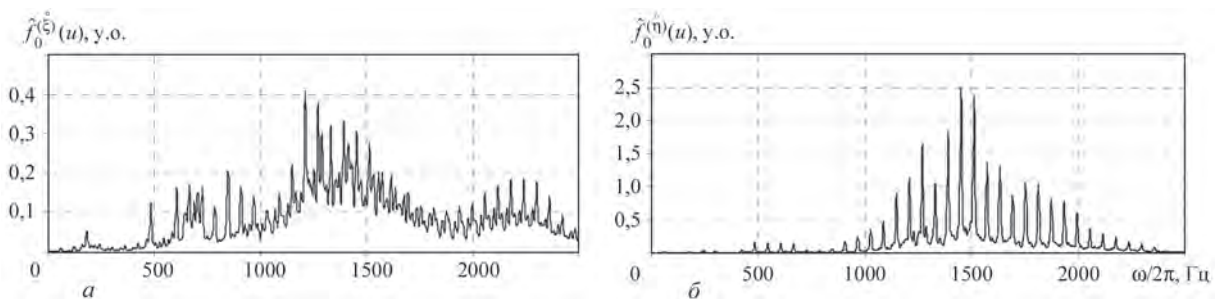


Рис. 19. Нульовий спектральний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги



тикальної та горизонтальної вібрацій наведено на рис. 19–23. З наведених графіків добре видно, що дійсна та уявна частини вертикальної і горизонтальної складових спектральних компонентів має піки на частотах, що відповідають частоті обертання валу, та кратних до неї частотах, а також зосереджені в смугах частот: вертикальна від 500 до 2500 Гц, горизонтальна – від 1000 до 2000 Гц.

Проведемо взаємкореляційний аналіз вертикальної та горизонтальної складових вібраційного сигналу. Залежність функціоналу від пробного періоду показана на рис. 24. З отриманого графіка ба-

чимо, що період нестационарності рівний приблизно 0,0165 с та відповідає частоті обертання валу.

Графіки взаємкореляційних компонентів наведені на рис. 25–27. Хвости взаємкореляційних компонентів містять потужні викиди з частотою обертання валу. Структуру взаємкореляційної функції визначають нульовий взаємкореляційний компонент, косинусна складова другого компонента, а також синусна складова першого, компонента. Рештою складових можна знехтувати.

Взаємоспектральні компоненти взаємоспектральної густини стохастичної складової наведено

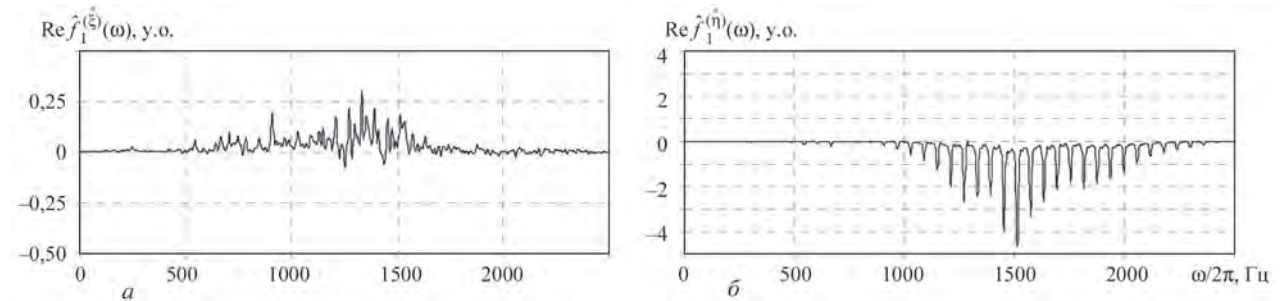


Рис. 20. Дійсна частина першого спектрального компонента вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

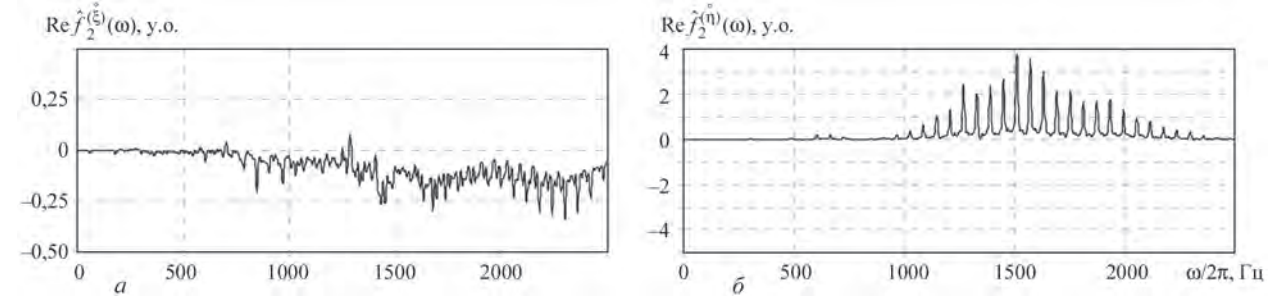


Рис. 21. Дійсна частина другого спектрального компонента вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

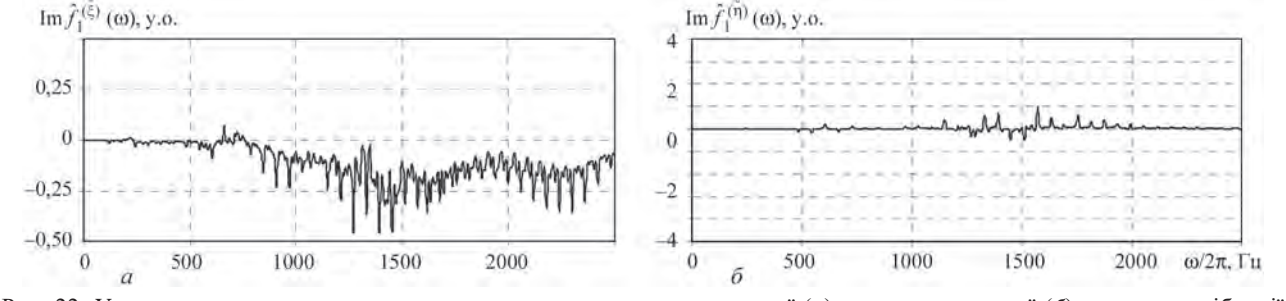


Рис. 22. Уявна частина першого спектрального компонента вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

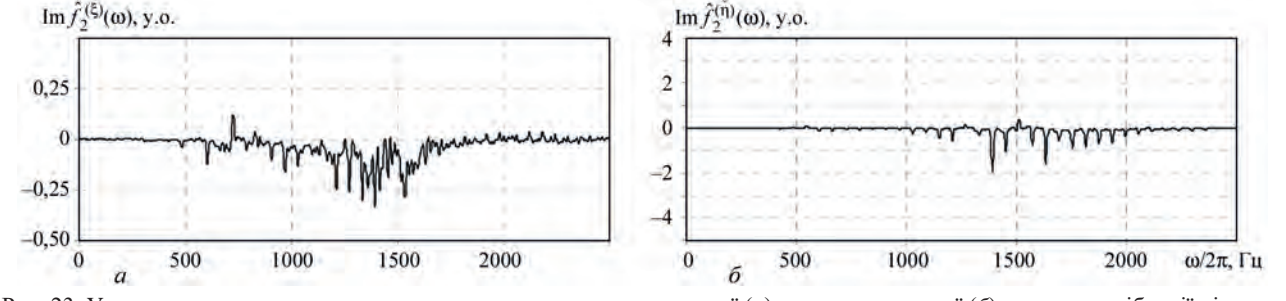


Рис. 23. Уявна частина другого спектрального компонента вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації підшипника кочення з дефектом на зовнішньому кільці

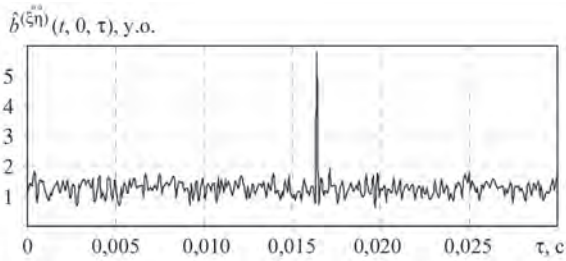


Рис. 24. Залежність функціоналу взаємної не стаціонарності

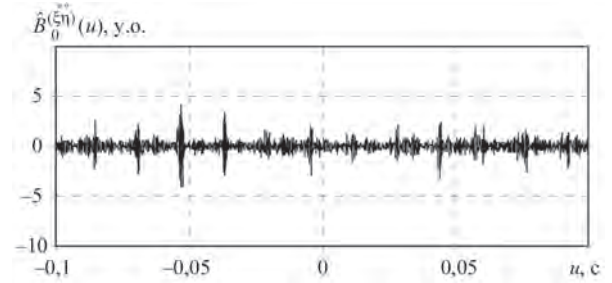


Рис. 25. Нульовий взаємкореляційний компонент

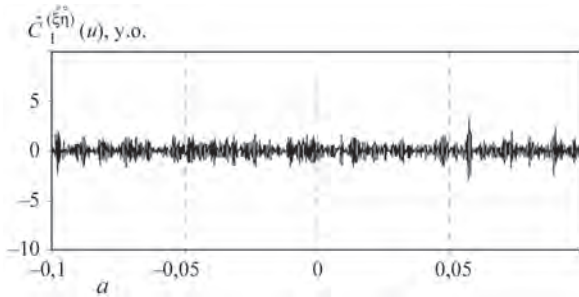


Рис. 26. Перший косинусний (а) та синусний (б) взаємкореляційні компоненти

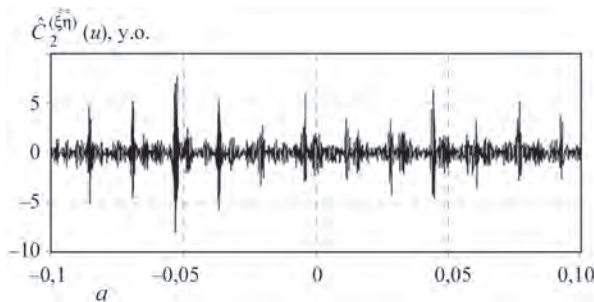
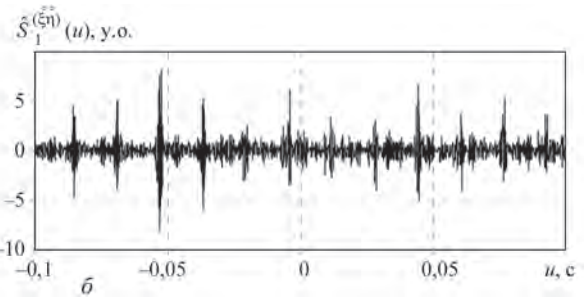
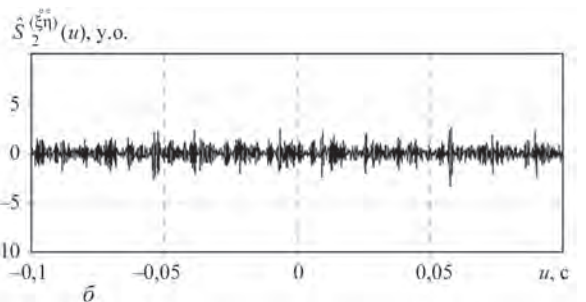


Рис. 27. Другий косинусний (а) та синусний (б) взаємкореляційні компоненти



на рис. 28–30. З наведених графіків добре видно, що кожна зі складових взаємоспектральних компонентів має піки на частотах, що відповідають частоті обертання валу та кратних до неї частотам. З рисунків видно, що нульовим взаємоспектральним компонентом (рис. 28) можна знехтувати, вищі взаємоспектральні компоненти формують структуру взаємоспектральної густини. Слід зауважити, що взаємоспектральні густини як дійсних, так і уявних частин взаємоспектральних компонентів зосереджені в смузі частот від 1000 до 2000 Гц.

Інтегральна функція когерентності двох взаємозв'язаних вібраційних сигналів вертикальної та горизонтальної складових центрифуги наведена на рис. 31. З рисунка видно, що вона має вигляд гребінки в смузі 0,5...2,5 кГц. Переніс по частоті у

вищу смугу пояснюється тим, що гармоніки частоти обертання валу (близько 60 Гц) промодульовані високочастотними смуговими процесами, спектри яких також гребінчасті.

Такий висновок впливає також з аналізу покомпонентних функцій когерентності (рис. 32).

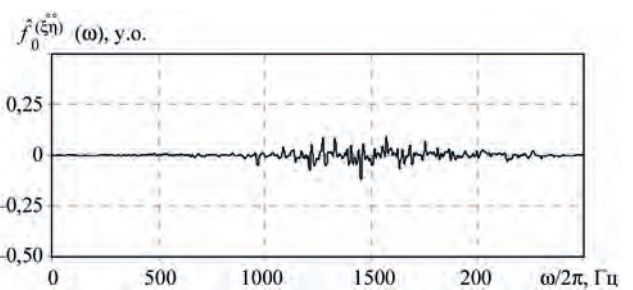


Рис. 28. Нульовий взаємоспектральний компонент

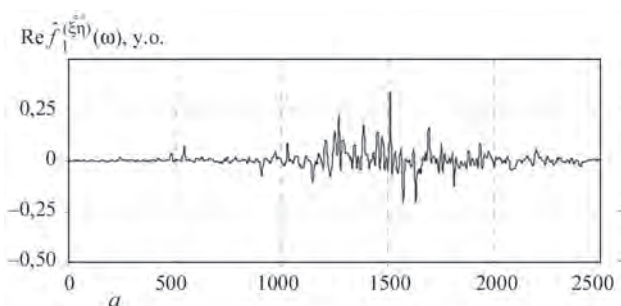
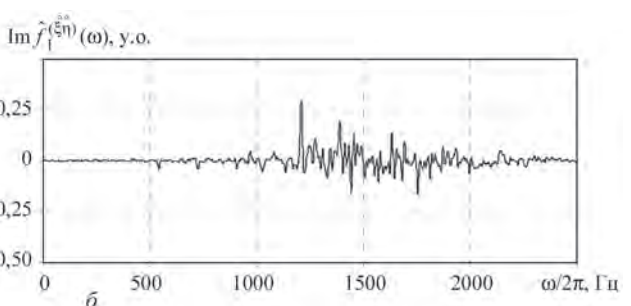


Рис. 29. Дійсна (а) та уявна (б) частина першого взаємоспектрального компонента





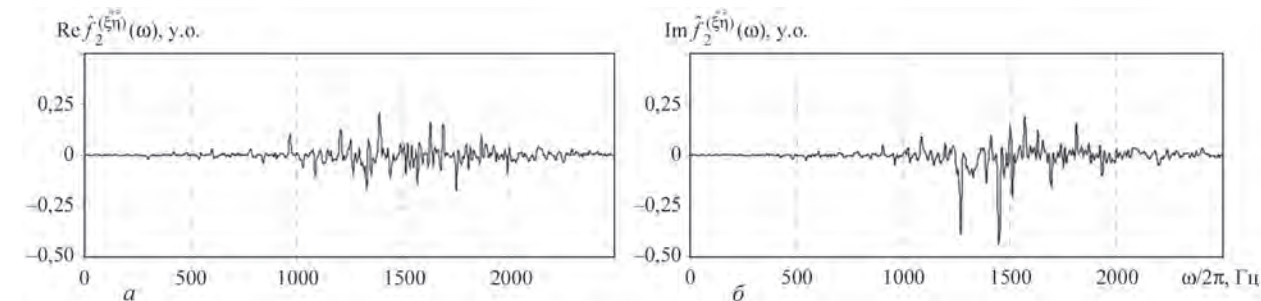


Рис. 30. Дійсна (а) та уявна (б) частина другого взаємоспектрального компонента

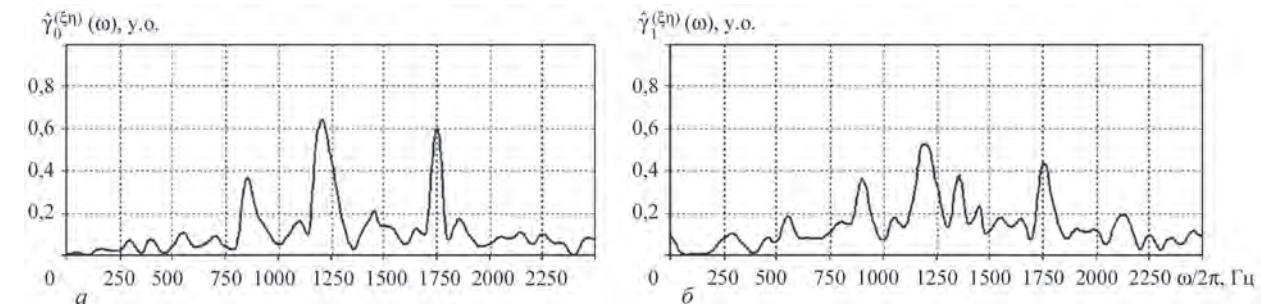


Рис. 31. Оцінка інтегральної функції когерентності при  $k = 0$  (а) та  $k = 1$  (б)

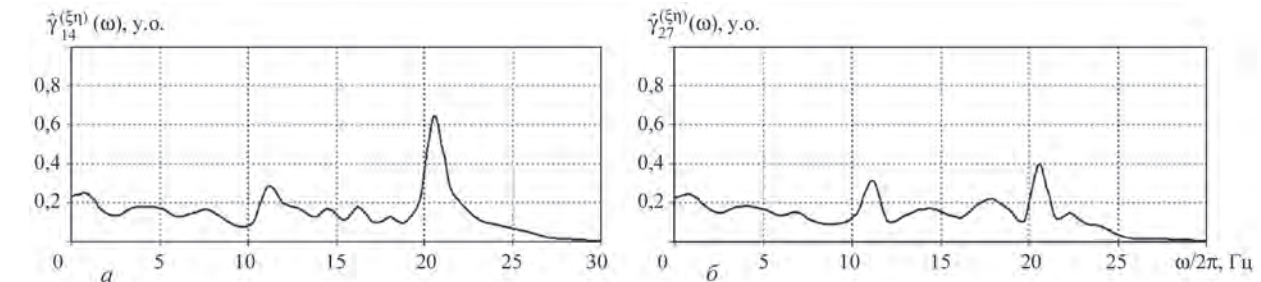


Рис. 32. Покомпонентна функція когерентності 3-го (а) та 5-го (б) порядків

Отримані функції когерентності відображають дефект обертового вузла, який проявляється у нерівномірному радіальному навантаженні зовнішнього кільця підшипника кочення.

### Висновок

Застосування взаємного нестационарного аналізу до вібраційних сигналів дозволяє виявляти локальні дефекти вузлів механізму на ранній стадії їх зародження, що в свою чергу дозволяє уникнути аварійних ситуацій. Поява дефектів в елементах вузлів механічної системи призводить до того, що вібраційні сигнали набувають властивостей періодичної нестационарності 2-го порядку та можуть бути описані у вигляді ПКВП.

Значення нульового взаємоспектрального компонента, а також вищих взаємоспектральних компонентів, які помітно відрізняються від нуля, зосереджені в смузі 0,6...2,0 кГц. Встановлено, що взаємопов'язаність нестационарних властивостей сигналів є сильнішою, ніж їх пов'язаність у стаціонарному наближенні. Показано, інтегральна функція когерентності вібрацій центрифуги має вигляд гребінки в смузі 0,5...2,5 кГц. Перенесення по частоті у вищу смугу пояснюється тим, що гармоніки з частотою обертання вала промоду-

льовані високочастотними смуговими процесами, спектри яких також гребінчасті. Такий висновок впливає також з аналізу покомпонентних функцій когерентності.

Виявлені властивості функцій когерентності є наслідком того, що розподілений дефект підшипника кочення, який проявляється у нерівномірному радіальному навантаженні його зовнішнього кільця, супроводжується розвинутим локальним дефектом, а саме утворенням сколів на цьому кільці. Внаслідок цього вібраційний сигнал має гострі викиди, які зумовлені зіткненнями тіл кочення зі сколами. Виявлений дефект був підтверджений під час ремонту обертового вузла.

### Список літератури/References

1. Javorskyj I.M., Kravets I.B., Matsko I.Y., Yuzefovych R.M. (2017) Periodically correlated random processes: Application in early diagnostics of mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **83**, 406–438.
2. Gardner W.A. (1994) *Cyclostationarity in communications and signal processing*. New York, IEEE Press.
3. Hurd H.L., Miamee A. (2007) *Periodically Correlated Random Sequences. Spectral Theory and Practice*. New Jersey, Wiley–Interscience.
4. Napolitano A. (2012) *Generalizations of Cyclostationary Signal Processing: Spectral Analysis and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, IEEE Press.

5. Javorskyj I.M., Yuzefovych R.M., Matsko I.Y., Zakrzewski Z. (2016) Coherence function of interrelated Periodically Nonstationary Random Processes. *Radioelectronics and Communication Systems*, 59, 3, 128–140.
6. Javorskyj I.M., Yuzefovych R.M., Matsko I.Y., Zakrzewski Z. (2017) Component-wise coherence function for jointly related periodically non-stationary random processes. *Ibid*, 60, 1, 28–41.

## APPLICATION OF A SPECIALIZED NONDESTRUCTIVE TESTING DEVICE FOR ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS OF BEARING ASSEMBLIES BY THE METHODS OF MUTUAL NONSTATIONARY ANALYSIS

R.M. Yuzefovych<sup>1,2</sup>, I.M. Javorskyj<sup>1,3</sup>, O.Y. Dzeryn<sup>1</sup>, G.R. Trokhym<sup>1</sup>, I.H. Stetsko<sup>1</sup>, I.Y. Matsko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.  
E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

<sup>2</sup>National University «Lvivska Politehnika». 12 S.Banderi Str., 79013, Lviv, Ukraine

<sup>3</sup>Technological-Natural University. 7 Al. prof. S. Kaliskiego, 85796, Bydgoszcz, Poland

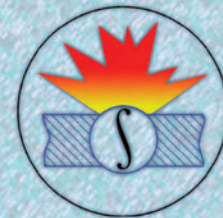
Vibration signals from complex mechanical systems, which are under the impact of dynamic loading, are formed by responses from many assemblies. When studying such signals, the question arises of analysis of the impact of possible defects on their structure, which initiate in each of the elements of the ball bearing assembly. Defect initiation in mechanical system elements results in nonlinear effects in the properties of vibrations. Such effects lead both to appearance of new harmonics in the deterministic component of vibration, and to interaction of this component with stochastic oscillations, which are due to fluctuations of the thickness and viscosity of lubrication, changes of friction forces, spontaneous and uncontrollable changes of working loads, etc. The above interaction leads to violation of the strict periodicity of deterministic oscillations, they are modulated by phase and amplitude. The noted features of vibrations can be adequately described by a mathematical model in the form of mutual periodically correlated random processes. The work presents the integral function of coherence, which quantitatively characterizes the stochastic inter-relation between the properties of non-stationarity of two periodically correlated random signals that is manifested in the periodical change in time of their mutual spectral characteristics, as well as component function of coherence, which is determined by mutual spectral densities of individual modulating processes. Technical characteristics of the developed specialized nondestructive testing device «Compact-Vibro» are given. Results are considered, which were obtained using this device during performance of vibration examinations of industrial facilities of Ukraine. 6 Ref., 32 Fig.

*Keywords: periodically correlated random processes, coherence function, nondestructive testing device, vibration signal, diagnostics*

Надійшла до редакції  
02.12.2019

### X МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах»

**Україна, Одеса, готель «Аркадія»  
14 – 18 вересня 2020 р.**



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

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 червня 2020 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць дев'яти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті:  
<http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

#### Контрольні дати

|  |                  |
|--|------------------|
| Надання заявок на участь та тез доповідей                            | до 19.06.2020 р. |
| Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі | до 17.07.2020 р. |
| Оплата реєстраційного внеску   | до 15.09.2020 р. |

#### Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
вул. Казимира Малевича 11  
м. Київ, 03150, Україна  
тел. / факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2020>



# ПЕРСПЕКТИВЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И ДРУГИХ СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.А. Троицкий

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Показана возможность автономного перемещения на магнитных платформах рентгеновских аппаратов и твердотельных радиоскопических преобразователей, которая делает радиационный неразрушающий контроль более информативным. Описаны принципы построения новых технологий контроля качества сварных соединений сложных металлоконструкций и магистральных трубопроводов, которые могут быть успешно распространены на ответственные трубы малого диаметра тепловых и атомных электростанций. Замена пленочной радиографии на портативную радиоскопию (рентген-телевидение) с использованием подвижных ПЗС-детекторов расширит области применения дефектоскопии в промышленности. Приведены примеры изготовления и использования радиоскопических детекторов, стоимость которых на порядок ниже, чем стандартных плоскопанельных преобразователей. Библиогр. 21, рис. 15.

