

**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

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

**ЗМІСТ**

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ**

*НЕДОСЕКА С.А., НЕДОСЕКА А.Я., БОЙЧУК О.І., ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А.* Особливості акустичної емісії при оцінці стану матеріалів .....3

*ГОПКАЛО О.П., БЕЗЛЮДЬКО Г.Я., КОТЛЯРЕНКО А.А., КУРАШ Ю.П., СОЛОМАХА Р.М.* Діагностування пошкодження феромагнітних сталей при механічному навантаженні по результатам вимірювання коерцитивної сили.....13

*РЕДЬКА М.О., КУЦ Ю.В., ЛЕВЧЕНКО О.Е., БЛИЗНЮК О.Д.* Метод виявлення сигналів вихрострумової дефектоскопії малої обчислювальної ресурсоемності.....22

**ВИРОБНИЧИЙ ВІДДІЛ**

*НЕДОСЕКА С.А., НЕДОСЕКА А.Я., ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А.* Службові властивості сталей 09Г2С, 14ХГС і сталі 20 після тривалого терміну експлуатації.....26

*ЮХИМЕЦЬ П.С., ЮРКО Л.Я., КОБЕЛЬСЬКИЙ С.В., КРАВЧЕНКО В.І.* Аналіз напівемпіричних залежностей для визначення концентрації напружень в об'ємних пошкодженнях на поверхні трубопроводу .....31

*КУЛІШ В.А., КРИЛОВ Е.С.* Контроль технічного стану несучих конструкцій металевих шахтних копрів в процесі їх експлуатації .....37

*ТРОЇЦЬКИЙ В.О., ЛИТВИНЕНКО В.А.* Спрощений моніторинг металокопунктур без зачистки їх поверхонь .....43

*БОНДАРЕНКО Ю.К., КОВАЛЬЧУК О.В.* Дослідження впливу джерел ризиків на технічну безпеку зварних конструкцій при експлуатації з використанням неруйнівного контролю та технічної діагностики .....49

*РАЗЫГРАЕВ Н.П.* Головные волны в ультразвуковой дефектоскопии металлов .....58

**ХРОНІКА**

**В.М. Учанін – Заслужений винахідник України!**.....71

**С.І. Кучуку-Яценку – 90!**.....72

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 Kasymyr 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  
in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration  
of KB 4787 dated 09.01.2001

**CONTENT**

**SCIENTIFIC AND TECHNICAL**

*NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A. Ya., BOICHUK O.I., YAREMENKO M.A., OVSIENKO M.A.* Features of acoustic emission at evaluation of the state of materials ..... 3

*GOPKALO O.P., BEZLYUDKO G. Ya., KOTLIARENKO A.A., KURASH Yu.P., SOLOMACHA R.M.* Diagnosis of damage to ferromagnetic steels during mechanical loading by results of measurements of coercive force ..... 13

*REDKA M.O., KUTS Yu.V., LEVCHENKO O.E., BLIZNYUK O.D.* Method to detect signals of eddy current flaw detection with small computer resource capacity ..... 22

**INDUSTRIAL**

*NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A. Ya., YAREMENKO M.A., OVSIENKO M.A.* Service properties of 09G2S, 14KHGS steels and Steel 20 after long-term operation ..... 26

*YUKHYMETS P.S., YURKO L.J., KOBELSKY S.V., KRAVCHENKO V.I.* Analysis of semi-empirical equations for determination of stress concentration in volumetric damages on pipeline surface ..... 31

*KULISH V.A., KRYLOV E.S.* Monitoring the technical state of load-carrying structures of metal shaft headgear in operation ..... 37

*TROITSKIY V.O., LITVINENKO V.A.* Simplified monitoring of metal structures without cleaning their surfaces ..... 43

*BONDARENKO Yu.K., KOVALCHUK O.V.* Investigation of the influence of risk sources on technical safety of welded structures in operation with application of nondestructive testing and technical diagnostics ..... 49

*RAZYGRAEV N.P.* Head waves in ultrasonic metal flaw detection ..... 58

**INFORMATION**

*V.M. Uchanin – Honored Inventor of Ukraine!* ..... 71

*S.I. Kuchuk-Yatsenko is 90!* ..... 72

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

## ОСОБЛИВОСТІ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ОЦІНЦІ СТАНУ МАТЕРІАЛІВ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, О.І. Бойчук, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко

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

На основі проведених досліджень сформульована гіпотеза, яка показує, що акустична емісія є дзеркальним відображенням, і, отже, акустичним паспортом характеристик матеріалів, що змінюються в процесі експлуатації, і, зокрема, їх механічних властивостей. Використання цієї гіпотези перевірено на практиці і дозволяє прогнозувати руйнівне навантаження матеріалу без зупинки експлуатації і без необхідності попереднього знання початкових значень механічних властивостей матеріалів. Відповідно до представленої гіпотези, АЕ відображає не самі властивості матеріалу, а їх зміну, і автоматично адаптується до таких змін, незалежно від типу матеріалу. Експерименти, проведені з численними матеріалами, що відрізняються своїми фізичними характеристиками, в тому числі сталлями різних класів, алюмінієвими сплавами, бетонами і композитами, показали, що граничне навантаження при руйнуванні цих матеріалів за даними АЕ визначається за однаковим алгоритмом з похибкою, пов'язаною лише з технічними особливостями засобів вимірювання. Накопичений досвід дозволив перейти до створення інтелектуальної технології оцінки стану матеріалів конструкцій при їх експлуатації і АЕ систем на її основі. Такі системи вже отримали широке застосування при безперервному моніторингу стану конструкцій у виробничих умовах. Бібліогр. 10, рис. 8.