*Ключевые слова:* радиационный беспленочный контроль, сварные кольцевые швы, трубопроводы, магнитная платформа, радиоскопический преобразователь, ПЗС-матрица, Wi-Fi, видеокамера, плоскопанельные и миниатюрные преобразователи

Трубопроводный транспорт – это один из важнейших способов коммуникаций в обществе и промышленности с большими объемами контроля и мониторинга. Так, по данным ПАО «Газпром», при эксплуатации ими 170 тыс. км газовых магистралей, ремонтно-восстановительные работы происходят ежегодно на 200 тыс. кольцевых сварных соединений. Кольцевые швы проверяются при строительстве и эксплуатации трубопроводов. Поэтому совершенствование технологий контроля их качества имеет большое значение.

Для магистралей большого диаметра используются три основных типа труб: прямошовные, спиральные и многосекционные трубы. Все трубопроводы имеют различные гибы, отводы, врезки разного диаметра и многие другие элементы, которые, как и основное тело магистрали, должны периодически диагностироваться. Не всегда и не везде может быть организовано прохождение внутритрубных дефектоскопов или пропускание кроулеров для панорамного просвечивания труб изнутри.

При строительстве и мониторинге состояния эксплуатируемых трубных магистралей, несмотря на обилие различных физических методов неразрушающего контроля (НК), главным остается радиационный контроль.

Статистика показывает, что чаще всего все разрушения трубопроводов происходят по кольцевым швам, производимым при строительстве.

На рис. 1 показаны основные схемы просвечивания сварных соединений трубопроводов [1, 2]. Схем просвечивания, как и элементов, подлежа-

щих контролю, намного больше, чем изображено на рис. 1. В будущем радиационный контроль будет реализовываться преимущественно с помощью твердотельных преобразователей. Это быстро, наглядно и дешево. Как в медицине, так и в технике пленочная радиография будет применяться только в исключительных случаях. При этом малогабаритные R-аппараты и твердотельные R-преобразователи будут крепиться и свободно перемещаться по объекту, по трубе (рис. 2).

Сначала необходимо научиться это делать на наиболее ответственных промышленных объектах, на трубах магистральных трубопроводов.

Устройство показанное на рис. 3 предназначено для R-контроля кольцевых монтажных швов, вдоль которых перемещаются R-аппарат и R-преобразователь, его конструктивные схемы представлены ниже.

На рис. 4 приведены примеры радиационного контроля кольцевых соединений магистральных трубопроводов. Это лучшее оборудование для цифрового радиационного контроля трубопроводов без рентгеновской пленки, в котором исполь-

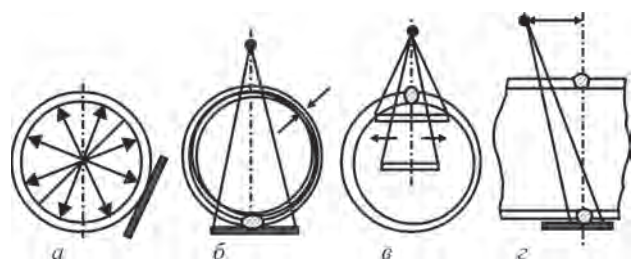


Рис. 1. Основные схемы просвечивания: а – панорамное просвечивание; б, з – контроль через две стенки; а, в – контроль одной стенки трубы



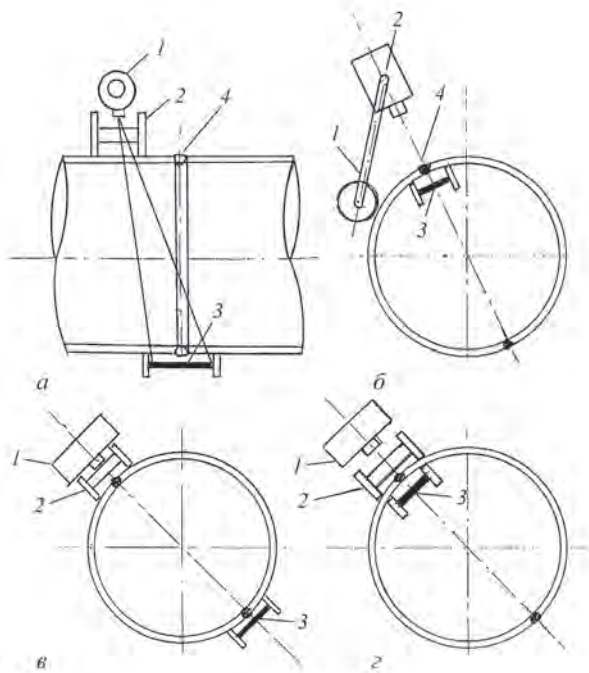


Рис. 2. Автономно перемещаемые R-аппарат (1) на магнитных колесах (2) вдоль сварного шва (4) и R-преобразователь (3) по внешней и внутренней поверхностям труб большого диаметра при просвечивании через две (а, в) и одну (б, г) стенки

зуются плоскпанельные стандартные R-преобразователи, т. е. твердотельные преобразователи.

Результаты просвечивания от твердотельного преобразователя отображаются на экране монитора, т. е. речь идет о замене пленочной радиографии на рентгеноскопию (рентген-телевидение), которая достаточно распространена на трубопрокатных заводах и в медицине.

В установках представленных на рис. 4 промышленный рентгеновский аппарат перемещается по мощной металлоконструкции, охватывающей трубу вблизи кольцевого сварного шва. Одновре-

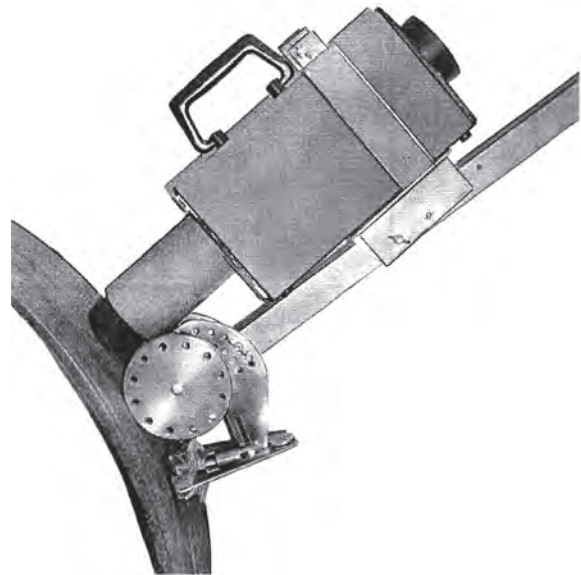


Рис. 3. Фото R-аппарата Арина-05 на подвижной магнитной платформе, располагаемой на трубе диаметром 920×12 мм

менно диаметрально противоположно ему перемещается плоскпанельный преобразователь, имеющий размеры 200×200 мм. Эта конструкция имеет массу 80 кг, монтируется на каждом кольцевом шве, подлежащему контролю.

Устройство (рис. 4) имеет узко специализированное назначение – просвечивание только кольцевых сварных соединений через две стенки (рис. 1, б, г). Оно не годится для просвечивания других видов сварных соединений, например, показанных на рис. 1, а также швов различных гибов, отводов, врезок и других элементов трубных магистралей.

Основными недостатками контроля (рис. 4) является громоздкость металлоконструкции, ее привязанность к диаметру, большая продолжительность вспомогательных процедур, высокая стоимость, длительность контроля. Эта зада-



Опытно-промышленная эксплуатация автоматизированного мобильного дефектоскопического комплекса (МГ «Сила Сибири», труба 1420×21,7)

Рис. 4. Пример радиационного контроля качества кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов: масса комплекса – 80 кг; активная площадь плоскпанельного детектора – 200×200 мм; размер пикселя детектора – 200 мкм; скорость контроля сварного шва трубы 1420×25,8 мм – 40 мин; чувствительность контроля, класс по ГОСТ 7512 – 1 (журнал «Территория «Нефтегаз», 2016, № 10)

ча может быть решена лучше, если R-аппарат и R-преобразователь расположить и передвигать по поверхности трубы на автономных магнитных тележках (рис. 3). Такой способ мобильного контроля не имеет перечисленных недостатков, присущих контролю (см. рис. 4), и отличается универсальностью в реализации всех способов просвечивания, например, указанных на рис. 1, не имеет ограничений ни по диаметрам и ни по зонам просвечивания. Кроме того, при мобильном контроле можно отказываться от очень дорогих крупнопанельных R-детекторов (рис. 4). Желательно использование портативных рентгеновских аппаратов и миниатюрных твердотельных преобразователей, располагаемых на автономно радиоуправляемых магнитных платформах. Автономные передвижные дистанционно управляемые платформы излучателя и детектора должны иметь видеокамеры, что позволит одновременно фиксировать оптическую и радиационную информацию в зоне контроля.

На рис. 5, 6 показаны примеры предполагаемых схем просвечивания кольцевого сварного соединения через две стенки с помощью портативного рентгеновского аппарата 1, располагаемого на подвижной магнитной платформе 2. Схемы (рис. 5, 6) могут быть использованы для выполнения просвечивания любых элементов трубопроводов, продольных, спиральных и других швов.

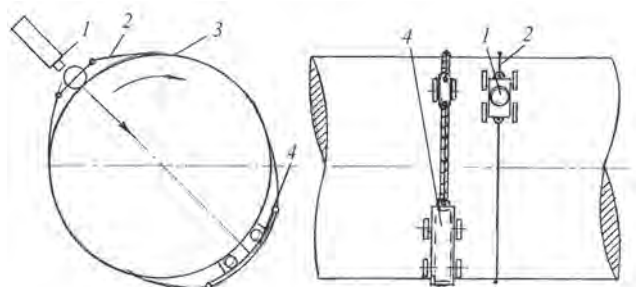


Рис. 5. Схема автономного перемещения на собственных платформах R-аппарата 1 и R-преобразователя 4 на страховочных тросах 2, 3 – труба

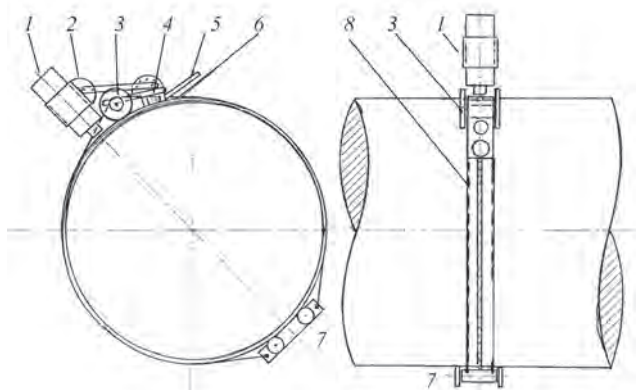


Рис. 6. Схема связанного с помощью тросов 8 перемещения R-аппарата 1 и R-преобразователя 7; 2–6 – элементы магнитной платформы

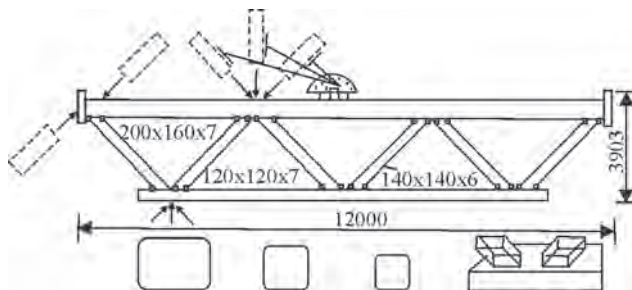


Рис. 7. Сваренная с помощью роботов ферма, подлежащая обязательному просвечиванию

На рис. 5 R-аппарат 1 и R-преобразователь 4 автономны, а на рис. 6 они связаны между собой. На рис. 6 показано, как R-аппарат 1 и подвижный твердотельный преобразователь 7 с помощью двух тросов (гибкой ленты и т. п.) объединяются в единое устройство, способное одновременно вращаться вокруг трубы так, как это делается при контроле с помощью специальной металлоконструкции (рис. 4). При этом на порядок снизится металлоемкость контролирующего устройства.

Очевидно, что R-аппарат и портативный твердотельный преобразователь могут занимать любые пространственные положения относительно друг друга и других трубопроводных элементов. Способ мобильного радиационного контроля с помощью автономно перемещаемых по внешней поверхности объекта источника излучения и R-преобразователя, расширяет возможности НК не только трубопроводов, но и других конструкций, например, ферм (рис. 7) и т. п. металлоконструкций.

Важным преимуществом раздельного перемещения R-аппарата и R-преобразователя является возможность рассматривать внутренние несплошности металла под разными углами в разных ракурсах и открывает новые технологические возможности. Для сложных металлоконструкций (рис. 7) важно сочетание точечного и подвижного расположения R-аппарата на сооружении.

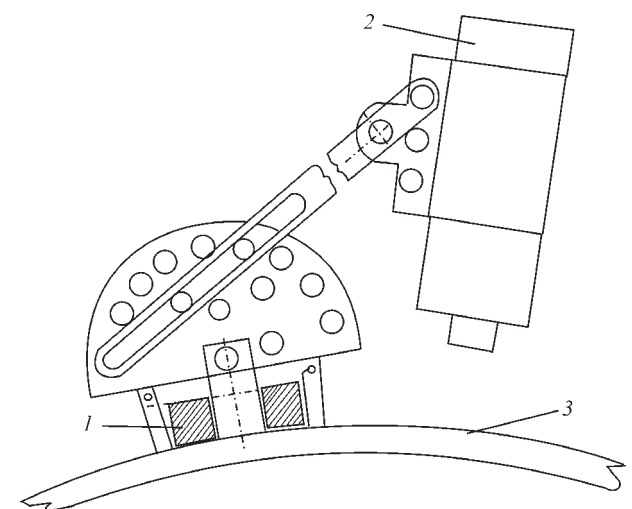


Рис. 8. Магнитное крепление (1) на трубе (3) портативного R-аппарата (2)



На рис. 8 показано крепление R-аппарата, с помощью которого удобно выполнять изучение металлоконструкций, например, показанной на рис. 7 стандартной фермы. Крепление R-аппарата 2 осуществляется с помощью постоянного магнита 1, изготовленного из редкоземельных металлов, сила удержания которого в несколько раз превышает вес R-аппарата. С помощью точечного крепления можно с двух диаметрально противоположных размещений R-аппарата просветить и все кольцевое соединение трубопровода (рис. 9). Сочетание точечного и ограничено подвижного крепления излучателя показано на рис. 10. Здесь диск с отверстиями для штанги, на которой крепится R-аппарат, вынесен на подвижное магнитное колесо. Такое подвижное крепление R-аппарата изображено на рис. 6. Здесь мощный удерживающий магнит 4 обеспечивает расположение R-аппарата в любых пространственных положениях.

При реализации автономного расположения на объекте подвижных R-аппарата и R-преобразователя способ R-контроля будет состоять из следующих обязательных процедур:

- разметка на поверхности объекта мест, подлежащих просвечиванию и другие подготовительные работы;

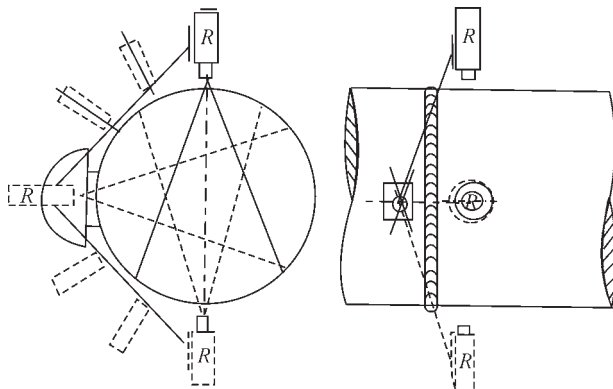


Рис. 9. Просвечивание кольцевого шва с трех позиций R-аппарата

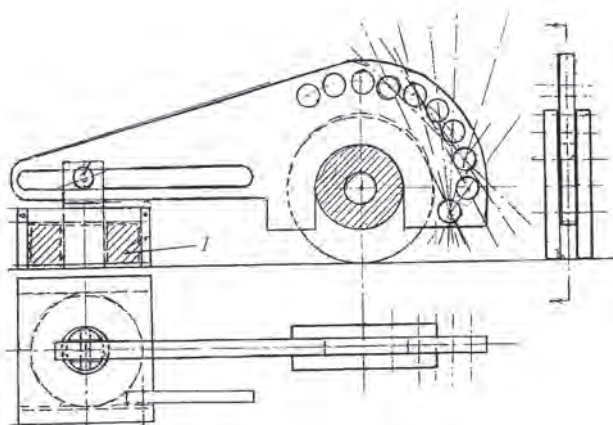


Рис. 10. Ограничено подвижное крепление R-аппарата (I – удерживающий магнит)

- размещение подвижных магнитных платформ на поверхности объекта (трубы) для последующего крепления на них источника излучения и R-преобразователя и проверка их подвижности и взаимных положений;

- по видео изображениям на мониторе, полученным от web-камер, установленных на этих платформах, определяется их взаимное расположение и положение их относительно контролируемой зоны;

- выполняются все мероприятия по технике безопасности, прописанные регламентом, перед монтажом R-аппарата и включением излучения;

- устанавливаются на платформах излучатель и R-детектор;

- после подачи высокого напряжения и начала излучения на экране монитора пульта управления высвечиваются три изображения: рентгеновское, которое дает R-преобразователь, и два оптических изображения от видеокамер R-аппарата и R-преобразователя;

- дистанционное перемещение R-аппарата и R-преобразователя до и в процессе просвечивания позволяет уточнить форму, размеры и глубину залегания несплошности в реальном времени;

- обнаруженный недопустимый дефект фиксируется на электронных средствах записи информации и отмечается на поверхности объекта;

- далее R-аппарат и твердотельный преобразователь на магнитных платформах перемещаются на следующее по регламенту место просвечивания.

Обычно для кольцевых швов труб малого диаметра, просвечиваемых через две стенки, делается 2–3 экспозиции. Количество экспозиций зависит от ответственности трубопровода, диаметра, возможностей используемой техники. Поэтому, чем ответственнее трубопровод, тем больше требуется экспозиций, тем больше преимуществ в практической эффективности мобильного способа радиационного контроля, автономности излучателя и R-преобразователя, способности их перемещаться друг относительно друга.

Для массовых многократно повторяющихся однотипных процедур, уменьшения вспомогательного технологического времени эффективно жесткое соединение магнитных платформ (см. рис. 6), т. е. для контроля, подобного рис. 4. При этом исключаются ошибки в диаметрально противоположном расположении R-аппарата и R-преобразователя, исключается электропривод одной из платформ. Жесткое объединение R-аппарата и R-преобразователя может быть выполнено с помощью троса, цепи (тонкой полосы металла).



Удобство работы с излучателем, располагаемым на внешней поверхности трубы, с освоением описанных новых возможностей со временем изменит отношение к кроулерам и другим средствам панорамного внутритрубного излучения (рис. 1, а). Расширятся и другие возможности радиоскопического НК, который будет выполняться только с помощью R-аппаратов, располагаемых на внешней поверхности объекта (трубы).

В Японии, странах Европы интенсивно развивается радиоскопия на основе портативных высокочастотных рентгеновских аппаратов непрерывного излучения. Импульсные R-аппараты с их ограниченными дефектоскопическими возможностями распространены только в постсоветских странах. Для размещения и перемещения по поверхности объекта важно иметь портативные R-аппараты непрерывного излучения, которые выпускаются в достаточном количестве в разных странах.

При расположении R-аппарата на внешней поверхности трубы в качестве R-детектора может быть любое радиоскопическое (радиографическое) устройство, включая рентгеновскую пленку. Для получения результата контроля в цифровом виде [1–4] должна быть применена компьютерная обработка. Все разнообразие [5–14] схем получения цифровых изображений сводится к трем:

- традиционная пленочная радиография с компьютерной цифровой обработкой;
- технологии с различными промежуточными носителями информации, более совершенными, чем R-пленка;
- непосредственное радиоскопическое преобразование на основе ПЗС и КМОП-матриц.

Сравнение этих принципиальных схем детектирования показало, что по основным потребительским показателям: расход времени и стоимость

получения цифровой информации эти технологические процедуры приблизительно соотносятся как 10:5:1, а стоимость оборудования и расходных материалов как 5:20:1. Это ориентировочное соотношение. В каждой стране оно зависит от многих ситуативных обстоятельств. Эти соотношения непостоянны во времени из-за текущей конъюнктуры рынка. Они зависят от технической культуры, заинтересованности сторон и т. д. Не подлежит сомнению, что время, развитие электроники работают на электронную радиоскопию, на рентген-телевидение, которая в этом сравнении взята за единицу. Без сомнений радиоскопия в реальном времени без расходных материалов должна заменить два других предыдущих подхода.

Для того чтобы перейти от пленочной радиографии к автоматизированной высококачественной радиоскопии необходимо было создать соответствующее программное обеспечение (ПО), которое уточняется под каждое конкретное техническое решение и функциональные требования. Была создана и апробирована целая серия модулей ПО: измерения, коррекции, фильтрации и улучшения качества изображений, модули документирования и архивирования, сшивания отдельных фрагментов в полное радиоскопическое изображение. Основой этой многолетней работы стала адаптация наработок по цифровой обработке рентгеновских пленок применительно к электронным радиоскопическим изображениям, получаемым от твердотельных ПЗС-сенсоров. Высокая разрешающая способность миниатюрных R-детекторов дала старт новым технологиям радиационного контроля. Например [10, 15], сочетание контактного крупноформатного просвечивания, на котором намечаются зоны возможных скрытых дефектов, и удаленное от поверхности (рис. 11) расположение R-сенсора высокого разрешения позволяет изучать в реальном времени сомнитель-

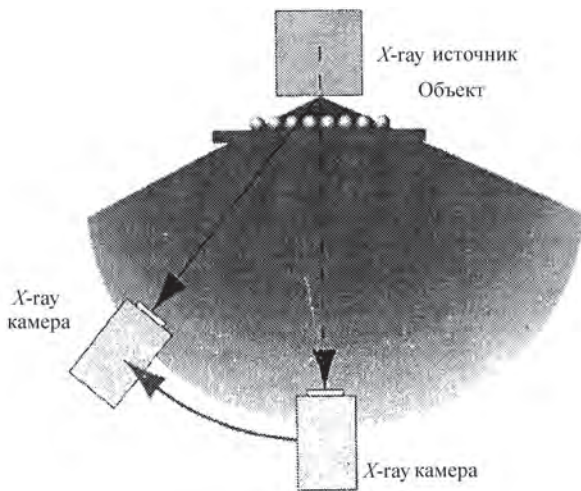


Рис. 11. Диаграмма излучения R-аппарата и удаленные расположения R-сенсоров для увеличенных изображений внутренних несплошностей объекта

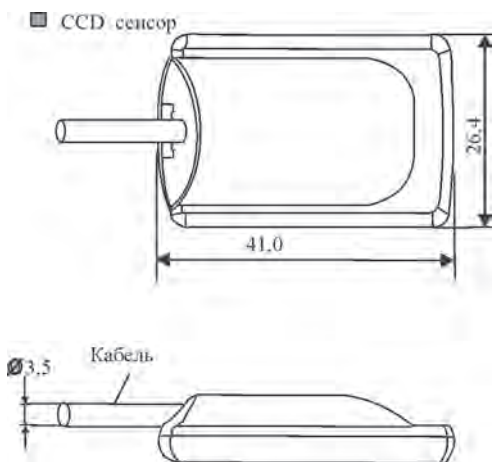


Рис. 12. Миниатюрный сенсор S10810-11 фирмы «Hamamatsu», перемещаемый по металлической пластине внутри R-преобразователя

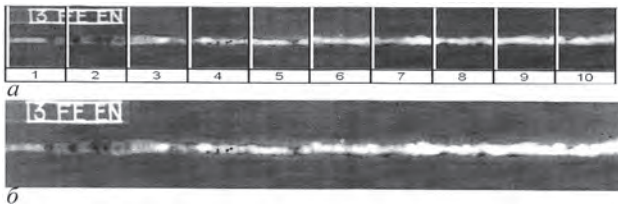


Рис. 13. R-снимки десяти участков сварного шва (а) и результаты их сшивания в единую радиограмму (б)

ную зону большого объекта, измерять размеры и расположение в ней внутренних дефектов.

Поэтому далее будем рассматривать только прямое радиоскопическое преобразование на основе ПЗС и КМОП-матриц.

В работе [1] описан R-детектор разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона для контроля протяженных объектов, состоящий из миниатюрного ПЗС-преобразователя типа S10810-11 (рис. 12) фирмы «Hamamatsu» и гибкой направляющей, по которой перемещается этот преобразователь (сенсор). В процессе контроля сенсор выполняет остановки продолжительностью в несколько секунд (до 10). Так, вдоль контролируемого объекта (сварного шва), по его поверхности, находясь в поле излучения (рис. 11) R-аппарата перемещается миниатюрный ПЗС-сенсор (рис. 12). На рис. 13, а показаны 10 рентгенограмм размером  $24 \times 36$  мм, соответствующих 10 экспозиционным остановкам сенсора (рис. 12) внутри R-детектора, располагаемого на поверхности сварного соединения. На рис. 13, б показан результат сшивания этих 10 отдельных радиограмм, размеры каждой из которых  $24 \times 36$  мм соответствуют размерам активной зоны (рис. 12) миниатюрного преобразователя S10810-11, в единую протяженную радиограмму (рис. 13, б), соответствующую размерам объекта – сварного соединения. Данный R-преобразователь на порядок дешевле, чувствительнее, чем крупнопанельные преобразователи со стандартными размерами  $200 \times 200$  мм, например, примененные в устройстве, показанном на рис. 4. Малоформатные ПЗС-матрицы, примененные в сенсоре (см. рис. 12, 13), отличаются высокими техническими данными, превышающими возможности крупноформатных радиоскопических панелей.

Основная стоимость такого R-преобразователя определяется стоимостью миниатюрного ПЗС-сенсора (рис. 12), активная зона которого в 6–7 раз меньше чем избыточная площадь активной зоны крупнопанельного преобразователя (рис. 4). Сенсор S10810-11 имеет размеры пикселя 25 мкм, разрядность АЦП 14 бит, Wi-Fi для передачи файлов, набор программ для отчетов и улучшения качества изображений, а так же др. программы.

Время получения одного цифрового рентгеновского снимка  $36 \times 24$  мм (см. рис. 12, 13) не более одной минуты, разрешение 20 пар линий на 1 мм.

Контроль адаптирован к постоянным и переменным X-гау полям.

В ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ изготавливают [16–20] и другие, более дешевые радиоскопические, рентгентелевизионные преобразователи (рис. 14, а, б) на основе фотоэлектронного преобразования излучений и оптического объектива. На рис. 14, а, б показан такой R-преобразователь разработанный ИЭС им. Е.О. Патона с размерами  $225 \times 425 \times 110$  мм и результаты его применения для просвечивания кольцевого шва стальной трубы диаметром  $57 \times 5$  мм. Подобные R-преобразователи с размерами активной зоны до  $300 \times 350$  мм успешно [21] использовались в ИЭС им. Е.О. Патона для контроля качества пластин бронежилетов. Устройство такого типа R-преобразователей поясняется на рис. 14, а. Здесь на флуоресцентный экран 3 направлено зеркало, далее следуют оптический объектив и видеокамера 4. Внешний вид преобразователя показан на рис. 14, б, а на рис. 14, в, г – негативное и позитивное изображение сварного шва, просвеченного на эллипс. Для получения этих изображений был использован R-аппарат РАП-150/300, фокусное расстояние 60 см, анодные напряжение и ток – 120 кВ и 10 мА. Полученное качество просвечивания (рис. 14) соответствует 1 классу ГОСТ 7512-82, выявляются канавки глубиной 0,2 мм. На рис. 14, в, г приведены рентгенограммы стальной трубы диаметром  $57 \times 5$  мм. В этом преобразователе была применена телекамера QHYSL-II, выпускаемая для астрономических съемок. Это недорогая (порядка 150 дол. США) черно-белая моно матрица размером  $4,83 \times 3,63$  мм с динамическим диапазоном 14 бит. Подобных сенсоров, подходящих для контроля качества сварных

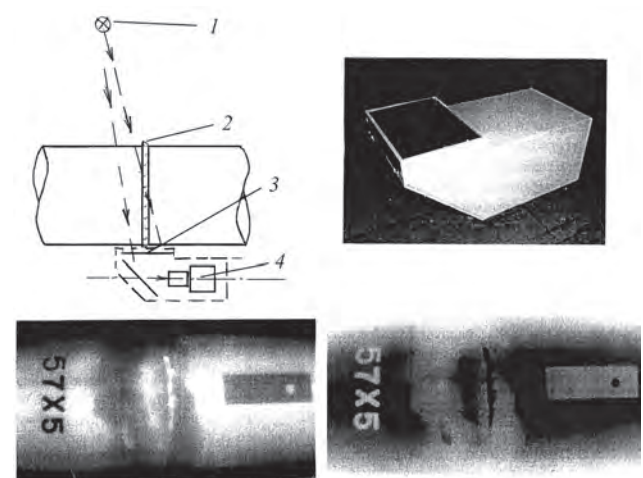


Рис. 14. Рентген-телевизионный контроль на основе радиоскопического преобразователя стальной трубы диаметром  $57 \times 5$  мм: а – схема просвечивания (1 – излучатель; 2 – сварной шов; 3 – флуоресцирующий экран; 4 – оптический объектив и видеокамера); б – R-детектор  $225 \times 125 \times 110$ ; в, г – негативное и позитивное изображение сварного шва, просвеченного на эллипс

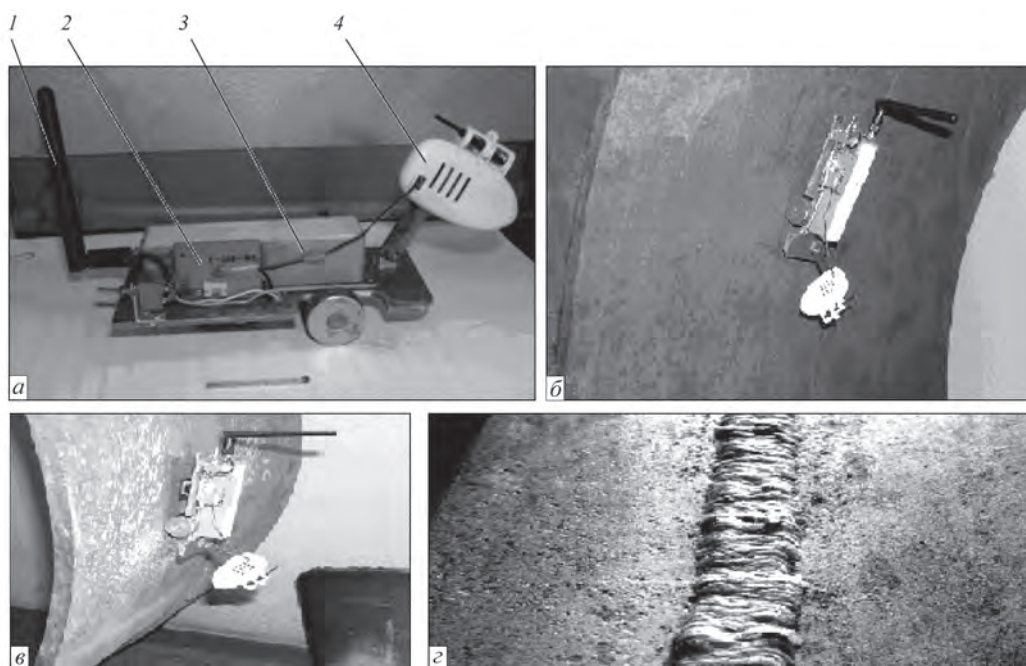


Рис. 15. Универсальная радиоуправляемая гибкая платформа для R-контроля качества поверхностей и металла: а – общий вид (1 – антенна 2,4 ГГц; 2 – блок радиоуправления; 3 – аккумулятор; 4 – Wi-Fi камера); б, в – потолочное и боковое положение на трубе диаметром 1200 мм; г – запись сварного шва

соединений достаточно много, их производят во многих странах. Для просвечивания сварных швов могут быть использованы линейные сенсоры, которые должны располагаться вдоль сварных швов (по оси и по околошовным зонам).

Фирма «Hamamatsu» выпускает различные линейные сенсоры, активная зона которых составляет 256, 409, 512 мм при напряжении до 160 кВ. Кроме линейности для сварных соединений, в которых могут быть мало раскрытые трещины, важно высокое разрешение, которое имеется в R-преобразователях (рис. 12–14).

R-сенсоры любого типа могут располагаться на радиоуправляемых гибких платформах (рис. 15), оборудованные Wi-Fi камерами, способными перемещаться в любых направлениях, в любых пространственных положениях. Подвижное устройство (рис. 15) оборудовано видеокамерой для объективного и точного визуально-измерительного контроля, для нахождения зон, подлежащих НК на наличие внутренних дефектов и повышенных напряжений. Подвижная платформа (рис. 15) имеет повышенную проходимость, гибкое тело и только два магнитных колеса, может нести измерители магнитного поля, лазерные измерители размеров, портативные R-преобразователи и др. средства НК. Сила отрыва от ферромагнитной поверхности этого транспортного средства составляет приблизительно 12 кг.

## Выводы

1. Развитие электронных и цифровых технологий с каждым годом будет все больше сокращать

использование в промышленности пленочной радиографии и другие технологии радиационного контроля с промежуточными носителями информации.

2. Миниатюрные твердотельные R-преобразователи на основе ПЗС и КМОС-матриц обладают более высоким разрешением, чем аналогичные крупнопанельные R-преобразователи, и дают новые технологические решения в автоматизации и роботизации, получения дополнительной информации о внутренних несплошностях просвечиваемого объекта. Стоимость и размеры таких R-преобразователей на несколько порядков ниже.

3. Новые технологические возможности при промышленном радиационном контроле открываются при автономном перемещении R-аппарата и R-преобразователей по поверхности изучаемого объекта. Каждый из этих основных элементов может занять более информативное положение для оценки качества зоны просвечивания, а внутренняя несплошность в реальном времени рассмотрена в разных ракурсах.

4. При массовом производстве однотипных дефектоскопических процедур, например, при контроле качества большого количества кольцевых монтажных соединений, R-аппарат и R-преобразователь, располагаемые на собственных магнитных платформах, с помощью троса, металлической ленты и т. п. объединяются в единую конструкцию.

5. Для протяженных объектов, например, сварных швов, удобно использовать линейные R-дат-



чики или R-преобразователи, содержащие один миниатюрный датчик (34×24 мм), перемещаемый по гибкой металлической полосе внутри преобразователя. Протяженность таких преобразователей может быть большая.

6. С появлением высокочувствительных видеокамер появилась возможность изготавливать радиоскопические недорогие, чувствительные преобразователи на основе флюорографических экранов. Стоимость таких устройств наименьшая среди рассмотренных решений и она мало зависит от формата и размеров R-преобразователя.

7. Мобильная рентгеноскопия (рентген-телевидение) с использованием подвижных R-аппаратов и R-сенсоров более информативна, портативна, требует меньше времени и материальных средств, легче вписывается в основные технологические процедуры изготовления механизмов и сооружений, чем технологии с промежуточными носителями информации.

8. В ИЭС им. Е.О. Патона по согласованным техническим условиям с Заказчиками изготавливаются магнитные платформы для перемещения по поверхности металлоконструкции R-аппаратов и R-преобразователей, описанных в данной работе.

## Список литературы

1. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Шалаев В.А. *Портативная рентген-телевизионная система на основе твердотельного преобразователя. Мат. конф. УкрНКТД-2019.*
2. Троицкий В.А., Михайлов С.Р. та ін. *Патент на корисну модель «Пристрій для рентгентелевізійного контролю»*, № 135146 від 25.06.2019р., бюл. 12.
3. Троицкий В.А. (2015) Развитие радиационного контроля сварных соединений, *Территория NDT*, **3**, 38–43.
4. *Dilrr NDT GmbH and Co. KG*. URL: [http://duerr-ndt.de/ru/product/Panels NDT. html](http://duerr-ndt.de/ru/product/Panels%20NDT.html).
5. Усачев Е.Ю., Валиков В.В. и др. (2014) Комплекс цифровой радиографии для ревизии сварных соединений трубопроводов. *Контроль. Диагностика*, **6**, 60–64.
6. Соснин Ф.Р. (2008) *Неразрушающий контроль: справочник в 8 т.* Ключев В.В. (ред.). Т. 1., Кн. 1. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2. Радиационный контроль. Изд. 2-е, перераб. и испр. Москва, Машиностроение.
7. Троицкий В.А. (2013) Флэш-радиография. *Территория NDT*, **4**, 44–49.
8. Майоров А.А. (2009) Цифровые технологии в радиационном контроле. *В мире неразрушающего контроля*, **3**, 5–12.
9. Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Пастовенский Р.О., Шило Д.С. (2015) Современные системы радиационного неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 23–35.
10. Грудский А.Я., Величко Ю.Я. (2011) Оцифровка радиографических снимков – это не очень просто. *В мире неразрушающего контроля*, **4**, 74–76.
11. Варламов А.Н. (2007) Опыт эксплуатации комплекса цифровой радиографии в полевых условиях. *Там же*, **1(35)**, 4–9.
12. Майоров А.А. (2007) Рентгеновское телевидение в промышленном НК. *Там же*, **1(35)**, 4–9.
13. Яценко С.Я., Кокоровец Ю.Я., Лозенко А.П. и др. (2015) Рентгентелевизионные системы «Полискан». *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 60–62.
14. Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Бухенский В.Н. и др. (2014) Флэш-радиография объектов АЭС на основе плоскостельных детекторов. *НК-информ*, **3(63)**, 6–14.
15. Цветкова Н.К., Новицкая К.А., Кологов А.В., Смирнов В.Г. (2014) Особенности применения комплексов цифровой радиографии при неразрушающем контроле корпусного производства. *Технология машиностроения*, **7**, 47–50.
16. Troitskiy V.A. Quik Industrial X-ray Testing without Intermediate Data carriers of Information, ASNT. «*The NDT Technician*», **15**, 4.
17. Troitskiy V.A. (2016) *Perspective of development of radiation testing of welded joints. 19 th WCNDT-2016*, Munich, Germany.
18. Troitskiy V.A. (2018) Digital radiographic systems for NDT of Welding joints. *Труды 12-й Европейской конференции. Cothenburd – 2018, Jone*, pp. 11–15.
19. Troitskiy V.A. (2018) Indust X-ray testing without intermediate data carriers of information. Польша. *Badanja Nieniszczace Diagnostyka*, **2**, 29–34.
20. Троицкий В.А. (ред.) (2018) *Дефектоскопия XXI века. Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона по развитию технологий НК*. Киев, Издательство ИЭС.
21. Троицкий В.А., Михайлов С.Р. и др. (2019) Высоочувствительные рентгентелевизионные системы на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер с накоплением изображений. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 41–46.

## References

1. Troitskiy, V.A., Karmanov, M.N., Shalaev, V.A. *Portable X-Ray TV system based on solid-state transducer. In: Proc. of Conf. UkrNDT-2019* [in Ukrainian].
2. Troitskiy, V.O., Mykhailov, S.R. et al. *Patent for utility model of «Device for X-Ray-TV Control»*, № 135146 of 25.06.2019, Bul. 12 [in Ukrainian].
3. Troitskiy, V.A. (2015) Development of radiation control of welded joints. *Territoriya NDT*, **3**, 38–43 [in Russian].
4. *Dilrr NDT GmbH and Co. KG*. URL: [http://duerr-ndt.de/ru/product/Panels NDT. html](http://duerr-ndt.de/ru/product/Panels%20NDT.html).
5. Usachev, E.Yu., Valikov, V.V. et al. (2014) Digital radiography complex for revision of pipeline welded joints. *Kontrol. Diagnostika*, **6**, 60–64 [in Russian].
6. Sosnin F.R. (2008) *Nondestructive testing: Refer. Book, In 8 Vol.* Ed. By V.I. Kluev. Vol. 1.: Visual and measuring control. Book 2: Radiation Control. 2nd Ed. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Troitskiy, V.A. (2013) Flash radiography. *Territoriya NDT*, **4**, 44–49 [in Russian].
8. Majorov, A.A. (2009) Digital technologies in radiation control. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, **3**, 5–12 [in Russian].
9. Troitskii, V.A., Mikhajlov, S.R., Pastovenskiy, R.O., Shilo, D.S. (2015) Modern systems of radiation non-destructive testing. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 23–35 [in Russian].
10. Grudskii, A.Ya., Velichko, V.Ya. (2011) Digitizing of radiographic images – it is not very simple. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, **4**, 74–76 [In Russian].
11. Varlamov, A.N. (2007) Experience of field operation of digital radiography complex. *Ibid.*, **1(35)**, 4–9 [in Russian].
12. Majorov, A.A. (2007) X-Ray TV technique in industrial NDT. *Ibid.*, **1(35)**, 4–9 [in Russian].
13. Yatsenko, S.Ya., Kokorovets, Yu.Ya., Lozenko, A.P. et al. (2015) «Polyskan» X-Ray TV systems. *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, **1**, 60–62 [in Russian].
14. Troitskii, V.A., Mikhajlov, S.R., Bukhenskiy, V.N. et al. (2014) Flash-radiography of NPS facilities based on plane-parallel detectors. *NK-inform*, **3(63)**, 6–14.
15. Tsvetkova, N.K., Novitskaya, K.A., Kologov, A.V., Smirnov, V.G. (2014) Features of application of digital radiography complexes at nondestructive testing of housing parts production. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **7**, 47–50 [in Russian].
16. Troitskiy, V.A. ? Quik industrial X-ray testing without intermediate data carriers of information, ASNT. *The NDT Technician*, **15**, 4.
17. Troitskiy, V.A. (2016) *Perspective of development of radiation testing of welded joints. In: Proc. of 19th WCN DT-2016*, Munich, Germany.
18. Troitskiy, V.A. (2018) Digital radiographic systems for NDT of welding joints. *In: Proc. of 12th Europ. Conf. (Cothenburd – 2018, Jone)*, pp. 11–15.
19. Troitskiy V.A. (2018) Industial X-ray testing without intermediate data carriers of information. Poland, *Badanja Nieniszczace Diagnostyka*, **2**, 29–34.

20. Troitskii V.A. (ed.) (2018) *Flaw detection of the XXI century. Main directions of PWI activities on development of NDT technologies*. Kiev, PWI [in Russian].
21. Troitskii, V.A., Mikhailov, S.R. et al. (2019) Highly-sensitive X-Ray TV systems based on the X-Ray shields and CCD-cameras with image accumulation. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 41–46 [in Russian].

## ПЕРСПЕКТИВИ РАДІАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ТА ІНШИХ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В.О. Троїцький

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

Показана можливість автономного переміщення на магнітних платформах рентгенівських апаратів та твердотільних радіоскопічних перетворювачів, яка робить радіаційний неруйнівний контроль більш інформативним. Описано принципи побудови нових технологій контролю якості зварних з'єднань складних металоконструкцій та магістральних трубопроводів, які можуть бути успішно поширені на відповідальні труби малого діаметру теплових і атомних електростанцій. Заміна плівкової радіографії на портативну радіоскопію (рентген-телебачення) з використанням рухомих ПЗЗ-детекторів розширює галузі застосування дефектоскопії у промисловості. Наведено приклади виготовлення та використання радіоскопічних детекторів, вартість яких на порядок нижча, ніж стандартних плоскочастинних перетворювачів. Бібліогр. 21, рис. 15.

*Ключові слова:* радіаційний безплівковий контроль, зварні кільцеві шви, трубопроводи, магнітна платформа, радіоскопічний перетворювач, ПЗЗ-матриця, Wi-Fi, відеокамера, плоскочастинні та мініатюрні перетворювачі

## PROSPECTS FOR RADIATION CONTROL OF MAIN PIPELINES AND OTHER COMPLEX STRUCTURES

V.A. Troitskii

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

Shown in the possibility of autonomous movement of X-ray units and solid-state radioscopic transducers on magnetic platforms, which makes nondestructive radiation testing more informative. Described are the principles of construction of new technologies for quality control of welded joints in complex metal structures and main pipelines, which can be successfully transferred to critical tubes of thermal and nuclear power stations. Replacement of film radiography by portable radioscopy (X-Ray-TV), using mobile CCD-detector will widen the area of flaw detection application in industry. Examples of manufacture and application of radioscopic detectors are given, the cost of which is by an order of magnitude lower than that of standard plane-parallel transducers. 21 Ref., 15 Fig.

*Keywords:* radiation filmless control, circumferential welds, pipelines, magnetic platform, radioscopic transducer, CCD-matrix, Wi-Fi, video camera, plane-parallel and miniature transducers

Поступила в редакцію 13.02.2020

ВЕДУЩАЯ ВЫСТАВКА В МИРЕ  
СВАРКА • РЕЗКА • ОБРАБОТКА

LET'S JOIN  
THE WORLD!  
13.-17. сентября 2021

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ  
СЕЙЧАС!

SCHWEISSEN  
& SCHNEIDEN  
No.1  
IN THE WORLD

# ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ГОРОДА КИЕВА

Р.И. Дмитриенко<sup>1</sup>, П.С. Юхимец<sup>1</sup>, В.М. Тороп<sup>1</sup>, И.Н. Кисель<sup>1</sup>, В.Н. Егоренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>КП «Киевтеплоэнерго». 01001, г. Киев, пл. И. Франка, 5. E-mail: [yehorenko.vnm@kte.kmda.gov.ua](mailto:yehorenko.vnm@kte.kmda.gov.ua)

Проанализированы факторы, влияющие на повреждаемость тепловых сетей. Представлен анализ фактической повреждаемости тепловых сетей в последние годы на примере города Киева. Проведена оценка эффективности проводимых сезонных гидравлических испытаний. Библиогр. 22, рис. 6.

*Ключевые слова:* тепловые сети, порывы, повреждаемость, гидравлические испытания, коррозия, дефекты, пробное давление

Проблемы, связанные с изношенностью городских тепловых сетей, являются общими для многих городов, и в разных странах они решаются по-разному. В представленной работе рассмотрен вопрос, связанный с украинскими реалиями на примере города Киева, который может быть довольно показательным. Большая часть тепловых сетей Киева проектировалась и вводилась в эксплуатацию до 1990 г., поэтому имеет много общего с сетями стран бывшего СССР. Сюда же относятся и проблемы, связанные с их изношенностью. Представленный ниже анализ повреждаемости тепловых сетей проведен по данным, которые были представлены специалистами ПАО «Киевэнерго». Объектом исследования является повреждаемость трубопроводов тепловых сетей города Киева и влияющие на нее факторы.

**Анализ нормативной документации.** Подробные результаты исследований, включая анализ нормативной документации и литературных данных, статистическую обработку, расчетные данные, лабораторные гидравлические испытания и испытания на коррозию приведены в материалах технического отчета [1].

Согласно правил [2], ежегодно, после ремонта, до начала отопительного сезона, тепловая сеть подвергается гидравлическим испытаниям (ГИ) пробным давлением на прочность и герметичность. Проведения ГИ оговариваются в соответствующей нормативной документации (НД). Требования, действующей НД Украины, регламентируют минимальные значения давления при проведении ГИ (одинаковые как для подающего, так и обратного трубопроводов), и соответствуют превышению в 1,25 раза по отношению к рабочему давлению. Рабочее давление закладывается в проектной документации и является одинаковым как для подающего, так и обратного

трубопроводов. Требования к минимальному давлению, температуре воды и продолжительности проведения ГИ являются общими для всей НД. Температура воды при ГИ не должна превышать 40 °С, время выдержки под давлением не менее 10 мин. При этом, согласно [2–4], независимо от того подающий это или обратный трубопровод, минимальные значения не могут быть меньше 1,6 МПа – для магистральных и 1,2 МПа – для распределительных трубопроводов, соответственно. Выполнение этих требований обуславливает повышение давления в обратных трубопроводах во время ГИ в 4...6 раз по отношению к их эксплуатационному давлению. Согласно [4, 5], эти минимальные давления должны составлять не ниже 1,6 МПа и должны выдерживаться в наивысших точках трубопроводных систем (возвышенностях на местности). В самых низших точках этих же систем (низинах на местности), с учетом добавления давления водяного столба, обусловленного разницей геодезических высот, эти давления будут еще выше. Отметим, что в российской НД [6] испытания пробным давлением подающих и обратных трубопроводов производятся отдельно, что не исключает возможности разных давлений при испытаниях.

**Анализ литературных данных.** Процессы общей и локальной коррозии являются одним из главных факторов снижения эксплуатационной стойкости трубопроводов тепловых сетей, деформационного старения, а также ухудшения механических характеристик и сопротивления металла разрушению. Коррозия приводит к уменьшению толщины стенки трубы, возникновению концентраторов напряжений, снижению сопротивления зарождению и распространению трещины [7]. Как внутренняя, так и внешняя коррозия, может быть как локальной (язвенной), так и равномерной сплошной. Причины, вызывающие сплош-

Дмитриенко Р.И. – <https://orcid.org/0000-0001-8842-5051>, Тороп В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8807-9811>,

Юхимец П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-8824-9024>, Кисель И.Н. – <https://orcid.org/0000-0002-4550-8065>

© Р.И. Дмитриенко, П.С. Юхимец, В.М. Тороп, И.Н. Кисель, В.Н. Егоренко, 2020



ную внутреннюю коррозию, разные. Наиболее частыми причинами внутренней коррозии являются: «подсос» в тепловую сеть сырой воды, а также развитие стояночной коррозии. Коррозионные язвы чаще всего развиваются под слоем накипи и продуктами коррозии. Согласно [8], основными причинами коррозии, приводящей к повреждениям, являются: протекания грунтовых вод сверху – 34,4 %, некачественная сетевая вода – 21 %, подтопление трубопровода – 16,3 %. При этом основными типами повреждений вследствие внутренней и внешней коррозии являются сквозные дефекты и разрывы труб. Наименее опасным и легко прогнозируемым повреждением является сплошная равномерная коррозия. Общая равномерная и местная коррозия – пятнами или язвами, могут развиваться одновременно, но с разными скоростями. Повышение коррозионной повреждаемости на подающих трубопроводах может быть связано с более высоким давлением и температурой сетевой воды, а также большим аэрированием. На обратном трубопроводе эти факторы коррозионного повреждения металла действуют в меньшей степени (растворенные газы, проходя по подающим трубопроводам, взаимодействуют с металлом трубы и снижают свою активность). Основные причины, которые могут вызвать ускоренную коррозию и порывы на обратных трубопроводах: стоячая вода в трубах после проведения ГИ и низкий гидравлический напор в трубах (механизм коррозионного поражения такой же, как и при стояночной коррозии) [9]. С увеличением содержания углерода и легирующих элементов в трубных сталях, наблюдается увеличение скорости коррозии [10]. Предварительная пластическая деформация более 0,1 % низколегированных трубных сталей (кроме стали 20), также приводит к увеличению скорости коррозии [11]. В [12], например, устанавливаются требования к предельной скорости наружной коррозии труб – 0,03 мм/г. Там же предписывают вести систематический контроль за внутренней коррозией по специально закладываемым во внутрь труб пластинам – индикаторам коррозии.

В настоящее время коррозионные повреждения теплопроводов обычно выявляются при проведении гидравлических и температурных (на максимальную температуру теплоносителя) испытаний. В Киеве температурные испытания не проводились с 1999 г. Наиболее эффективные и безопасные испытания повышенным давлением проводятся при температуре воды не более 40 °С. Целью указанных испытаний является выявление участков трубопроводов тепловых сетей, на которых подрастание дефектов в течение следующего года приведет к сквозному повреждению те-

плопровода. С одной стороны, высокое пробное давление в трубах, поврежденных коррозией, надежно выявляет места, которые находятся в состоянии предразрушения, и способствует притуплению возможных трещиноподобных дефектов, остающихся после испытаний, что уменьшает вероятность их дальнейшего роста [13]. В то же время происходит развитие локальных пластических деформаций, которые усиливают процесс коррозии, и уменьшают запас пластичности стали [7, 8]. При этом местонахождение участков, подвергшихся перегрузкам, остается неизвестным. В работе [14] отмечается, что в процессе ГИ высоким давлением обратного трубопровода в разы превышает его эксплуатационное давление. При этом в местах наиболее сильных коррозионных повреждений, приводящих к утонению трубопровода, развиваются локальные пластические деформации, способствующие дальнейшей активизации процессов коррозионного разрушения металла. Локальный характер пластических деформаций усложняет непосредственное их определение, хотя они могут достигать 7 % и более [15]. Все это приводит к увеличению скорости коррозионных процессов в этих местах. Изменение локальных механических и коррозионных свойств металла трубопроводов теплосетей является результатом их деформационного старения. Деформационное старение с одной стороны повышает предел текучести, с другой – облегчает процесс зарождения и роста трещин и увеличение скорости коррозии.

В работах [7, 16] в результате комплексного исследования влияния длительной эксплуатации и ГИ установлено что:

- стандартные механические свойства ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  и  $\psi$ ) практически не зависят от срока эксплуатации;
- длительная эксплуатация, также как и периодические нагружения, имитирующие ГИ, приводит к снижению характеристик сопротивления разрушению таких как: работа зарождения трещин, ударная вязкость, хладостойкость, критическое раскрытие берегов трещины и т. п.;
- характеристики сопротивления разрушению уменьшаются тем сильнее, чем дольше срок эксплуатации;
- ГИ уменьшают срок службы теплосетей;
- деградация свойств металла труб происходит из-за возникновения локальных микронапряжений, развития процесса деформационного старения и накопления дефектов в виде микротрещин.

Таким образом, учитывая двоякий характер испытаний повышенным давлением, его правильный выбор является чрезвычайно важным. Уровень давления во время ГИ должен быть таким,

чтобы он позволил «вскрыть» коррозионные повреждения трубопроводов, которые при дальнейшей, даже незначительной коррозии, будут разрушены в процессе эксплуатации рабочим давлением теплоносителя [17]. Как уже отмечалось, действующая система допустимого уровня испытательного давления трубопроводов тепловых сетей не учитывает продолжительность эксплуатации, степень коррозионного повреждения металла труб, процессов старения и деградации свойств. В работе [18] приведена методика определения максимального давления испытания с учетом действительной толщины стенки, скорости коррозии, величины диаметра и марки стали трубопровода, акцентируется внимание на локальность коррозионных явлений и нежелательность испытаний повышенным давлением на всем протяжении трубопровода. Дифференцированная система проведения ГИ [19] предлагает способ ГИ трубопроводов тепловых сетей повышенным давлением, при котором давление определяют с учетом предела текучести, скорости деградации, продолжительности эксплуатации и скорости коррозии металла трубопровода. Недостатками методики является сложность практического применения и отсутствие НД, обосновывающей и регламентирующей технологию проведения раздельного ГИ подающего и обратного трубопроводов с учетом их конкретной трассировки.

**Результаты исследований.** В рамках выполнения работы [1] были обследованы некоторые участки поврежденных трубопроводов, проанализированы температурные нагружения и нагружения внутренним давлением, произведены прочностные расчеты одного участка реального трубопровода, проведены коррозионные и ударные испытания при разных температурах и уровнях предварительной пластической деформации.

Основными видами нагружений, которые влияют на трубопроводы тепловых сетей в процессе их эксплуатации являются переменные температура и внутреннее давление теплоносителя. На основании представленных ПАО «Киевэнерго» диаграмм наблюдений и табличных данных за 2011–2017 гг. по этим параметрам были сделаны следующие заключения.

Температура подающих трубопроводов магистральных и распределительных сетей в отопительный сезон колеблется в диапазоне приблизительно 60...100 °С. Изменение температуры обратных трубопроводов соответствует изменениям температуры подающих, но ниже на 10...30 °С. При этом разница температур более существенна в середине отопительного сезона. Температура подающих трубопроводов магистральных сетей в межотопительный сезон

составляет 63...65 °С. Температура подающих и обратных трубопроводов распределительных сетей, в межотопительный сезон, в силу того что они отключены, составляет 10...15 °С. Что же касается размахов ( $\Delta T$ ) температурных циклов в отопительный сезон, то около 80 % этих циклов имеет  $\Delta T < 30$  °С. Циклы же с размахом в диапазоне  $60 < \Delta T < 100$  °С составляют менее 5 % общего числа циклов с температурными колебаниями. При проведении ГИ температура может подниматься до 45 °С.

Давление в подающих магистральных трубопроводах в отопительный сезон практически постоянно. В зависимости от источника подачи тепла и диаметра трубопровода его величина варьируется в диапазоне 0,74...2,06 МПа. Давление же в обратных магистральных трубопроводах в этот период составляет 0,15...0,40 МПа. Что же касается межотопительного сезона, то давление в подающих магистральных трубопроводах также стабильно, но варьируется в диапазоне 0,49...1,81 МПа. В обратных магистральных трубопроводах давление составляет 0,15...0,62 МПа. Максимальное давление в отдельных случаях выше, чем в отопительный сезон. Отсюда видно, что эксплуатационные колебания давлений в течение года невелики. Основные циклы колебания давлений связаны с проведением ремонтных работ и ГИ. При проведении ГИ сначала испытывают магистральные трубопроводы, а затем, магистральные и распределительные. При проведении ГИ, подающие и обратные трубопроводы нагружаются совместно. Тем не менее, при такой методике, давление в обратном трубопроводе немного ниже (примерно на 5 %), чем в подающем. Проектные значения рабочих давлений составляют – 1,4; 1,6; 2,5 МПа, а при ГИ – 1,75; 2,0; 3,125 МПа, соответственно.

Отличительной характеристикой труб, которые используются в тепловых сетях, является высокий коэффициент запаса статической прочности, благодаря которому, напряжения, возникающие при эксплуатации невысоки, т. е. обеспечивается упругая работа металла. В таких условиях при отсутствии коррозии разрушение трубопровода маловероятно. Результаты обследований секций трубопроводов, вырезанных во время ремонта из действующих теплопроводов, показали, что наиболее распространенным видом повреждений является утонение стенки вследствие сплошной равномерной коррозии и локальные утонения. Локальные коррозионные язвы тоже достаточно распространены. Не редкий случай отслоения защитного покрытия на наружной стенке, что приводит к развитию внешней коррозии. На рис. 1, в качестве примера, приведены фото поврежденно-

го участка подающего трубопровода 325×8 мм из стали 10, эксплуатировавшегося в условиях непроходной канальной прокладки. Защитное покрытие на внешней поверхности практически отсутствует. В ходе проведенных обследований на вырезанных фрагментах труб было установлено, что внешняя поверхность подверглась сплошной неравномерной коррозии, внутренняя – сплошной равномерной. Наружная коррозия более интенсивная, чем внутренняя. Коррозионные язвы на внешней поверхности имеют большую глубину, чем на внутренней. На довольно протяженных участках толщина стенки уменьшилась от 7...8 до 2...4 мм. Обратный трубопровод оказался более поврежден равномерной коррозией, хотя имеет тот же срок эксплуатации и изготовлен из той же стали, что и подающий. На некоторых участках как подающего, так и обратного трубопроводов, после удаления слоя продуктов коррозии выявлены сквозные коррозионные повреждения. Этот пример является типичным, и в целом, характеризует состояние системы. Стоит отметить, что после выявления сквозного повреждения часть трубы полностью вырезается и вместо нее сваривается новый фрагмент, минимальная длина которого 1 м.

Проведенные в рамках исследования расчеты указанного участка трубопровода (см. рис. 1) показывают, что температурные усилия при функционирующих компенсаторах дают меньший, либо сопоставимый вклад в напряженно-деформированное состояние, по сравнению с прибавкой от давления при ГИ. Это относится как к неповрежденному участку трубы, так и к зоне глубокого коррозионного дефекта. Также было выяснено, что температура и давление ГИ не вызывают напряжений текучести в трубе, если толщина стенки не является критически малой. Поэтому, с учетом этих факторов, несмотря на высокие значения коэффициента концентрации напряжений в коррозионных дефектах, возможность зарождения и

развития усталостной трещины в них, вследствие невысокого уровня номинальных напряжений и, соответственно, низкой амплитуды циклических деформаций практически исключена. Таким образом усталостную составляющую в повреждаемости можно не учитывать. Наиболее вероятной причиной разгерметизации труб является образование сквозного дефекта вследствие развития локального коррозионного процесса. Также возможными причинами резкого увеличения количества повреждений при увеличении температуры в осенний период (см. ниже), можно назвать: заклинивание сальниковых компенсаторов, сползание скользящих опор трубопровода с постаментов, отслаивание защитного покрытия трубы.

**Анализ повреждаемости трубопроводов.** Общая протяженность тепловых сетей города Киева в двухтрубном исполнении более 2000 км. При этом приблизительно 70 % этих сетей эксплуатируется более 30 лет. Структура сетей КП «Киевтеплоэнерго» выглядит следующим образом: «М – Магистральные трубопроводы»; «Р – Распределительные трубопроводы»; «ГВС – сети горячего водоснабжения». В 2013 г. протяженность магистралей увеличилась на такую же величину, на которую уменьшилась протяженность распределительных сетей – 159 км.

Первоначальная фиксация повреждений как при эксплуатации, так и при ГИ, проводится подразделениями, эксплуатирующими тот или иной трубопровод. Перечень данных, заносимый в журналы различных подразделений, может отличаться. Объем записываемой о повреждении информации, большой, но не систематизированный. Чаще всего информация включает в себя конкретный участок, ограниченный тепловыми колодцами, тип поврежденного трубопровода (подающий или обратный), а также давление и температуру в подающем и в обратном трубопроводах на момент фиксации повреждения. Сводные данные накапливаются в централь-

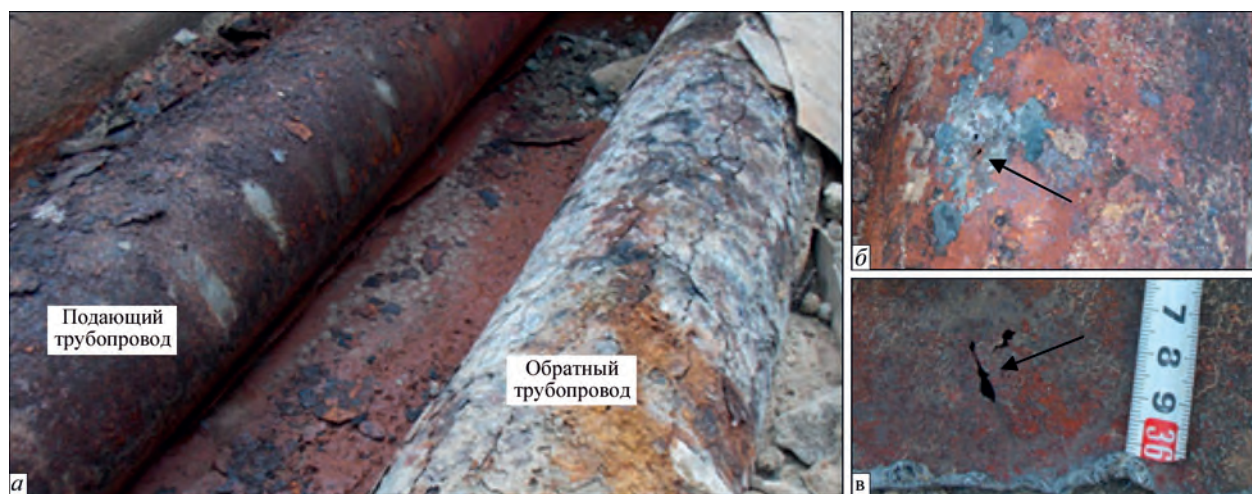


Рис. 1. Участок трубопровода 325×8, сталь 10, непроходная канальная прокладка: а – трубы в канале; б – наружная поверхность подающего трубопровода; в – внутренняя (сквозное коррозионное повреждение отмечено стрелочкой)



ном офисе. Общая отчетность ведется по годам с разбивкой по месяцам. Информация о типе трубопроводов (подающие или обратные), на которых фиксировались повреждения, сохраняется, как правило, в бумажном виде в подразделениях, поэтому отследить динамику повреждаемости отдельно по подающим и по обратным трубопроводам и выявить различия при отсутствии современной базы данных и больших трудозатрат, сложно, и, по сути, делает невозможным проведение оперативного анализа.

Учитывая большой объем имеющейся, но не систематизированной информации, для более детального изучения трубопроводов и их повреждаемости было сформировано две выборки. Выборка 1 – из всех имеющихся тепловых сетей было выбрано несколько, общей длиной (по длине подающего трубопровода) 62,3 км, что составляет всего около 3 % общей протяженности. Анализ результатов выборки был нацелен на то, чтобы представить всю тепловую сеть города, без сетей ГВС. Выборка 2 – составлена из локальных трубопроводов тепловых сетей (от колодца до колодца) и охватывает трубы наибольшего количества имеющихся диаметров. Общая длина локальных трубопроводов выборки 2 составляет 20,47 км, или около 1 % общей протяженности. Выборка была составлена для того, чтобы проанализировать данные по подающим и обратным трубопроводам дифференцированно, но также без сетей ГВС.

На рис. 2 приведена динамика изменения общей повреждаемости тепловых сетей включая магистральные, распределительные и ГВС сети. Общая повреждаемость включает повреждаемость как при эксплуатации, так и при ГИ. Изменение поврежденности магистральных и распределительных сетей, при эксплуатации и при ГИ приведено на рис. 3.

Из рис. 2 можно проследить существенный рост повреждаемости магистральных трубопроводов в 2013 и 2014 гг., что объясняется увеличением протяженности этих сетей в 2013 г. за счет присоединения части распределительных (около 158,7 км), а в 2014 г. – ведомственных сетей (приблизительно 127,6 км) к магистральным. Незна-

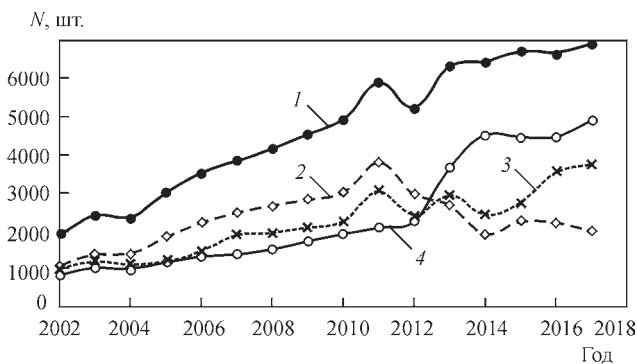


Рис. 2. Изменение общей поврежденности тепловых сетей ( $N$ ) за период 2002–2017 гг.: 1 – М+Р; 2 – М<sub>3</sub>+Р<sub>3</sub>; 3 – ГВС; 4 – М

чительное падение повреждаемости распределительных сетей в 2013 г. можно объяснить за счет передачи части сетей под магистральные.

Данные рис. 3 свидетельствуют о том, что повреждаемость магистральных и распределительных сетей при ГИ со временем растет, но очень незначительно по сравнению с повреждаемостью при эксплуатации. Также из рис. 3 можно видеть, что тенденция развития повреждений распределительных сетей как при эксплуатации, так и при ГИ одинакова. У магистральных сетей эта особенность четко не выражена. Если на рис. 2 и 3 количество повреждений относить к фактической длине сетей, то форма кривых существенно не меняется – спрямления не происходит.

На рис. 4 приведена доля повреждений в период проведения ГИ от общего количества повреждений за 2002–2017 гг. Условно ее можно назвать коэффициентом эффективности проведения ГИ. Если повреждения происходят только при ГИ, то он равен единице. Естественно если повреждения в силу тех или иных причин неизбежно, то лучше чтобы оно произошло во время проведения ГИ – в этом и заключается смысл этих мероприятий. Если же повреждения происходят как при ГИ, так и при эксплуатации, то этот коэффициент характеризует эффективность проведения ГИ. Поэтому, для эффективной с точки зрения проведения ГИ системы, этот коэффициент должен стремиться к единице. Из рис. 4 следует, что он значительно ниже единицы, и имеет четкую тенденцию, по крайней мере, до 2013 г., к снижению. В статье [20] эта доля повреждений указана в процентах, ( $\times 100\%$ ). Там же указано, что для некоторых больших городов РФ этот процент имеет тенденцию к снижению, но при этом находится выше 50 %. Согласно [21], для 8000 км московских теплосетей в двухтрубном исполнении, общее количество повреждений за 2012–2016 гг. колеблется в районе 4000, но имеет тенденцию к росту. При этом коэффициент эффективности

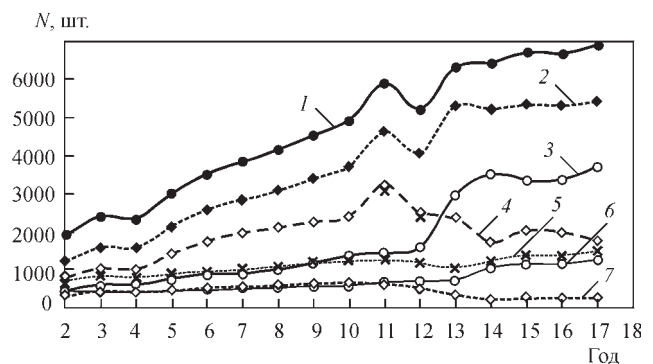


Рис. 3. Изменение поврежденности магистральных и распределительных сетей ( $N$ ), при эксплуатации и при ГИ за период 2002–2017 гг.: 1 – М+Р; 2 – М<sub>3</sub>+Р<sub>3</sub>; 3 – М<sub>3</sub>; 4 – Р<sub>3</sub>; 5 – М<sub>1</sub>+Р<sub>1</sub>; 6 – М<sub>1</sub>; 7 – Р<sub>1</sub> (индексами э и г обозначены эксплуатация и ГИ, соответственно)

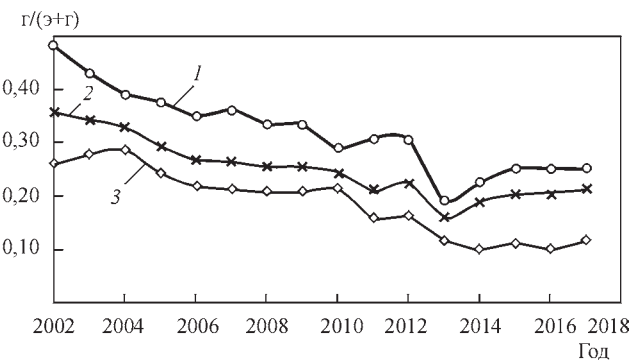


Рис. 4. Доля повреждений в период проведения ГИ в общем количестве повреждений за период 2002–2017 гг.: 1 – М; 2 – М+Р; 3 – Р

проведения ГИ составляет 0,87...0,92. Например, в г. Риге, для 656 км теплосетей в двухтрубном исполнении, принадлежащих АО «Ригас Силтумс», за период 2002–2007 гг. было обнаружено в среднем 187 повреждений за год. Приблизительно 90 % всех повреждений относятся к распределительным сетям [22].

На рис. 5 приведены типичные для 2009–2016 гг., распределения повреждаемости по месяцам для распределительных и магистральных сетей на примере 2012 г. Понятно, что сумма повреждаемости по месяцам равна годовой повреждаемости. То есть, площадь под кривой повреждаемости по месяцам равна повреждаемости за год.

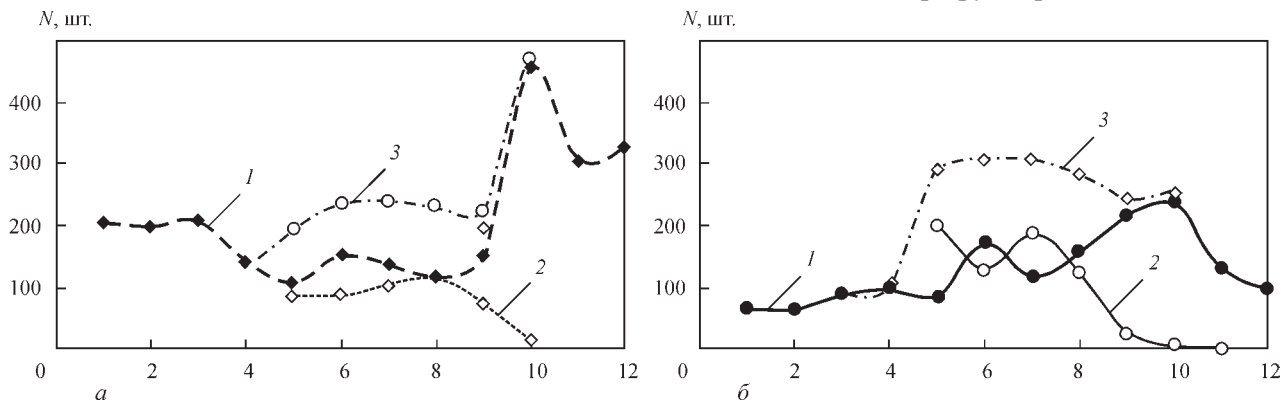


Рис. 5. Типичное распределение повреждаемости по месяцам для распределительных (а: 1 – Р<sub>д</sub>; 2 – Р<sub>р</sub>; 3 – Р = Р<sub>д</sub> + Р<sub>р</sub>) и магистральных (б: 1 – М<sub>д</sub>; 2 – М<sub>р</sub>; 3 – М = М<sub>д</sub> + М<sub>р</sub>) сетей на примере 2012 г.

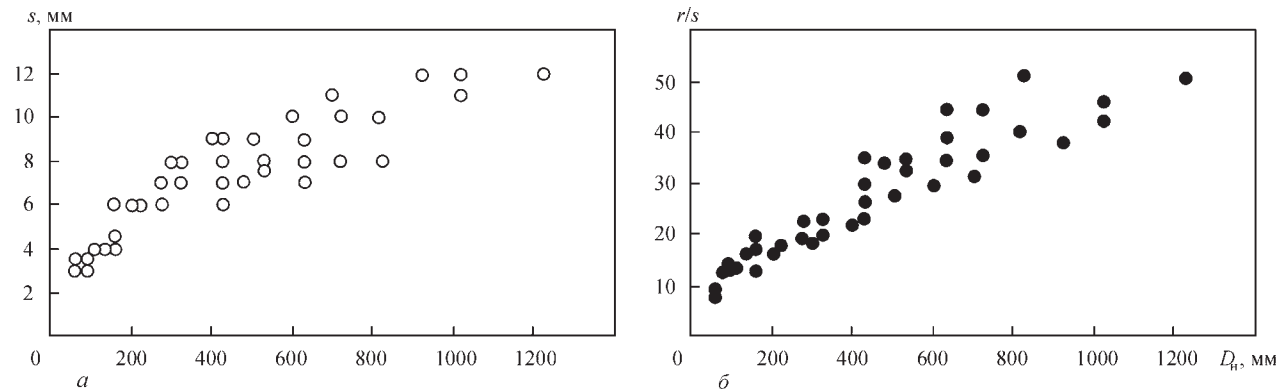


Рис. 6. Некоторые зависимости для трубопроводов выборки 1: а – взаимосвязь толщины стенки ( $s$ ) с наружным диаметром ( $D_n$ ); б – зависимость отношения радиуса срединной поверхности ( $r$ ) к толщине стенки от наружного диаметра

Из рис. 5, а можно проследить, что в январе, феврале и марте эксплуатационная повреждаемость распределительных сетей находится примерно на одном уровне. Далее, в период проведения ГИ она снижается в силу того, что часть сетей переходит из режима эксплуатации в режим ГИ. Затем с началом отопительного сезона, в октябре, происходит резкий рост повреждаемости. В ноябре, декабре происходит снижение, и в начале следующего года она снова стабилизируется. Эти закономерности характерны и для рассмотренных 2009–2016 гг. Рост повреждаемости с началом отопительного сезона, по всей вероятности, связан с тем, что во время ГИ часть порывов просто не удастся заметить. Например, образование небольших сквозных дефектов, через которые не успевает выйти достаточно воды за время поддержания пробного давления. Наличие небольших сквозных дефектов может всего лишь незначительно сказываться на подпитке, оставляя ее в допустимых пределах.

Как известно из теории тонкостенных оболочек, кольцевые напряжения, а также интенсивность напряжений, пропорциональны отношению радиуса срединной поверхности ( $r$ ) к толщине стенки ( $s$ ). Поэтому чем больше этот показатель, тем выше напряжения при одном и том же давлении. Из рис. 6, б, который построенный по данным выборки 1, можно проследить, что чем больше внешний диаметр трубопровода, тем выше в

нем напряжения при одинаковом давлении. С увеличением внешнего диаметра, толщина стенки также увеличивается (см. рис. 6, а).

При обработке данных выборки 1 установлено, что большую часть составляют трубопроводы меньшего диаметра. Но нужно учитывать тот факт, что при повреждении трубопровода большого диаметра последствия более серьезные.

При обработке данных выборки 2, взятых за 2013–2017 гг., было установлено количество повреждений как прямых, так и обратных трубопроводов. При ГИ оно составило 26 и 11, а при эксплуатации 47 и 24, соответственно. Отсюда следует, что повреждаемость подающих трубопроводов выше, чем обратных, в среднем в 2,4 раза при ГИ, и в 2 раза при эксплуатации. При анализе выборки 2 можно проследить тенденцию к росту повреждаемости со временем, и то, что трубопроводы меньшего диаметра повреждаются чаще.

## Выводы

1. Несмотря на негативные последствия, гидравлические испытания трубопроводов тепловых сетей являются основным методом их технического диагностирования, позволяющим выявить подкритические дефекты.

2. Проведение гидравлических испытаний неоднозначно влияет на повреждаемость трубопроводов – с одной стороны позволяют выявить имеющиеся дефекты и создать определенный «запас прочности» на период эксплуатации до следующего испытания, с другой стороны – пластически деформируют металл в зонах утонения стенки, что приводит к росту скорости коррозии и повышают вероятность образования сквозных дефектов.

3. На основании литературных данных и результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод, что после длительной эксплуатации, в режиме постепенного накопления пластических деформаций, подающий трубопровод более склонен к коррозионному разрушению, чем обратный.

4. Анализ данных по повреждаемости в г. Киеве за 2002–2017 гг. свидетельствует о том, что доля повреждений при гидравлических испытаниях по сравнению с повреждениями при эксплуатации уменьшается, что на фоне роста общей повреждаемости, свидетельствует о существенной изношенности трубопроводов которая опережает темпы осуществляемой реновации. Повреждаемость подающих трубопроводов как при гидравлических испытаниях, так и при эксплуатации, выше, чем обратных.

5. Полученные результаты могут послужить основой для разработки новых или пересмотра существующих нормативных документов, направленных на совершенствование существующего порядка назначения пробного давления и пересмотра порядка проведения гидравлических испытаний.

6. Несмотря на многочисленные исследования, задача установления оптимального давления гидравлических испытаний трубопроводов тепловых сетей в зависимости от их состояния и условий эксплуатации остается в настоящее время актуальной.

7. В рамках имеющейся геоинформационной системы теплосетей необходимо разработать унифицированный протокол фиксации и описания повреждений в виде реляционной базы данных расчетно-аналитического модуля риск-анализа повреждений.

*Авторский коллектив выражает благодарность заведующей отделом ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины Ныркової Л.І. за участие в проведении исследований и обсуждении полученных результатов.*

## Список литературы

- (2018) «Визначення впливу підвищеного тиску на властивості металу трубопроводів теплових мереж під час проведення гідрравлічних випробувань з наданням рекомендацій щодо величини рівнів пробного тиску у залежності від умов експлуатації». Технічний звіт. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ.
- (2007) *Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж*. Затв. 14.02.2007, № 71. Міністерство палива та енергетики України. Харків, Індустрія.
- (2003) ГКД 34.20.507-2003 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила». Затв. 13.06.2003, № 296. Київ, Міністерство палива та енергетики України.
- (2017) Інструкція № 29 *Проведення випробувань теплових мереж на гідрравлічну цілісність*. Київ, ПАТ «Київенерго», СВІП «Київські теплові мережі».
- (1997) ГКД 34.20.504-94 «Теплові мережі. Інструкція експлуатації». Київ, НДІ Енергетики.
- (2003) *Методические рекомендации по техническому освидетельствованию трубопроводов тепловых сетей систем коммунального теплоснабжения «Роскоммунэнерго»*.
- Плешивцев В.Г., Пак Ю.А., Филиппов Г.А. (2008) Факторы снижающие конструктивную прочность металла труб и перспективы создания новых трубных сталей для тепловых сетей. 3-я научно-практическая конференция «Тепловые сети. Современные практические решения».
- Скоробогатых В.Н., Попов А.Б., Жарикова О.Н. и др. (2008) Определение оптимальных параметров гидравлических испытаний тепловых сетей. *Новости теплоснабжения*, 7(95), 38–43.
- Матвеев В.И., Алибеков С.Я. (2007) Определение состояния металла трубопроводов тепловых сетей по результатам обследования индикаторов коррозии и инженерной диагностики. *Там же*, 12 (88), 34–39.
- Би Вэнцзюнь (2004) *Повышение ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений нефтегазопроводов*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфимский государственный нефтяной технический университет.
- Ковенский М.Д. (2008) Влияние усталостного нагружения в малоциклового области на структуру и свойства трубных сталей. *Известия вузов. Машиностроение*, 3, 41–46.
- (2004) СНиП 41-02-2003 «Тепловые сети». Москва.
- Kirkwood M., Cosham A. (2000) Can the Pre-service Hydrotest be Eliminated? *Pipes & Pipelines International*, 45, 4.
- Чичерин С.В. (2017) Новый алгоритм анализа величин давления при проведении ежегодных гидравлических испытаний трубопроводов тепловых сетей на плотность и прочность. *Вестник ИргТУ*, 21, 1, 178–185.
- Пашков Ю.И. (1996) *Трещиностойкость сварных труб для газопроводов*: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва.
- Плешивцев В.Г., Филиппов Г.А., Пак Ю.А., Ливанова О.В. (2009) Влияние содержания углерода и напряженного состояния на скорость коррозии трубной стали в тепловых сетях. *Металлург*, 8, 62–64.
- Гофман Ю.М., Волохов А.В., Григорьев Ю.Ф., Шмельков А.В. (2017) Методика технического диагностирования трубопроводов тепловых сетей при проведении экс-



- пертизы промышленной безопасности. *Электрические станции*, **3**, 16–20.
18. Ионин А.А., Фридман Я.Х. (2001) Обоснование уровня давления при летних гидравлических испытаниях теплопроводов. *Новости теплоснабжения*, **6(10)**, 22–27.
  19. Плешивцев В.Г., Пак Ю.А., Глухих М.В. и др. (2008) Дифференцированная система проведения гидравлических испытаний магистральных тепловых сетей. *Тепловые сети. Современные практические решения: Труды Третьей научно-практической конференции*. Москва, Новости теплоснабжения.
  20. Москалев И.Л., Литвак В.В. (2015) Повреждаемость основных узлов систем теплоснабжения городов. Известия Томского политехнического университета. *Инжиниринг георесурсов*, **326**, 7, 70–80.
  21. АО «МОСГАЗ» (2018) *Актуализация Схемы теплоснабжения города Москвы на период до 2032 г.* Т. 1, Книга 1.6. Надежность теплоснабжения. Описание существующих технических и технологических проблем в системах теплоснабжения.
  22. Дубсон М.И. (2008) Опыт эксплуатации тепловых сетей и индивидуальных тепловых пунктов предприятия «Ригас Силтумс». *Новости Теплоснабжения*, **4(92)**, 14–20.
  8. Skorobogatykh, V.N., Popov, A.B., Zharikova, O.N., et al. (2008) Determination of optimum parameters of hydrotesting of heating systems. *Novosti Teplosnabzheniya*, **7(85)**, 38–43 [in Russian].
  9. Matveev, V.I., Alibekov, S.Ya. (2007) Determination of the state of pipeline metal in heating systems by the results of examination of corrosion indicators and engineering diagnostics. *Ibid.*, **12(88)**, 34–39 [in Russian].
  10. Bi Wengun (2004) *Extension of safe operating life of welded joints in oil and gas pipelines*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Ufa, SPTU [in Russian].
  11. Kovensky, M.D. (2008) Impact of low cycle fatigue loading on the structure and properties of pipe steels. *Izv. Vuzov, Mashinostroenie*, **3**, 41–46 [in Russian].
  12. (2004) SNiP 41-02-2003 : *Heating systems*. Moscow [in Russian].
  13. Kirkwood, M., Coshman, A. (2000) Can the pre-service hydrotest be eliminated? *Pipes & Pipelines Intern.*, **45**, 4.
  14. Chicherin, S.V. (2017) New algorithm for analysis of pressure levels when conducting the annual hydrotesting of pipelines in heating systems for tightness and strength. *Vestnik IrGTU*, **21(1)**, 178–185 [in Russian].
  15. Pashkov, Yu.I. (1996) *Cracking resistance of welded pipes for gas pipelines*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Moscow [in Russian].
  16. Pleshivtsev, V.G., Filippov, G.A., Pak, Yu.A., Livanova, O.V. (2009) Impact of carbon content and stressed state on corrosion rate of pipe steel in heating systems. *Metallurg*, **8**, 62–64 [in Russian].
  17. Gofman, Yu.M., Volokhov, A.V., Grigoriev, Yu.F., Shmelkov, A.V. (2017) Procedure of technical diagnostics of heating system pipelines when conducting the examination for industrial safety. *Elektricheskie Stantsii*, **3**, 16–20 [in Russian].
  18. Ionin, A.A., Fridman, Ya.Kh. (2001) Substantiation of the level of pressure during summer hydrotesting of heating conduits. *Novosti Teplosnabzheniya*, **6(10)**, 22–27 [in Russian].
  19. Pleshivtsev, V.G., Pak, Yu.A., Glukhikh, M.V. et al. (2008) Differentiated system of conducting hydrotesting of the main heating systems. *Heating systems. Modern practical solutions*. In: *Proc. of 3rd Sci.-Pract. Conf.* Moscow, Novosti Teplosnabzheniya
  20. Moskaev, I.L., Litvak, V.V. (2015) Damageability of the main components of heat supply systems in cities. *Izv. TPU. Engineering Georesursov*, **326(7)**, 70–80 [in Ukrainian].
  21. JSC MOSGAZ (2018) *Actualization of the scheme of heat supply of Moscow city for the period of up to 2032*. Vol. 1, Book 1.6: Reliability of heat supply. Description of the currently available engineering and technological problems in heat supply systems.
  22. Dubson, M.I. (2008) Experience of operation of heating systems and individual heating units of Rigas Siltums Enterprise. *Novosti Teplosnabzheniya*, **4(92)**, 14–20 [in Russian].

## References

## ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ МІСТА КИЄВА

Р.І. Дмитрієнко<sup>1</sup>, П.С. Юхимець<sup>1</sup>, В.М. Тороп<sup>1</sup>, І.М. Кисіль<sup>1</sup>, В.М. Єгоренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>КП «Київтеплоенерго». 01001, м. Київ, пл. І. Франка, 5. E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

Проаналізовано фактори, що впливають на пошкоджувальність теплових мереж. Представлено аналіз фактичної пошкоджувальності теплових мереж в останні роки на прикладі міста Києва. Проведено оцінку ефективності сезонних гідрравлічних випробувань. Бібліогр. 22, рис. 6.

**Ключові слова:** теплові мережі, пориви, пошкоджувальність, гідрравлічні випробування, корозія, дефекти, пробний тиск

## DAMAGEABILITY AND EFFECTIVENESS OF CONDUCTING HYDRAULIC TESTING OF HEATING SYSTEMS OF KIEV CITY

R.I. Dmytrienko<sup>1</sup>, P.S. Yukhymets<sup>1</sup>, V.M. Torop<sup>1</sup>, I.N. Kysil<sup>1</sup>, V.N. Yehorenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>UC «Kievteploenergo». 5 I.Franka Sq., 01001, Kyiv, Ukraine. E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

Factors affecting the damageability of heating systems have been analyzed. Analysis of actual damageability of heating systems over the recent years is presented in the case of Kiev city. Evaluation of the effectiveness of the conducted seasonal hydraulic testing was performed. 22 Ref., 6 Fig.

**Keywords:** heating systems, tears, damageability, hydraulic testing, corrosion, defects, test pressure

Поступила в редакцію 13.11.2019

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

А.В. Грузевич<sup>1,3</sup>, Д.Л. Никифоров<sup>2</sup>, Д.А. Дереча<sup>3,4</sup>, Ю.Б. Скирта<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Трипольская ТЭС. 08720, Киевская область, Обуховский р-н, г. Украинка. E-mail: [Gruzevich@bigmir.net](mailto:Gruzevich@bigmir.net)

<sup>2</sup>ПАО «Центрэнерго». 03022, г. Киев, ул. Казацкая, 120/4

<sup>3</sup>Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины. 03142, г. Киев, бульв. Акад. Вернадского, 36-б

<sup>4</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 57

Получены данные о взаимосвязи фазовых, структурных и магнитных свойств ферритно-перлитной стали 12Х1МФ как в исходном состоянии, так и после эксплуатации. Показано, что наибольшая интенсивность и величина изменения магнитного отклика проявляются в металле труб поверхностей нагрева, находившихся в эксплуатации и имеющих структуру, отличную от исходной. Представлена возможность использования величины скачкообразного изменения интенсивности магнитного поля, основанного на эффекте Баркгаузена, для обнаружения зон с недопустимыми структурными изменениями в металле поверхностей нагрева, а также зон максимальных концентраций напряжений, находящихся в зоне риска. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 8.

*Ключевые слова:* магнитная индукция, структурно-фазовые состояния, эффект Баркгаузена, поверхность нагрева, гистерезис

В настоящее время для надежной работы энергетического оборудования ТЭС требуется повышение эксплуатационной надежности различных элементов конструкции котла. При этом удовлетворительное состояние металла труб поверхностей нагрева (ПН) является важнейшим условием безаварийной и экономичной работы котлоагрегата в целом.

Стандартные методы определения состояния металла ПН предусматривают проведение вырезов образцов из отдельных труб для оценки микроструктуры и уровня механических свойств. Данный подход не позволяет осуществить стопроцентный контроль металла котельных труб и предоставить объективную оценку необходимого объема замен в период ремонтных кампаний.

В связи с этим перспективным является использование методик магнитной диагностики, которая позволяет установить зависимости между механическими свойствами и структурными составляющими с магнитными характеристиками металла.

Данные методики (эффект магнитной памяти металла, явление температурного магнитного гистерезиса) основаны на использовании магнитоупругого, магнитомеханического эффектов, магнитопластики и получили значительное развитие в странах Европы и РФ, что отражено в ряде международных стандартов ISO 24497-1:2007(Е), 24497-2:2007(Е), 24497-3:2007(Е) и распорядительных документах (РД 34.17.446—97, РД 34.17.451-48).

В Украине магнитная диагностика не получила должного развития и, соответственно, практического применения.

Указанные выше методики, преимущественно, направлены на установление и локализацию зон концентрации максимальных напряжений, при этом остается неясной взаимосвязь между микроструктурой, механическими свойствами с областями аномальных скачков напряженности остаточного магнитного поля в металле котельных труб с различными сроками наработок.

Предложенная методика, основанная на эффекте Баркгаузена, позволяет провести изучение изменений ферритно-перлитных структур в процессе эксплуатации, оценить их влияние на изменение магнитного поля, а также предоставляет инструмент для выявления браковочных структур котельных труб в процессе эксплуатации и на начальном этапе работы энергетических установок.

Получение экспериментальных данных о влиянии магнитного поля важно не только для изучения возможностей определения свойств металлов и сплавов, но и для понимания причин такого влияния, создания теории воздействия магнитного поля на материал в процессе структурных превращений.

Как известно, метод шумов Баркгаузена основан на концепции индуктивного измерения амплитуды шумоподобных сигналов – шумов Баркгаузена, которые генерируются в ферромагнитном образце при приложении магнитного поля (рис. 1).

На амплитуду шумов Баркгаузена оказывают влияние любые включения в структуре, которые препятствуют движению доменных стенок, к которым относятся дефекты, например, инородные

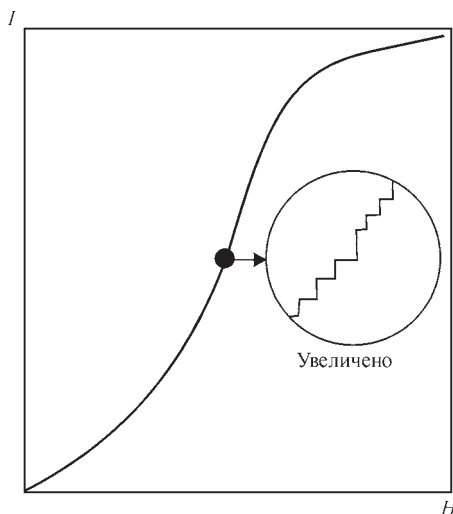


Рис. 1. Скачки Баркгаузена на кривой намагничивания [1]

включения подобно карбидным отложениям, микротрещины, микропоры, а также остаточные напряжения и микроструктура (рис. 2).

Так как твердость является характеристикой определенного структурного состояния, то по изменению твердости можно судить об изменениях, происходящих в микроструктуре материала [2].

Известно, что в общем случае магнитоупругий параметр возрастает при уменьшении твердости и увеличении напряжения растяжения и, напротив, амплитуда шумов Баркгаузена снижается при увеличении твердости и увеличении напряжения сжатия. Таким образом, измеряя амплитуду шума можно оценить остаточные напряжения в ферромагнитном материале или сделать заключение о состоянии микроструктуры детали [3, 4].

Таким образом, магнитные методы косвенной оценки свойств металлов позволяют, при значительном сокращении времени и объема испытаний, определять структурно-фазовые состояния элементов конструкций и степень их дефектности.

Авторами работы [3–5] рассматривался вопрос влияния перлита на генерацию шума Баркгаузена в простых углеродистых сталях. Реакции чисто перлитной и чисто ферритной микроструктур определяются как совершенно разные. Однако результаты образцов, содержащие ферритно-перлитные структуры, в результате различий в поведении закрепления доменных стенок между

различными микроструктурами, содержат повышенное значение высоты импульса, характерное для смешанного состава структур.

При этом число скачков при нарастании поля имеет характер, подобный зависимости индукции от намагничивающего поля и для некоторых ферромагнетиков практически линейна.

Целью данной работы является использование методов магнитного и структурного анализа для изучения эволюции структуры в слабомагнитных и магнитных материалах энергетического оборудования под влиянием различных факторов: температуры, механических напряжений, коррозионных процессов и т. п., имеющих место при эксплуатации.

Суть исследования заключается в установлении корреляции между структурной эволюцией и изменениями магнитных свойств материалов с увеличением срока наработки котельных труб.

Результаты работы позволят достоверно указывать степень структурного повреждения материалов, что особенно важно на начальных стадиях их разрушения.

Для исследования шумов Баркгаузена в образцах ферромагнитных материалов был сконструирован измерительный стенд (рис. 3).

Образцы были размещены в приемной катушке индуктивности в качестве сердечника, катушка вместе с образцом находилась между полюсами электромагнита. Развертка поля электромагнита происходит с помощью управляемого блока питания. Магнитное поле при этом менялось с шагом примерно 25 Э в пределах от  $-4,0$  до  $4,0$  кЭ, точное значение магнитного поля измерялось с помощью датчика Холла. При изменении магнитного поля в катушке электромагнита на один шаг в исследуемом образце наблюдаются скачки Баркгаузена. Они индуцируют в приемной катушке импульсы напряжения, которые подаются на вход усилителя. После усиления предварительным усилителем сигнал оцифровывается с помощью звуковой карты, оцифрованные значения подаются в условных единицах – отсчетах 16 битного АЦП звуковой карты. Усилитель мощности и динамик выполняют роль звукового индикатора, который помогает качественно оценить наличие и интенсивность шумов

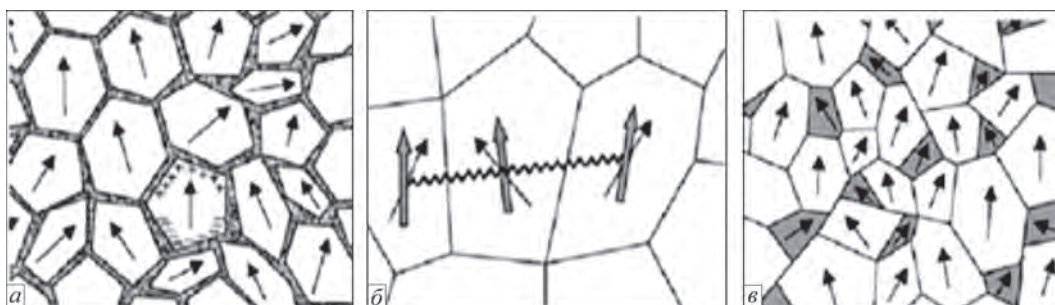


Рис. 2. Движение доменных стенок различных типов сплавов (а–в)



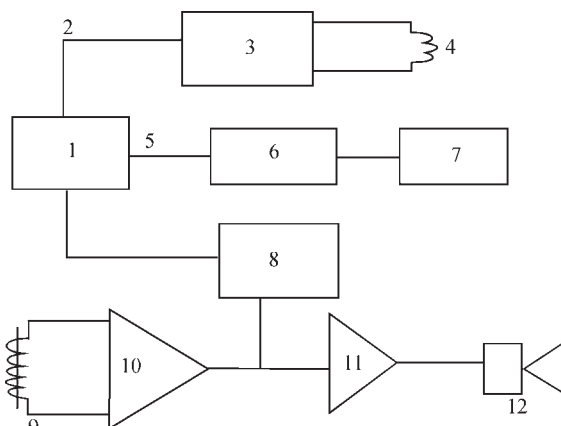


Рис. 3. Схема стенда для исследования шумов Баркгаузена: 1 – компьютер; 2 – USB-интерфейс; 3 – блок питания Singlent SPD3303S; 4 – электромагнит; 5 – интерфейс RS-485; 6 – АЦП I-7018; 7 – датчик Холла; 8 – звуковая карта; 9 – приемная катушка с образцом; 10 – предварительный усилитель; 11 – усилитель мощности; 12 – динамик

Баркгаузена. Оцифровка начинается в начале шага изменения поля и продолжается в течение 2,27 с, что соответствует 100 000 отсчетов АЦП при частоте дискретизации 44 кГц. Для уменьшения влияния шумов и упрощения расчетов проводилось усреднение по каждому 100 отсчетам АЦП. Определяли среднюю интенсивность шумов Баркгаузена на каждом шаге измерений – разность средней амплитуды сигнала на звуковой карте в течение регистрации шумов Баркгаузена и средней интенсивности собственных шумов катушки при неизменном поле. После проведения цикла измерений была получена зависимость относительной интенсивности шумов Баркгаузена в образце от напряженности внешнего магнитного поля.

В исследовании рассматривались образцы поверхностей нагрева энергетического оборудования с различными характеристиками и наработками. Среди них металл тылового экрана верхней радиационной части (ВРЧ), потолочного пароперегревателя (ППП), экраны поворотной камеры (ЭПК) и металл новой трубы. Образцы подверглись лабораторным исследованиям: визуальному осмотру и макроанализу; стилоскопическому анализу; механическим испытаниям и металлографическому анализу; исследованию магнитных характеристик.

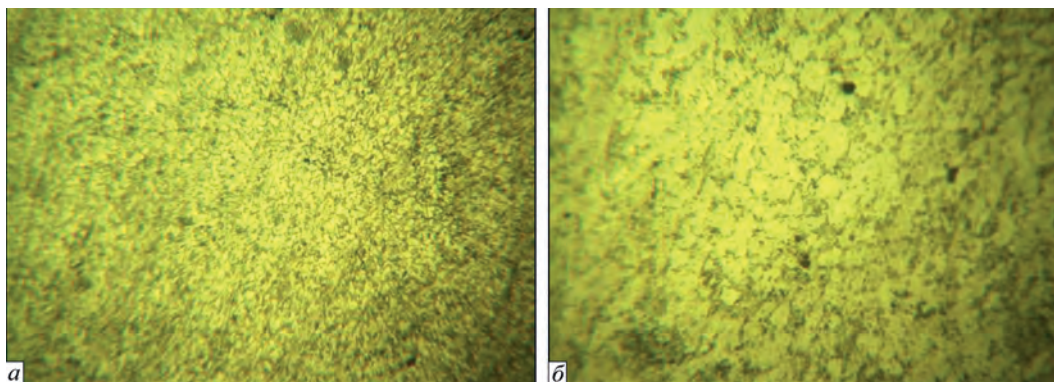


Рис. 4. Результаты металлографических исследований образца ВРЧ: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$

При проведении спектрального анализа состав контролировали рентгенофлуоресцентным спектрометром NITON XL2, у всех образцов были выявлены следующие легирующие элементы: хром (в пределах 1 %), молибден (в пределах 0,3 %), ванадий (в пределах 0,2 %), что может соответствовать их проектной марке стали 12Х1МФ.

При проведении металлографического анализа образца ВРЧ было установлено: структура металла трубы состоит из зерен феррита, перлита и карбидов и соответствует баллу 5–6 (согласно приложению В «Шкалы микроструктур котельных труб из стали марок 12Х1МФ, 12Х1МФ – ПВ, 15Х1М1Ф и 12Х2МФСР», к ТУ 14-3-60:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009). Зерна перлита рыхлые, сфероидизированные. По шкале деградации перлитной составляющей, согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура соответствует баллу 3–4. Структура металла образца, с боку обмуровки, состоит из зерен феррита, перлита и карбидов, что соответствует баллу 5 (приложение В). Границы зерен четкие, зерна перлита рыхлые. По шкале деградации перлитной составляющей, согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура соответствует баллу 3.

На рис. 4 изображены результаты металлографических исследований образца ВРЧ с увеличением 100 и 500. Наглядно просматривается на рисунке ферритно-перлитная структура с включениями карбидов.

Структура металла трубы образца новой трубы (НТ) состоит из зерен феррита, перлита и карбидов, и соответствует баллу 4 (приложение В). По шкале деградации перлитной составляющей, согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура соответствует баллу 1–2, а баллы по шкале полосчатости 0–1.

На рис. 5 изображены результаты металлографических исследований образца НТ с увеличением 100 и 500. Наглядно просматривается на рисунке, что перлитная составляющая имеет лучший вид, чем у образца ВРЧ.

При проведении металлографического анализа образца ППП выявлено, что структура металла с «огневой» стороны состоит из феррита, перлита и мелких карбидов по границам зерен. Границы зе-

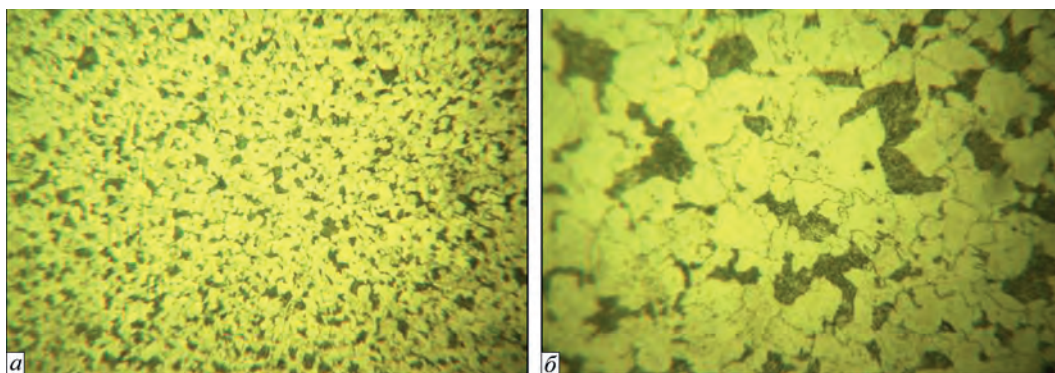


Рис. 5. Результаты металлографических исследований образца НТ: *a* –  $\times 100$ ; *б* – 500

рен четкие, перлит плотный. Структура металла по шкале (приложение В) соответствует баллу 4–5. По шкале деградации перлитной составляющей стали, согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура металла отвечает баллу 2. Структура металла со стороны обмуровки состоит из феррита, перлита и мелких карбидов по границам зерен. Границы зерен четкие, перлит плотный. Структура металла по шкале (приложение В) соответствует баллу 4–5. По шкале деградации перлитной составляющей стали, согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура металла отвечает баллу 1–2.

На рис. 6 изображены результаты металлографических исследований образца ППП с увеличением 100 и 500. Наглядно просматривается на рисунке, что перлитная составляющая имеет лучший вид, чем у образца ВРЧ.

При проведении металлографического анализа образца ЭПК выявлено, что структура метал-

ла предоставленной вырезки с «огневой» стороны и со стороны обмуровки идентична и состоит из феррита, сфероидизированного перлита и мелких карбидов по границам зерен. Границы зерен нечеткие, перлит рыхлый. Структура металла по шкале (приложение В) соответствует баллу 6–7. По шкале деградации перлитной составляющей стали, согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура металла отвечает баллу 3–4.

На рис. 7 изображены результаты металлографических исследований образца ЭПК с увеличением 100 и 500. Наглядно просматривается на рисунке, что перлитная составляющая имеет вид хуже, чем у образцов ВРЧ и НТ.

Все полученные характеристики в результате механических испытаний занесены в таблицу.

Исходя из результатов механических испытаний характеристики образцов приближались к требуемым значениям согласно ТУ 14-3-460:2009/

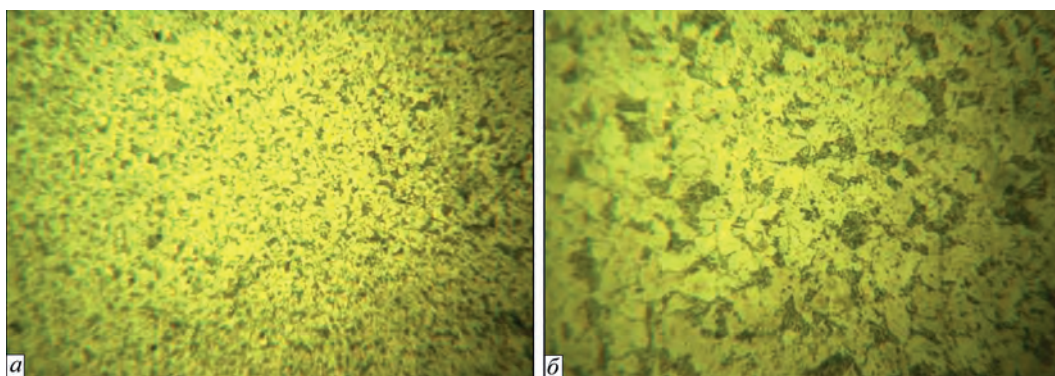


Рис. 6. Результаты металлографических исследований образца ППП: *a* –  $\times 100$ ; *б* – 500

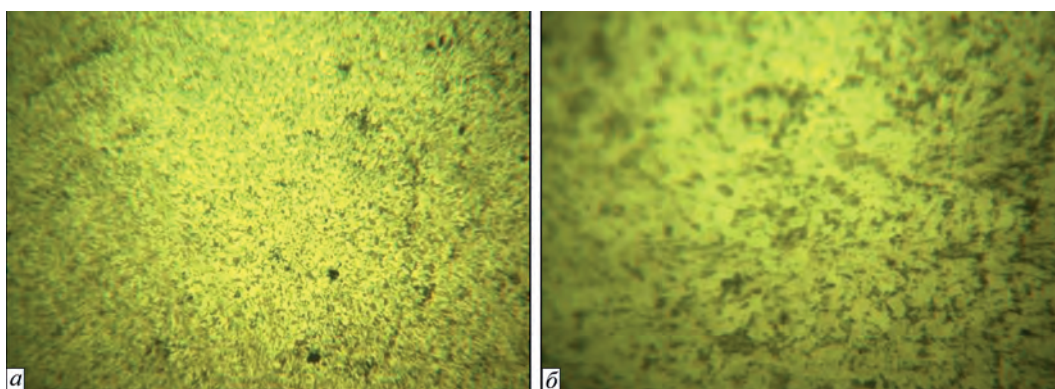


Рис. 7. Результаты металлографических исследований образца ЭПК: *a* –  $\times 100$ ; *б* – 500



Полученные значения характеристик для опытных образцов

| Наименование образца      |           | Характеристика металлов            |              |            | Ширина петли гистерезиса, отн. ед. | Балл микро-структуры металла по ТУ 14-3-460:2009 | Наработка, ч | Твердость <i>HV</i> |
|---------------------------|-----------|------------------------------------|--------------|------------|------------------------------------|--|--------------|---------------------|
|                           |           | $\sigma_{в.}$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % | $\psi$ , % |                                    |  |              |                     |
| Задний экран ВРЧ          |           | 48                                 | 23,5         | 78,3       | 9000                               | 5–6  | 280814       | 134...151           |
| ППП                       | образец 1 | 55,7                               | 27,5         | 68,4       | 7000                               | 4–5  | 14570        | 140...157           |
|                           | образец 2 | 58,5                               | 28,4         | 70,1       |                                    | 4–5  |              | 142...159           |
| ЭПК (фронт, тыл)          |           | 51,3                               | 24,5         | 70,1       | 10000                              | 6–7  | 276651       | 133...150           |
| НТ                        |           | 50,2                               | 28,2         | 75,6       | 5000                               | 4  | 0            | 135...152           |
| Согласно ТУ 14-3-460:2009 |           | 45...65                            | 21           | 55         | –                                  | –  | –            | –                   |

ТУ У 27.2-05757883-207:2009 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов».

В результате исследования были получены значения максимальных и усредненных значений накоплений интенсивности в каждой точке значений для каждого образца металлических поверхностей.

Для удобства был построен график средних значений накоплений интенсивности (рис. 8). Из графика видно, что наибольших значений интенсивности достигает образец ЭПК, характеризующийся максимальными значениями повреждения структуры металла, границы зерен данного образца не имеют четких границ, перлит рыхлый.

В случае, когда образцы имеют четкие границы зерен и отсутствуют значительные механические повреждения, дефекты, инородные включения подобно карбидным отложениям, микротрещины, микропоры, значения интенсивности шумов Баркгаузена имеют меньшие значения и их зависимость от магнитной индукции более линейна. Данные особенности характерны для графиков с минимальными значениями интенсивности образца ППП.

На графике явно прослеживаются зависимости интенсивности значений в абсолютных единицах

от изменения магнитной индукции. Данные результаты позволяют сделать вывод о возможности выявления механических повреждений, микротрещин, микропор в структуре металлических поверхностей магнитоупругим методом.

Из графиков (рис. 8) можно сделать вывод о зависимости интенсивности шумов Баркгаузена от изменения микроструктуры металла поверхностей нагрева. Полученные максимальные значения интенсивности сигнала в зависимости от магнитной индукции позволили вычислить значение площади петли гистерезиса. Данные были занесены в таблицу. Наибольшая ширина петли гистерезиса наблюдалась в металле котельных труб, дефектность которых была выше по сравнению с другими образцами [6–8].

Выводы

В результате работы полученные данные позволяют оценить степень взаимосвязи между магнитными свойствами металла поверхностей нагрева, состоянием их микроструктуры и механическими свойствами.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о целесообразности применения данного метода детекции шумов Баркгаузена для оценки изменений в структуре ферритно-перлитной стали 12Х1МФ в зависимости от срока их наработки.

Список литературы/References

1. Бозорт Р. (1956) *Ферромагнетизм*. Москва, Издательство иностранной литературы.  
Bozort, R. (1956) *Ferromagnetism*. Moscow, Inostr. Lit-ra [in Russian].

2. Бида Г.В. (2006) *Магнитные свойства термоупрочненных сталей неразрушающий контроль их качества*. Москва, Маршрут.  
Bida, G.V. (2006) *Magnetic properties of thermostrengthened steels, nondestructive testing of their quality*. Moscow, Marshrut [in Russian].

3. Hakan Gur C. (2019) Microstructure Characterization of Heat-Treated Ferromagnetic Steels by Magnetic Barkhausen Noise Method. *Conference Paper*, Aug 2019.

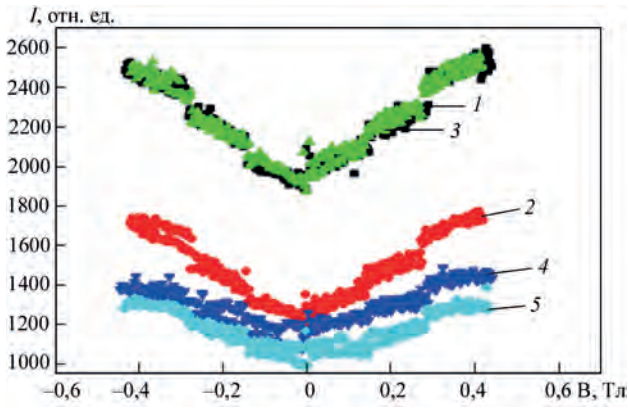


Рис. 8. График съемки по эффекту Баркгаузена (по оси *OX* – значение магнитного поля, Тл, по оси *OY* – значение интенсивности сигнала в относительных единицах): 1 – ЭПК (тыл); 2 – ВРЧ (тыл); 3 – ЭПК (фронт); 4 – ППП; 5 – НТ



4. Gur Hakan, Davut Kemal (2010) Monitoring the Microstructural Evolution in Spheroidized Steels by Magnetic Barkhausen Noise Measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **29**, 241–247.

5. Altpeter I., Cocogo P., Velasco K. (2016) Electromagnetic methods for characterization of materials. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods 2016*, 225–262.

6. Anglada-Rivera, Jose & Padovese, L.R. & Capó-Sánchez, J. (2001). Magnetic Barkhausen Noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: Influence of applied tensile stress and grain size. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials. J. Magn Magn Mater.* **231**, 299–306.

7. Lo, C.C.H. & Paulsen, Jason & Kinser, Emily & Jiles, David. (2004). Quantitative Evaluation of Stress Distribution in Magnetic Materials by Barkhausen Effect and Magnetic Hysteresis Measurements. *Magnetics, IEEE Transactions on*, **40**, 2173–2175.

8. Kikuchi, H. & Ara, Khushboo & Kamada, Y. & Kobayashi, Satoru. (2011). Characteristics of Barkhausen Noise Properties and Hysteresis Loop on Tensile Stressed Rolled Steels. *Journal of Magnetism*.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ  
НА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ

А.В. Грузевич<sup>1,3</sup>, Д.Л. Нікіфоров<sup>2</sup>, Д.А. Дереча<sup>3,4</sup>, Ю.Б. Скірта<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Трипільська ТЕС. 08720, Київська область, Обухівський р-н, м. Українка. E-mail: Gruzevich@bigmir.net  
<sup>2</sup>ПАТ «Центренерго». 03022, м. Київ, вул. Козацька, 120/4  
<sup>3</sup>Інститут магнетизму НАН України та МОН України. 03142, м. Київ, бульв. Акад. Вернадського, 36-б  
<sup>4</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 57

Отримано дані про взаємозв'язок фазових, структурних та магнітних властивостей ферито-перлітної сталі 12Х1МФ як в початковому стані, так і після експлуатації. Показано, що найбільша інтенсивність і величина зміни магнітного відгуку проявляються в металі труб поверхонь нагріву, які перебували в експлуатації та мають структуру, відмінну від початкової. Представлено можливість використання величини стрибкоподібної зміни інтенсивності магнітного поля, заснованого на ефекті Баркгаузена, для виявлення зон із неприпустимими структурними змінами в металі поверхонь нагріву, а також зон максимальних концентрацій напруг, що знаходяться в зоні ризику. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: магнітна індукція, структурно-фазовий стан, ефект Баркгаузена, поверхня нагріву, гістерезис

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS  
ON THE METAL MAGNETIC PROPERTIES

A.V. Gruzevich<sup>1,3</sup>, D.L. Nikiforov<sup>2</sup>, D.A. Derecha<sup>3,4</sup>, Yu.B. Skirta<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tripolye TPS. 08720, Ukrainka, Obukhov District, Kyiv Region, Ukraine. E-mail: Gruzevich@bigmir.net  
<sup>2</sup>PJSC «Tsentrenergo». 120/4 Kazatskaya Str., 03022, Kyiv, Ukraine.  
<sup>3</sup>Institute of Magnetism of the NAS of Ukraine and MES of Ukraine. 36-b Acad. Vernadskii Blvd., 03142, Kyiv.  
<sup>4</sup>NTUU «Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute», 57 Pobedi Prosp., 03056, Kyiv.

Data on interaction of phase, structural and magnetic properties of ferritic-pearlitic steel 12Kh1MF, both in the initial condition and after operation were obtained. It is shown that the highest intensity and magnitude of magnetic response variation are manifested in the metal of heating surface pipes, which have been in operation and have the structure different from the initial one. A possibility is presented of using the magnitude of jumplike changes of magnetic field intensity based on Barkhausen effect, in order to detect zones with inadmissible structural changes in the metal of the heating surfaces, as well as zones of maximum stress concentration, located in the risk zone. 8 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: magnetic induction, structural-phase state, Barkhausen effect, heating surface, hysteresis

Поступила в редакцію  
09.12.2019

Передплата — 2020 на журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»  
[www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk)  
Передплатний індекс 74475

| Україна   |          | Зарубіжні країни |             |
|---|----------|------------------|-------------|
| на півріччя   | на рік   | на півріччя      | на рік      |
| 400 грн.  | 800 грн. | 30 дол. США      | 60 дол. США |
| У вартість передплати включена доставка рекомендованою банделроллю. |          |                  |             |

Передплату на журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» можна оформити безпосередньо через редакцію або по каталогах передплатних агентств: ДП «Преса», «Пресцентр», (Україна); каталог зарубіжних видань «Белпочта» (Білорусь); каталог АТ «Казпочта» видання України (Казахстан). Передплату також можна оформити самостійно через сайт видавництва.

# ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ІМПУЛЬСНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ПОЛЯРИЗУЮЧОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ФЕРОМАГНІТНИХ ВИРОБІВ

Буссі Салам, Г.М. Сучков, С.Ю. Плєснецов

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

E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Виконано експериментальні дослідження, що направлені на розробку електромагнітно-акустичних перетворювачів з малогабаритними імпульсними джерелами магнітного поля. Показано можливість створення перетворювачів з плоскими двовіконними котушками намагнічування, які забезпечують формування магнітного поля з індукцією до 1 Тл за час дії імпульсу намагнічування до 200 мкс струмом 600 А з малим часом включення та виключення. Електромагнітно-акустичні перетворювачі з новими котушками намагнічування забезпечують отримання донних імпульсів з амплітудою більше 20 дБ у порівнянні з амплітудою завад. Бібліограф. 13, табл. 2, рис. 10.

*Ключові слова:* електромагнітно-акустичний перетворювач, магнітне поле, високочастотне електромагнітне поле, імпульси ультразвукових хвиль, імпульсне намагнічування, феромагнітний виріб, котушка індуктивності, контроль, діагностика, товщинометрія

У порівнянні з традиційним використанням контактного ультразвукового методу контролю електромагнітно-акустичний (ЕМА) метод ультразвукового контролю [1, 2] має ряд, у першу чергу, економічних [3, 4] переваг при дефектоскопії феромагнітних катаних, штампованих, кованих виробів. ЕМА метод не потребує використання контактної рідини, зачищення поверхні об'єкту контролю (ОК), може контролювати суттєво холодні та гарячі вироби [2, 5] на високій швидкості відносного переміщення ОК і ЕМА перетворювача (ЕМАП).

Проте ЕМА метод має й недоліки. При контролі портативними приладами феромагнітних виробів і матеріалів ЕМАП притягуються до ОК з великим зусиллям, що приводить до складнощів при скануванні поверхні виробів оператором, зношення ЕМАП, налипання окалини, яку важко видалити [1, 5, 6].

Вирішити вищенаведені проблеми ЕМА методу контролю можливо за рахунок використання в складі ЕМАП імпульсних джерел магнітного поляризованого поля [5, 7–9]. Проте при використанні імпульсних джерел магнітного поляризованого поля виникає ряд проблем, що не дають суттєво покращити умови контролю: шуми Баркгаузена, когерентні завади з металевих елементів перетворювача тощо [5, 8, 9]. Тому дослідження, що направлені на вирішення проблем якісного контролю виробів із феромагнітних матеріалів ЕМАП є актуальними.

Метою роботи є вдосконалення ЕМАП, обладнаних імпульсними джерелами магнітного поляризованого поля.

**Зміст і аналіз досліджень та розробки.** В роботах [5, 10–12] було показано, що найбільш ефек-

© Буссі Салам, Г.М. Сучков, С.Ю. Плєснецов, 2020

тивним для контролю та діагностики феромагнітних ОК є використання імпульсів об'ємних зсувних (поперечних) високочастотних ультразвукових хвиль за умов збудження та чутливості контролю при однакових умовах. Тому такий підхід використано в подальших дослідженнях та розробках ЕМАП з імпульсним намагнічуванням.

Як було показано в роботі [9] імпульсне джерело поляризованого магнітного поля, що виконано з багатовитковою котушкою індуктивності та феромагнітним осердям [13], використовувати недоцільно, оскільки тривалість імпульсу підмагнічування значна, а величина завад суттєво зменшує чутливість ЕМАП.

Вирішити проблему можливо за рахунок зменшення індуктивності котушки джерела магнітного поля та визначити конструктивні та технологічні підходи щодо виконання сердечника імпульсного магніту [8].

Зменшення індуктивності котушки імпульсного джерела магнітного поля досягається за рахунок намотки її витків з дроту у вигляді стрічки шириною 10 мм і товщиною 0,5 мм, рис. 1. Такий підхід дозволяє збуджувати струм в сотні Ампер з малим часом встановлення робочого режиму та його закінчення.

Для дослідження роботи пристрою (рис. 1) було розроблено стенд, блок-схема якого наведена на рис. 2.

В якості ОК було використано вирізаний з листа зразок із сталі 45 з окалиною на поверхні розмірами 100×100×40 мм<sup>3</sup>. Ступінь максимальної шорсткості поверхонь зразка становила 0,5 мм.

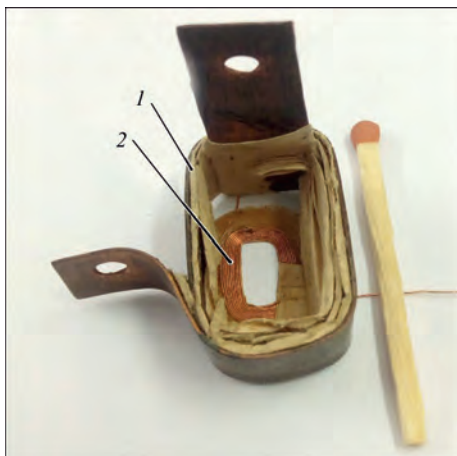


Рис. 1. Котушка імпульсного джерела магнітного поля та її розташування над високочастотною котушкою індуктивності ЕМАП: 1 – котушка індуктивності імпульсного джерела магнітного поля; 2 – високочастотна котушка індуктивності ЕМАП

Контроль проводився через лавсанову прокладку товщиною 0,2 мм. При вимірюваннях частота ультразвукових коливань складала 2,3 МГц, пакетний імпульс зондування мав тривалість в шість періодів частоти заповнення, величина пікового струму в високочастотній котушці складала 60 А.

Дослідження роботи котушки імпульсного джерела магнітного поля без сердечника показало, що при струмі близько 600 А створена максимальна індукція магнітного поля не перевищувала 1 Тл. Амплітуда прийнятого ультразвукового імпульсу відбитого від протилежної сторони зразка по відношенню до амплітуди завад після попереднього посилення не перевищувало трьох разів. Цього мінімально достатньо для проведен-

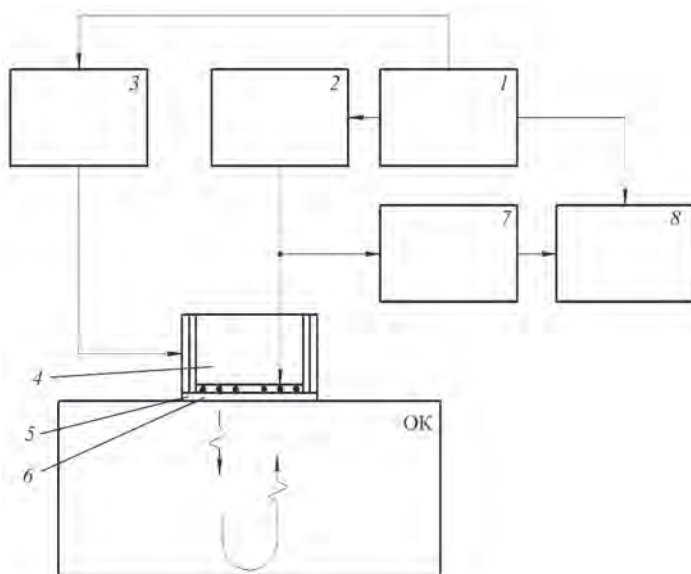


Рис. 2. Блок-схема стенда для проведення досліджень: 1 – блок управління; 2 – генератор зондуючих високочастотних імпульсів; 3 – джерело імпульсного струму для котушки намагнічування; 4 – котушка індуктивності джерела магнітного поля; 5 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 6 – протектор; 7 – підсилювач; 8 – осцилограф (стрілками показано напрямки розповсюдження ультразвукових імпульсів в об'ємі ОК)

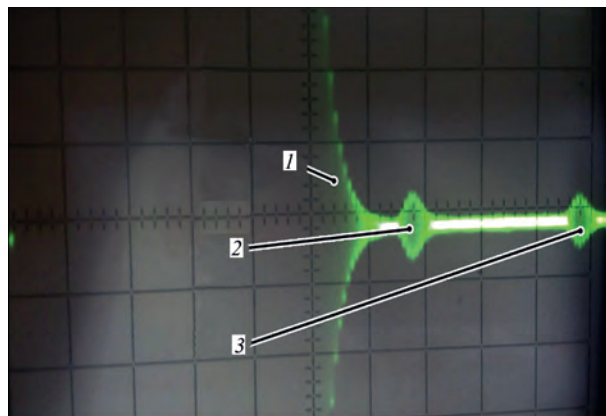


Рис. 3. Часова розгортка, яка отримана макетом з котушкою індуктивності джерела магнітного поля (рис. 1) з феромагнітним шихтованим осердям: 1 – зондуєчий імпульс з завадами; 2 – другий донний імпульс; 3 – третій донний імпульс

ня товщинометрії або контролю тінювим та дзеркально-тінювим методом, але не достатньо для дефектоскопії луна-методом, який має значне поширення при діагностиці ОК.

Для збільшення амплітуди збуджувального та приймального ультразвукового імпульсу було виготовлено шихтоване осердя з пластин трансформаторного заліза товщиною 0,5 мм, яке заповнювало внутрішній об'єм котушки джерела магнітного поля. Дослідження отриманого засобу показало, що прийнятий імпульс з об'єму ОК збільшився приблизно в п'ять разів. Але і когерентні завади з осердя збільшились приблизно в стільки ж разів. В зоні розгортки після імпульсу збудження високочастотної котушки індуктивності виникли суттєві завади, які не дали можливості прийняти навіть перший донний сигнал (рис. 3).

Для збільшення величини індукції магнітного поля ЕМАП досліджено видовжену по висоті котушку індуктивності. При живленні такої котушки індуктивності струмом 600 А встановлено збільшення індукції поляризованого магнітного поля лише на 30 %. Враховуючи недоліки конструкції, наведеної на рис. 1, доцільно використання в синфазному варіанті високочастотної котушки перетворювача з двома робочими ділянками та створення магнітного поля двома протяжними по висоті котушками індуктивності джерела магнітного поля, включених зустрічно по магнітному полю.

На рис. 4 наведено спрощену конструкцію ЕМАП з видовженими котушками індуктивності джерела магнітного поля для збудження імпульсного магнітного поля.

Схему взаємного розташування плоскої високочастотної котушки індуктивності 5 та двох видовжених котушок індуктивності 9 і 10 з сердечниками 11 і 12 наведено на рис. 5.



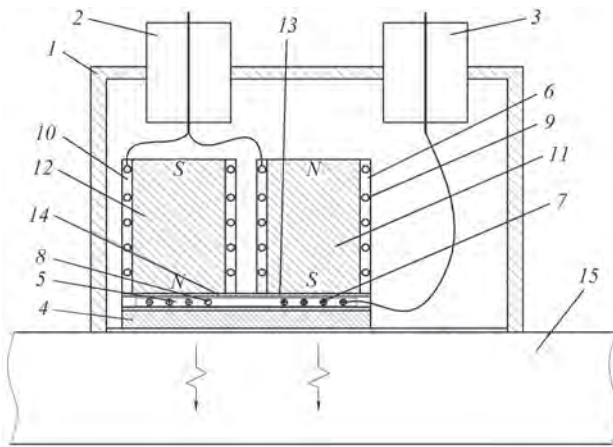


Рис. 4. Спрощена конструкція ЕМАП з видовженими котушками індуктивності на поверхні ОК: 1 – корпус; 2, 3 – електричні з'єднувачі; 4 – протектор; 5 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 6 – джерело магнітного поляризовуючого поля; 7, 8 – лінійні робочі ділянки паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності; 9, 10 – дві видовжені котушки індуктивності; 11, 12 – сердечники з феромагнітного матеріалу; 13, 14 – торці сердечників; 15 – ОК (стрілками показано напрямки розповсюдження збуджених ультразвукових імпульсів)

ЕМАП працює наступним чином. ЕМАП, який має корпус 1, розташовують на поверхні ОК 15 (див. рис 4) так, щоб протектор 4 прилягав до поверхні ОК 15. В процесі роботи ЕМАП у дві видовжені котушки індуктивності 9 і 10 з сердечниками 11 і 12 з феромагнітного матеріалу джерела магнітного поля 6 через електричний з'єднувач 2 подається імпульс струму  $I$  прямокутної форми з заданою часовою тривалістю  $T$  (рис. 6, а).

Оскільки дві видовжені котушки індуктивності 9 і 10 електрично з'єднані між собою зустрічно по магнітному полю, то на торцях 13 і 14 сердечників 11 і 12, відповідно, формується поляризуюче магнітне поле з протилежно напрямленими векторами магнітної індукції, які діють на поверхневі

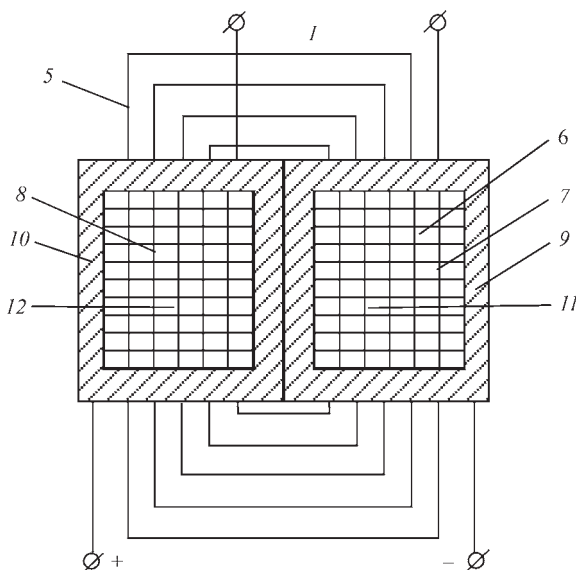


Рис. 5. Схема розміщення котушок імпульсного ЕМАП (позначення 5–11 див. на рис. 4)

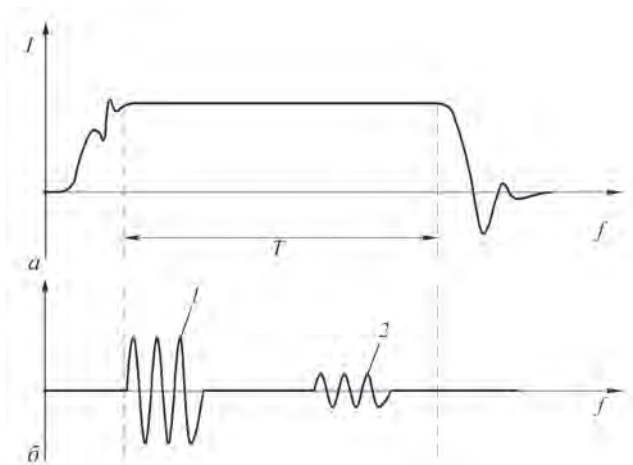


Рис. 6. Часові розгортки для струмів живлення котушок ЕМАП (опис див. у тексті)

шари ОК 15 під лінійними робочими ділянками 7 і 8 паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності 5. Оскільки поляризуюче магнітне поле діє короткий проміжок часу  $T$  (рис. 6, а), як правило, кілька сотень мікросекунд, то ЕМАП практично не притягується до ОК 15. Час робочої експлуатації суттєво збільшується за рахунок зменшення зносу протектора перетворювача.

Одночасно зі створеним імпульсним поляризуючим магнітним полем в плоскій високочастотній котушці індуктивності 5 через з'єднувач 3 збуджується імпульс високочастотного струму живлення (рис. 6, б, поз. 1). У результаті в поверхневому шарі ОК 15 під лінійними робочими ділянками 7 і 8 паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності 5 створюється імпульс високочастотного електромагнітного поля.

Взаємодія магнітного поля та високочастотного електромагнітного поля в поверхневому шарі ОК 15 призводить до збудження ультразвукових імпульсів з однаковою фазою, які розповсюджуються в об'ємі ОК 15. Відбиті з ОК 15 ультразвукові імпульси приймаються, імпульс (рис. 6, б, поз. 2), за рахунок зворотного ЕМА перетворення плоскою високочастотною котушкою індуктивності 5.

Експериментальні дослідження роботи розробленого ЕМАП показали, що ультразвукові сигнали відбиті від протилежної поверхні зразка ОК по відношенню до амплітуди завад збільшились приблизно на 15...20 %. Цього недостатньо для виконання контролю луна-методом.

Кращий результат відносно попереднього джерела магнітного поля показав варіант конструкції у вигляді плоскої котушки індуктивності, зображення якої наведено на рис. 7.

Перевірка роботи такої котушки показала збільшення індукції поляризуючого магнітного поля приблизно на 50 %. Імпульс струму в



Рис. 7. Плоска котушка індуктивності джерела магнітного поля ЕМАП з одним вікном

котушці має практично прямокутну форму, що зменшує загальний час дії імпульсу струму намагнічування. Проте недоліком такої котушки є неможливість використання двох лінійних ділянок високочастотної котушки індуктивності. Для виключення вказаного недоліку було виготовлено плоскі котушки індуктивності джерела магнітного поляризованого поля з двома вікнами та різною кількістю витків.

Спрощена нова конструкція ЕМАП з імпульсним джерелом магнітного поляризованого поля наведена на рис. 8.

ЕМАП працює наступним чином. ЕМАП, який має корпус 9, розташовують на поверхні ОК 14 так, щоб протектор 10 прилягав до поверхні ОК 14. Низькочастотні котушки індуктивності 3 і 4 джерела магнітного поля 2, ізоляційна прокладка 15 і плоска високочастотна котушка індуктивності 1 закріплені в основі 13, яка, в свою чергу, закріплена в корпусі 9. Встановлення перетину провідників низькочастотних котушок індуктивності

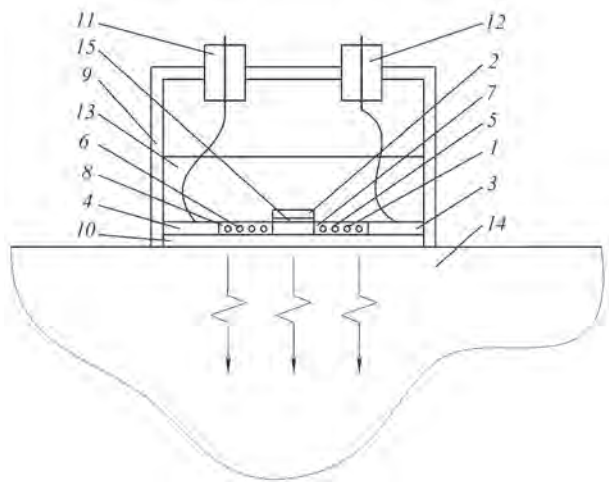


Рис. 8. Спрощене зображення конструкції ЕМАП для безконтактного ультразвукового контролю ОК з двохвіконними котушками індуктивності: 1 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 2 – джерело магнітного поляризованого поля; 3, 4 – низькочастотні котушки індуктивності; 5, 6 – лінійні робочі ділянки паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності; 7, 8 – отвори низькочастотних котушок індуктивності; 9 – корпус; 10 – протектор; 11, 12 – електричні з'єднувачі; 13 – основа; 14 – ОК; 15 – ізоляційна прокладка (стрілками показано напрямок розповсюдження ультразвукових імпульсів)

3 і 4 прямокутної форми з співвідношенням ширини до товщини 5...10 разів дозволяє ефективно концентрувати магнітне поле у вікнах 7 і 8.

Процес роботи ЕМАП аналогічний технології роботи перетворювача, наведеного на рис. 4.

Реальні зображення двохвіконних котушок індуктивності, які можуть бути використані в конструкції ЕМАП (рис. 8), показано на рис. 9. Дослідження котушок такого типу показали наступне.

- Паяні ділянки плоскої котушки індуктивності джерела магнітного поляризованого поля погіршують її теплові характеристики, тому котушки потрібно виготовляти з цільної високоелектропровідної пластини, наприклад, міді.

- Ізоляційні прокладки між пластинами котушки повинні мати високу міцність, оскільки при живленні прямокутними імпульсами струму між ними виникають вібрації, які можуть пошкодити ізоляцію.

- При значній частоті зондування ОК ультразвуковими імпульсами, тобто, при значній кількості імпульсів живлення джерела магнітного поля або значної величини струму плоскі котушки індуктивності можуть нагріватися до значної температури. Тому необхідно передбачати охолодження котушок. Матеріал дроту котушок повинен мати високу теплопровідність.

Результати дослідження впливу кількості витків котушки на відношення амплітуд донного сигналу та завад наведено в табл. 1. Аналіз даних показує, що кількість витків плоскої котушки індуктивності джерела магнітного поля ЕМАП раціонально вибирати не менше трьох. Проте більша кількість витків котушки індуктивності утруднює її охолодження. Збільшується час встановлення робочого режиму, а також габарити ЕМАП.

Таблиця 1. Вплив кількості витків плоскої котушки індуктивності джерела магнітного поля ЕМАП на амплітуду корисного сигналу

| Кількість витків, шт. | Відношення амплітуди донного імпульсу до амплітуди завад, дБ |
|-----------------------|--|
| 1                     | 12   |
| 2                     | 18   |
| 3                     | 24   |
| 4                     | 27   |
| 5                     | 29   |



Рис. 9. Плоскі котушки індуктивності джерела магнітного поля ЕМАП з двома вікнами та різною кількістю витків

Досліджено також в плив частоти зондування ОК на температурні характеристики котушок індуктивності джерела магнітного поля. Результати досліджень наведено в табл. 2.

Результати (табл. 2) отримані при температурі навколишнього середовища 22 °С. Струм в котушці індуктивності джерела магнітного поля складав 600 А. Час дії імпульсу намагнічування складав 200 мкс, що достатньо для діагностики об’єму більшості феромагнітних виробів. Діелектричний зазор між ЕМАП і ОК складав 0,2 мм.

Аналіз табл. 2 показує, що до частот зондування ОК близько 50...60 Гц охолодження ЕМАП не потрібне. При частотах зондування вище 50...60 Гц необхідне охолодження, наприклад, струменем повітря.

Слід відмітити, що використання моделі ЕМАП з плоскою котушкою індуктивності джерела магнітного поля (рис. 9) дозволило суттєво зменшити тривалість зондуючого імпульсу з завадами, (рис. 10, поз. 1) та покращити відношення амплітуди донних імпульсів до амплітуди завад, (рис. 10, поз. 2–4).

Дані, наведені на рис. 10, отримані при частоті зондування 40 Гц, частоті ультразвукових коливань 2,3 МГц, тривалості імпульсу намагнічування 200 мкс, струму намагнічування 600 А. Вимірювання виконували через лавсанову прокладку товщиною 0,2 мм між макетом ЕМАП і ОК.

Аналіз даних, наведених на рис. 10 в порівнянні з даними на рис. 3, вказують на можливість використання котушок такого типу в складі ЕМАП

**Таблиця 2.** Вплив частоти зондування ОК на температуру плоскої двохвіконної котушки індуктивності джерела магнітного поля

| Частота зондування, Гц | Температура, °С |
|------------------------|-----------------|
| 10                     | 22              |
| 30                     | 25              |
| 50                     | 44              |
| 60                     | 68              |
| 70                     | 86              |
| 80                     | 97              |
| 90                     | 113             |

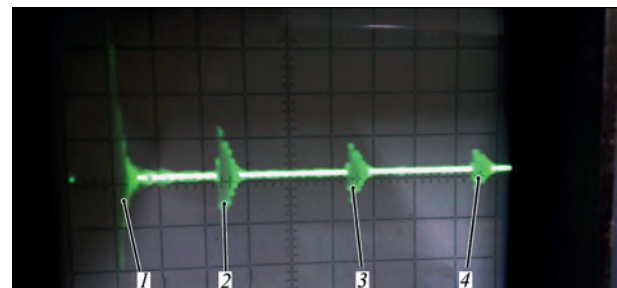


Рис. 10. Часова розгортка з донними сигналами при використанні плоскої трьохвиткової котушки індуктивності імпульсного джерела магнітного поля ЕМАП з двома вікнами: 1 – зондуючий імпульс з завадами; 2 – перший донний імпульс; 3 – другий донний імпульс; 4 – третій донний імпульс

для товщинометрії, дефектоскопії тіньовим та дзеркально-тіньовим методом, а при використанні засобів обробки прийнятої інформації, то і для ультразвукової дефектоскопії луна-методом [5].

### Висновки

1. Встановлено, що для формування потужного імпульсного намагнічувального поляризовуючого магнітного поля електромагнітно-акустичного перетворювача з заданим часом дії з мінімальною тривалістю процесу включення та виключення, джерело магнітного поля необхідно виготовляти з плоских котушок індуктивності з двома вікнами, де формується магнітне поле протилежної полярності. Під вказаними вікнами необхідно розташовувати робочі ділянки високочастотної котушки індуктивності, в яких високочастотний струм направлений в протилежних напрямках, що забезпечує синфазне збудження в об’єкті контролю ультразвукового поля збільшеної потужності.

2. Показано, що раціонально вибирати кількість витків плоских котушок індуктивності джерела імпульсного магнітного поля з двома вікнами в кількості трьох, що забезпечує індукцію магнітного поля до 1 Тл, температуру котушки до 80...90 °С при частоті зондування до 70 Гц та максимальному струмові намагнічування 600 А.

3. Розроблено конструкції електромагнітно-акустичних перетворювачів з імпульсним джерелом поляризовуючого магнітного поля, які забезпечують отримання відношення амплітуд донних імпульсів і завад більше 20 дБ, що забезпечує використання електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю луна-методом.

4. Встановлено, що для забезпечення теплового режиму роботи електромагнітно-акустичного перетворювача плоску котушку індуктивності джерела імпульсного магнітного поля необхідно виготовляти з цілого шматка тонкого листа з високоелектропровідного матеріалу, наприклад, з міді.

### Список літератури

- Патон Б.Е., Троицкий В.А. (2013) Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по совершенствованию неразрушающего контроля сварных соединений. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 13–29.
- Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. (2004) *Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль*. Ключев В.В. (ред), Москва, Машиностроение.
- Судакова К.В., Казюкевич И.Л. (2004) Пути повышения эффективности контроля качества металлургической продукции. *В мире неразрушающего контроля*, 3, 8–10.
- Семеренко А.В. (2014) Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок. *Территория NDT*. 1, 42–43.
- Сучков Г.М. (2005) *Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів*: автореф. дис. ...докт. техн. наук. Харків, НТУ «ХПІ», 37.
- Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Радев Х.К. и др. (2016) Электромагнитно-акустический преобразователь для



- ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия. *Технічна електродинаміка*, **2**, 78–82.
7. Михайлов А.В., Гобов Ю.Л., Смородинский Я.Г., Щербинин С.В. (2015) Электромагнитно-акустический преобразователь с импульсным подмагничиванием. *Дефектоскопия*, **8**, 14–23.
  8. Сучков Г.М., Салам Бусси (2019) Моделирование поляризуемого магнитного поля электромагнитно-акустического перетворювача електромагнітної енергії в ультразвукову. *Тези 19 міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатики та моделювання» 11–16 вересня, Кароліно-Бугаз*.
  9. Салам Бусси (2019) Ультразвуковий перетворювач для безконтактного контролю виробів з ферромагнітних матеріалів. *WayScience. Матеріали I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: літні диспути», 1–2 серпня, Дніпро*, сс. 620–624.
  10. Сучков Г.М. (2001) Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом. *Контроль. Диагностика*, **12**, 36–39.
  11. Бобров В.Т., Шевалдыкин В.Г. (2016) Многократные ультразвуковые эхо-сигналы в пластине: анализ и применение. *В мире неразрушающего контроля*, **19**, 1, 36–41.
  12. Бобров В.Т., Шевалдыкин В.Г. (2017) Многократные ультразвуковые эхо-сигналы в пластине: анализ и применение. *Технология машиностроения*, **5**, 50–54.
  13. Альохин С.Г. (2013) Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МНПО «Спектр».
  3. Sudakova, K.V., Kazyukevich, I.L. (2004) On improvement of effectiveness of quality control of metallurgical products. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, **3**, 8–10 [in Russian].
  4. (2014) Application of EMAT for corrosion and erosion control in steam heaters ob boiler units. *Territoriya NDT*, **1**, 42–43 [in Russian].
  5. Suchkov, G.M. (2005) *Development of theory and practice of designing instruments for electromagnetoacoustic testing of metal products*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].
  6. Migushchenko, R.P., Suchkov, G.M., Radev, Kh.K. et al. (2016) Electromagnetoacoustic transducers for ultrasonic thickness measurement of ferromagnetic metal products without removing the dielectric coating. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **2**, 78–82 [in Russian].
  7. Mikajlov, A.V., Gobov, Yu.L., Smorodinsky, Ya.G., Shcherbinin, S.V. (2015) Electromagnetoacoustic transducer with pulsed magnetization. *Defektoskopiya*, **8**, 14–23 [in Russian].
  8. Suchkov, G.M., Salam Bussi (2019) Modeling of polarizing magnetic field of electromagnetoacoustic transducer of electromagnetic energy into ultrasonic energy. In: *Abstr. of Papers of 19th Int. Sci.-Techn. Conf. on Problems of Informatics and Modeling (11–16 September, 2019, Carolino Bugaz, Ukraine)*.
  9. Salam Bussi (2019) Ultrasonic transducer for contactless control of products from ferromagnetic materials. *Way Science. In: Proc. of 1st Int.-Pract. Internet-Conf. on Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Discussions (1–2 August, 2019, Dnipro)*, pp. 620–624.
  10. Suchkov, G.M. (2001) Investigation of the features of propagation of elastic waves excited by EMA method. *Kontrol. Diagnostika*, **12**, 36–39 [in Russian].
  11. (2016) Multiple ultrasonic echo-signals in a plate: Analysis and application. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, **19**(1), 36–41 [in Russian].
  12. Bobrov, V.T., Shevaldykin, V.G. (2017) Multiple ultrasonic echo-signals in a plate: Analysis and application. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **5**, 50–54 [in Russian].
  13. Alyokhin, S.G. (2013) *Thickness measurement in metal structures based on electromagnetoacoustic transformation in a pulsed magnetic field*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tekhn. Sci. Degree. Moscow, Spektr [in Russian].

## References

# ELECTROMAGNETOACOUSTIC TRANSDUCER WITH PULSED SOURCES OF POLARIZING MAGNETIC FIELD FOR QUALITY CONTROL OF FERROMAGNETIC PRODUCTS

Bussi Salam, G.M.Suchkov, S.Yu. Plesnetsov

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kirpichov Str., 61002, Kharkiv, Ukraine.  
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Experimental studies were performed, which are aimed at development of electromagnetoacoustic transducers with small-sized pulsed sources of the magnetic field. Possibility of development of transducers with flat two-window magnetization coils is shown. They provide formation of the magnetic field with up to 1 T induction during the time of impact of magnetization pulse of up to 200  $\mu$ s with 600 A current with short switching on and off time. Electromagnetoacoustic transducers with new magnetization coils ensure obtaining backwall echo pulses with more than 20 dB amplitude, compared to interference amplitude. 13 Ref., 2 Tabl., 10 Fig.

**Keywords:** *electromagnetoacoustic transducer; magnetic field, high-frequency electromagnetic field, ultrasonic wave pulses, magnetization pulse, ferromagnetic product; inductance coil, control, diagnostics, thickness measurement*

Надійшла до редакції  
07.10.2019

**Правила для авторів, ліцензійні угоди, архівні випуски журналів на сайті видавництва [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com).  
У 2020 р. у відкритому доступі випуски журналів з 2009 по 2018 рр. в форматі \*.pdf.**

## Контакти:

Тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-23-90  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

Підписано до друку 27.02.2020. Формат 60×84/8.  
Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7.67.  
Друк ТОВ «ДІА».  
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.



## МІЖГАЛУЗЕВИЙ УЧБОВО-АТЕСТАЦІЙНИЙ ЦЕНТР ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

Державне підприємство «Міжгалузовий учбово-атестаційний центр Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України» створено у 1988 р. рішенням уряду України на базі діючих з 1958 р. при ІЕЗ ім. Є.О. Патона курсів із підвищення кваліфікації інженерно-технічних працівників.

Професійне навчання, підвищення кваліфікації та атестація (сертифікація) персоналу зварювального виробництва з орієнтацією на розвиток і поглиблення професійної компетентності є визначальною концепцією в діяльності ДП «МУАЦ ІЕЗ ім. Є.О. Патона».

Центр акредитований в національній та міжнародній кваліфікаційній системі та забезпечує безперервну, багатопланову професійну підготовку різних категорій персоналу зі зварювання за програмами:

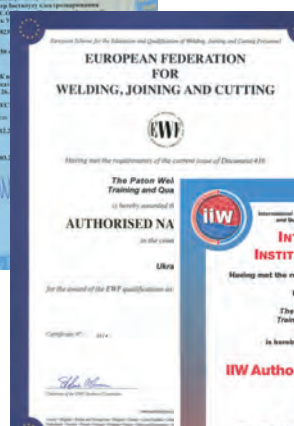
- Перепідготовка та підвищення кваліфікації інженерно-технічного персоналу в галузі зварювання та споріднених технологій
- Підвищення кваліфікації викладачів та майстрів виробничого навчання (інструкторів) зі зварювання
- Професійна підготовка, перепідготовка та підвищення кваліфікації зварників і контролерів з неруйнівного контролю
- Кваліфікаційна атестація персоналу зварювального виробництва відповідно до національних та міжнародних вимог

Навчальні програми перепідготовки та підвищення кваліфікації інженерно-технічного персоналу розраховані на фахівців, які вирішують проблеми впровадження нових технологічних процесів зварювання та споріднених технологій та направлені на розвиток професійних знань та

умінь, пов'язаних з реалізацією функцій управління, координації та забезпечення якості зварювання відповідно до вимог національних, європейських і міжнародних стандартів.



Сертифікати та свідоцтво про акредитацію

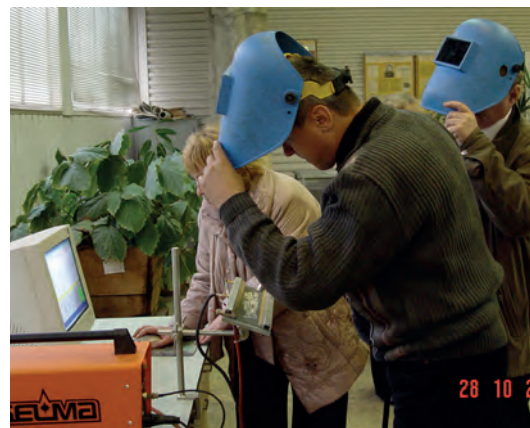


Програми підвищення кваліфікації викладачів та майстрів виробничого навчання зі зварювання передбачають розширення їх професійної компетентності для впровадження інноваційних технологій навчання та формування нових підходів в організації професійної підготовки зварників.

Сучасне зварювальне виробництво пред'являє спеціальні вимоги до професійної підготовки



Заняття в групі інженерів зі зварювання



Заняття в комп'ютерно-тренажерному класі

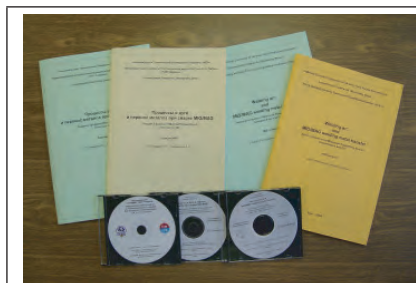




Практичне заняття у навчальній майстерні



Підтвердження професійної кваліфікації



Навчальні посібники модульної технології навчання



Навчальні майстерні

зварників, професійна компетентність яких повинна відповідати діючим на виробництві вимогам з забезпечення якості зварювання. Програми професійної підготовки зварників розроблено на базі модульних навчальних систем, рекомендованих Міжнародною організацією праці та Міністерством освіти і науки України. Застосування модульних навчальних програм забезпечує мобільність професійної підготовки, значно полегшує сприйняття навчального матеріалу та дає можливість кожному слухачеві засвоювати програму у власному зручному темпі.

Підтвердження професійної компетентності (атестація) проводиться за програмами спеціальної підготовки та кваліфікаційних випробувань згідно з діючими в зварювальному виробництві нормативними документами (правила та стандарти).

Центр також має акредитацію Міжнародного інституту зварювання і Європейської федерації зварювання на підготовку та присвоєння міжнародних професійних кваліфікацій у галузі зварювання:

- Міжнародний інженер зі зварювання (IWE);
- Міжнародний технолог зі зварювання (IWT);
- Міжнародний спеціаліст зі зварювання (IWS);
- Міжнародний практик зі зварювання (IWP);
- Міжнародний інспектор зі зварювання (IWIP);
- Міжнародний зварник (IW).

Центр є учасником міжнародних програм з підготовки персоналу зварювального виробництва й використовує в навчальному процесі інноваційні



Диплом міжнародного інженера зі зварювання

навчально-методичні матеріали як власної розробки, так і створені в інших країнах.

Навчальна база, яка оснащена сучасним зварювальним устаткуванням, інноваційні технології навчання та висококваліфіковані викладачі та інструктори забезпечують досягнення кожним слухачем необхідного рівня професійної кваліфікації.

<http://muac.kpi.ua>





## АТЕСТАЦІЙНИЙ ЦЕНТР З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ при ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

Державне підприємство «Атестаційний центр з неруйнівного контролю при ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» (АЦНК) створено у 1991 р. на базі Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України постановою Президії НАН України з метою організації навчання і атестації для подальшої сертифікації фахівців I, II та III рівнів з неруйнівного контролю зварних конструкцій і виробів, згідно з національними, європейськими та міжнародними стандартами та нормами. Центр акредитовано в національній та міжнародній кваліфікаційній системі по навчанню, атестації та сертифікації фахівців по наступним методам неруйнівного контролю:

- візуально-оптичний (VT);
- ультразвуковий (UT);
- радіографічний (RT);
- капілярний (PT);
- магніто-порошковий (MT);
- вихрострумний (ET);
- акустичний (AT);
- контроль герметичності (LT);
- тепловий (TT).

За час свого існування в атестаційному центрі пройшли підготовку близько 10 тис. фахівців (у тому числі й іноземні спеціалісти), надано тисячі послуг з технічного діагностування та неруйнівного контролю об'єктів підвищеної небезпеки.



Практичні заняття



Теоретичні заняття



Навчання по UT



Група слухачів з НК



Республіканський стадіон, де було проведено роботи по неруйнівному контролю

Іншим напрямком діяльності АЦНК є обстеження методами неруйнівного контролю технічного стану об'єктів підвищеної небезпеки з метою запобігання потенційно аварійним ситуаціям. Центр проводить неруйнівний контроль, технічне діагностування та технічне опосвідчення наступного обладнання:

- метало- та будівельні конструкції;
- парові та водогрійні котли;
- посудини, що працюють під тиском;
- трубопроводи пари та гарячої води;
- вантажопідйомні механізми;
- технологічні трубопроводи та обладнання;
- магістральні трубопроводи;
- резервуари для зберігання нафтопродуктів.

АЦНК займається розробкою технологій для контролю обладнання у відповідності до нових національних стандартів гармонізованих з європейськими та міжнародними, а також розробляє обладнання для неруйнівного контролю.

За багато років своєї діяльності ДП «АЦНК при ІЕЗ ім. Є.О. Патона» зарекомендувало себе, як надійний та висококваліфікований партнер, клієнтами якого стали найбільші підприємства України.



Проведення діагностики зварних з'єднань на Подільському цементному заводі

У своїй діяльності центр дотримується наступних принципів:

- якісне та своєчасне виконання своїх обов'язків перед Замовником;
- збереження єдиних принципів роботи з Замовником незалежно від його статусу;
- збереження конфіденційності інформації;
- оперативне реагування на побажання Замовника;
- чесність та порядність у виконанні своїх обов'язків.

#### Наші можливості:

- колектив досвідчених та висококваліфікованих викладачів;
- сучасна матеріально-технічна та методична база;
- багаторічний досвід на ринку послуг;
- використання сучасних комп'ютерних технологій для самопідготовки та об'єктивного оцінювання набутих знань;
- гнучкий підхід до побажань Замовника;
- можливість проведення виїзних сесій;
- індивідуальний підхід до кожного.

Тел.: +38 (044) 200-81-83, 200-81-40, 200-81-86  
acnk.kiev.ua





## МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ «ПАТОНСЕРТ»

Товариство з обмеженою відповідальністю «Міжнародний науково-технічний центр забезпечення якості та сертифікації «ПАТОНСЕРТ» (ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ») створено в 1994 р. спільним рішенням НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України», Товариства зварників України, Асоціації зварників Грузії і Казахстану та Інституту зварювання та захисних покриттів (Білорусь) з метою підвищення якості та конкурентоспроможності продукції зварювальних виробництв на основі впровадження і сертифікації систем забезпечення якості.

Основні напрямки діяльності центру:

- розроблення правил і процедур проведення оцінки та сертифікації зварювальних виробництв;
- надання консультаційних послуг підприємствам зварювального виробництва при впровадженні систем забезпечення якості зварювання;
- проведення спільних з міжнародними центрами сертифікаційних випробувань;

– сертифікація зварювальних виробництв відповідно до вимог національних та міжнародних стандартів;

– надання послуг з розробки технологічних інструкцій зі зварювання (WPS);

– атестація технологій зварювання.

ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ» акредитовано з 2006 р. Міжнародним інститутом зварювання та Європейською зварювальною федерацією (міжнародна система сертифікації ІІВ/ЕВФ) на проведення оцінки та сертифікацію зварювальних виробництв, атестацію технологій зварювання на відповідність європейських та міжнародних стандартів серії EN ISO 3834.

Сертифікація зварювального виробництва згідно EN ISO 3834 застосовується, коли потрібно підтвердження здатності виробника виготовляти зварні конструкції, якість яких цілком задовольняє регламентованим вимогам.

Визначальним фактором підтвердження відповідності регламентованих вимог є атестаційні випробування технологій зварювання відповідно з вимогами стандарту EN ISO 15614 та оформлення Протоколу підтвердження технології зварювання (WPQR).

Партнерами ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ» є більш як 30 підприємств України та європейських країн. Зокрема, сертифікати ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ» отримали такі підприємства, як: БАТ «ТУРБОАТОМ», ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», ПАТ «Запоріжжкран», ПрАТ «Краматорський завод важкого станкобудування», ТОВ «ОРІОН.ГРУП», ТОВ «MADESTA» (Латвія).

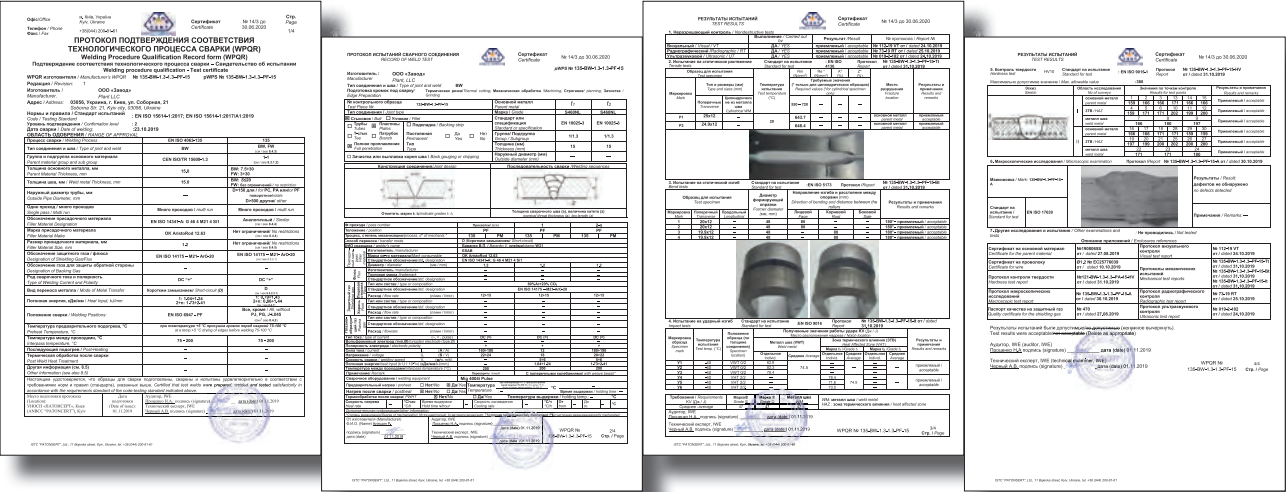


Сертифікати акредитації



Міжнародний та Європейський сертифікати підприємств





Вручення сертифікатів в ІЕЗ ім. Є.О. Патона



ПАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування» та  
АТ «ТУРБОАТОМ»



ТОВ «СТАЛЬМОСТ»



ПАТ «Запорізький завод важкого кранобудування»



ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод»

E-mail: [patoncet@gmail.com](mailto:patoncet@gmail.com)

## МОЗГОВИЙ ОЛЕКСАНДР ВСЕВОЛОДОВИЧ

(10.12.1948 – 27.12.2019)



27 грудня 2019 р. пішов з життя Олександр Всеволодович Мозговий – віце-президент Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, директор Придніпровського ате-стаційного центру неруйнівного контролю, засновник і керівник Науково-виробничого

підприємства «Машинобудування», один із найавторитетніших фахівців України в області НК.

Протягом багатьох років О.В. Мозговий працював в Українському НДІ технології машинобудування. Під його керівництвом були розроблені та впроваджені нові прилади і автоматизовані системи НК великогабаритних виробів відповідального призначення з полімерних і композиційних матеріалів. Пізніше він заснував і очолив Науково-виробниче підприємство «Машинобудування», – одне з провідних в Україні з розробки та постачання засобів НК і ТД.

У 1995 р. він разом з групою однодумців заснував на базі УкрНДІТМ, ТОВ «Придніпровський АЦНК ТД», який очолював з 1998 р. У період його керівництва, завдяки працьовитості, вимогливості до себе та співробітників, ТОВ «Придніпровський АЦНК ТД» став одним із провідних центрів України з підготовки та атестації фахівців з неруйнівного контролю.

Багато років О.В. Мозговий викладав на кафедрі радіоелектронної автоматики фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Він був одним із організаторів нової спеціальності з підготовки інженерів у ДНУ – «Прилади і системи НК». Викладаючи там лекції з методів НК, Олександр Всеволодовичу вдавалося прищепити любов і величезний інтерес до неруйнівного контролю не одному поколінню студентів. Завдяки йому світ НК поповнився величезною кількістю висококласних фахівців, які успішно працюють на підприємствах України.

Він з великим ентузіазмом займався науковою роботою, вирішував прикладні завдання з просування передових технологій НК на підприємствах провідних промислових галузей України – атомної

та теплової енергетики, металургії, нафтовидобувної галузі та ін. Будь-яку проблему, що його цікавила, Олександр Всеволодович досконально вивчав і з неймовірним завзяттям вирішував її. В останні роки багато уваги він приділяв вивченню питання магнітної пам'яті металу та контролю напружено-деформованого стану об'єктів і споруд.

О.В. Мозговий був співавтором двох монографій («Обробка інформації в приборах і системах НК» та «Математична дефектоскопія»), автором і співавтором великої кількості статей і доповідей з вирішення важливих питань НК.

Довгі роки будучи віце-президентом Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, Олександр Всеволодович з величезним ентузіазмом вів роботу, спрямовану на посилення ролі Товариства у просуванні нових технологій та приладів у найважливіші промислові галузі України, об'єднання фахівців, зайнятих в області НК для взаємного обміну знаннями та досвідом.

Протягом багатьох років Олександр Всеволодович був натхненником і провідним організатором наукової програми щорічної міжнародної конференції «Сучасні методи та засоби НК і ТД», яка отримала заслужену популярність у фахівців з України та з-за кордону.

Олександра Всеволодовича знали як доброго, щирого та чуйного друга, який володів неймовірною життєвою силою та невичерпною енергією. Поруч з ним завжди було цікаво жити та працювати. Він був дуже відкрита людина, готова прийти на допомогу в будь-якій ситуації. Свій колектив, своїх колег він завжди сприймав як сім'ю, яка робить одну велику спільну справу.

Від імені всієї дефектоскопічної спільноти України та колег з інших країн висловлюємо найщиріші співчуття родині Олександра Всеволодовича.

*Правління Українського товариства НКТД  
Колектив Придніпровського АЦНК ТД  
Викладачі та студенти ДНУ ім. О. Гончара*



## WireSense: ДРОТОВИЙ ЕЛЕКТРОД У ЯКОСТІ ДАТЧИКА

WireSense – це допоміжна система від компанії Fronius, яка покращує ефективність роботизованого зварювання. Дротовий електрод виконує функцію датчика для перевірки положення компонента перед кожним зварюванням. Точне визначення висоти і розташування країв листа або труби дає змогу уникнути багатьох виробничих дефектів і забезпечує ідеальний результат. Шви не потрібно переробляти, і обсяг браку суттєво знижується. Відмова від додаткових оптичних вимірювальних пристроїв сприяє суттєвому заощадженню часу і коштів.

Відхилення компонентів від умовного стандарту, зокрема, різноманітні повітряні зазори та допуски на затискання, можуть призводити до проблем під час зварювання. У найгіршому разі вони стають причиною зміни положення зварювання та недостатнього проплавлення зварного шва. Тому більшість компаній під час роботизованого зварювання використовують оптичні вимірювальні пристрої. Ці пристрої дорого коштують, обмежують доступ до компонентів, їх потрібно регулярно очищувати та додатково виконувати калібрування між центральною точкою інструмента (TCP) і датчиком. Компанія Fronius пропонує більш зручне, функціональне та надійне рішення – технологію WireSense.

**Принцип роботи WireSense.** Технологія WireSense не потребує використання додаткових компонентів обладнання – датчиком слугує дротовий електрод. Зварювальний пальник сканує компонент за допомогою операції зворотнього подавання дроту, а зварювальна система передає дані про висоту та положення країв на роботизова-

ну установку. Таким чином можна, скажімо, точно визначити краї перед зварюванням з'єднання внапуск, і система відреагує на виявлені відхилення. Роботизована установка коригує у відповідній програмі процес створення зварних швів.

Після оцінки відомостей щодо висоти роботизована установка визначає напрямок краю і його точну висоту. Крім того, вона визначає точний повітряний зазор між листами. Краї вимірюються з висоти 0,5 мм. Технологію WireSense можна використовувати для зварювання звичайної і нержавіючої сталі, алюмінію та інших сплавів. Найкраще переваги WireSense виявляються саме під час роботи з алюмінієм, оскільки він відбиває світло і цим перешкоджає роботі оптичних вимірювальних пристроїв.

Крім того, оптичні датчики зазвичай кріпляться на корпусі роботизованої установки і заважають руху її маніпулятора. Тож, якщо доступ до компонентів обмежений, використовувати камери або лазерні пристрої проблематично. Дротовий датчик не створює таких обмежень.

**Важливий крок у розвитку адаптивного роботизованого зварювання.** WireSense надає відомості про висоту країв, що спрощує вимірювання контурів компонентів і повітряних зазорів. Під час введення роботизованої установки в експлуатацію на ній можна задати та зберегти параметри зварювання для повітряних зазорів різних розмірів, щоб потім, визначивши особливості конкретного компонента за допомогою WireSense, просто застосувати потрібний профіль. Без датчиків робота йде повільно, оскільки зварювальник боїться пропустити повітряний зазор чи якесь інше відхилення, через яке шов вийде недостатньо проплавленим. Завдяки попередньому точному визначенню таких відхилень роботизована установка з'єднує компоненти на оптимальній швидкості і цикл триває менше часу.

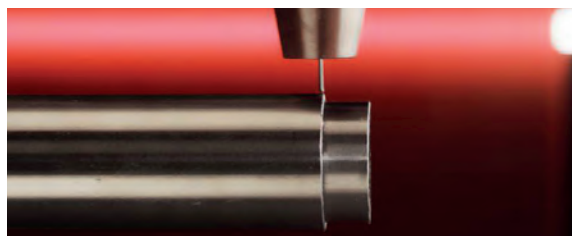
У такий спосіб нова технологія WireSense забезпечує точне розташування зварних швів за оптимізованими параметрами. Це дає змогу значно зменшити кількість остаточних візуальних перевірок, виправлень і доробок, а також знизити обсяг браку. Результатом стане значне заощадження часу та коштів.

**Вимоги.** Технологію WireSense можна використовувати з будь-якою зварювальною системою TPS/і від компанії Fronius, пристосованою до зварювання CMT. Механізм Robacta Drive CMT, встановлений просто на корпусі пальника, забезпечує точний рух дроту, що вкрай важливо. Завдяки гнучкій конфігурації зварювальної системи Fronius можна за першої ж нагоди модернізувати відповідним чином.

*За матеріалами прес-релізу компанії Fronius*



Використання дроту як датчика за новою технологією WireSense від Fronius



Дротовий електрод сканує компонент, визначаючи висоту і положення країв листа або труби