*Ключові слова:* акустична емісія, прогнозування руйнівного навантаження, фізичні характеристики матеріалів, вектор стану матеріалу, пошкодженість, ресурс

Аналізуючи явище АЕ, що виникає при розвитку руйнування матеріалів, дослідники прийшли до висновку, що її виникнення пов'язане з швидкою перебудовою структури матеріалів у результаті їх деформації під впливом збуджуючих полів. Дані, отримані за допомогою АЕ, підтверджують цю залежність і дозволяють, як мінімум, якісно оцінювати зміни структури матеріалу. В матеріалі в процесі деформування або експлуатаційного напруження, причому одне не виключає іншого, виникають і накопичуються пошкодження<sup>1</sup>. На цей час оцінка пошкодженості використовується як в розрахунках міцності, так і в наближених якісних оцінках, де очікується зміна структури матеріалів під дією будь-яких силових або інших полів [1].

У зв'язку з тим, що дедалі збільшується обсяг застосування АЕ для оцінки стану матеріалів конструкцій, постає питання про більш жорстке нормування інформації АЕ, яка виникає під час розвитку руйнування. Сучасні способи подання АЕ інформації існуючою вимірювальною апаратурою вимагають оригінального підходу при її застосуванні і створення відповідних методик для того, щоб виділити з усього потоку АЕ інформації певну частину, яка характеризує розвиток руйнування і може бути нормована за цілком певними параметрами.

Багаторічні дослідження в цьому напрямку дозволили сформулювати такі параметри, дати

їм оцінку існуючими методами фізичного аналізу і застосувати при діагностичному контролі стану матеріалів конструкцій у процесі експлуатації. Різноманітні впливи на матеріал (механічні, теплові, хімічні та ін.) можуть призвести до досить швидких локальних змін його структури, що і є джерелом АЕ.

Слід особливо відзначити великий вплив на зміну структури матеріалів різних хімічних реакцій і мікрофізичних перетворень, що протікають у матеріалах конструкцій, викликаних впливом атмосфери або активністю продукту, що транспортується або зберігається у виробках з цих матеріалів. Наприклад, газ, що транспортується по трубопроводах, в результаті динаміки процесу складається з суміші різних компонентів, включаючи водень [1]. Атоми водню, що мають малі, в порівнянні з пустотами кристалічної решітки, розміри, проникають всередину матеріалу, де обмінюються енергією на поверхнях мікрodefектів, завжди наявних у матеріалі, і перетворюються на молекули, які мають значно більші, порівняно з атомом, розміри. Молекули газу поступово локально накопичуються в матеріалі, створюючи надмірний тиск і утворюючи порожнини, а потім і тріщини. Локальні напруження можуть перевершити міцність матеріалу в цьому місці, внаслідок чого відбувається різке зростання тріщини. Процес цей може повторюватися скільки

<sup>1</sup> Під пошкодженнями тут розуміються будь-які зміни в структурі матеріалів. Динамічну складову цих змін реєструє акустична емісія Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Бойчук О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-5800-1549>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>

завгодно довго до тих пір, поки тріщина не досягне розмірів, при яких почнеться руйнування трубопроводу.

Перераховані вище і багато інших чинників викликають зміну властивостей матеріалу конструкції, а АЕ є їх показником, дзеркальним відображенням або, іншими словами, акустичним паспортом його властивостей, в тому числі механічних, фізико-хімічних, і характеру навантаження. Найголовніше ж полягає в тому, що для оцінки стану матеріалу з використанням його акустичного паспорта не потрібно знати марку матеріалу, його геометричні розміри і характер навантаження. АЕ в даному випадку виступає як кількісна міра пошкодженості матеріалу незалежно від того, що це за матеріал.

На першому етапі досліджень щодо застосування АЕ для оцінки стану матеріалів на основі стандартів технічної діагностики була розроблена методика побудови параметрів АЕ, які можуть бути використані при створенні необхідних алгоритмів оцінки стану. На базі цієї методики була доопрацьована апаратура ЕМА-4 (Evaluation of Materials Ability), програмне забезпечення якої отримало маркування ЕМА-3.92 і дозволяє, після спеціальної обробки сигналів АЕ, отримати вектор стану матеріалу (ВСМ) більш широкого складу, різні комбінації якого будуються програмою автоматично в залежності від ситуації, що склалася у процесі руйнування. ВСМ включає наступні АЕ параметри.

Виміряні параметри:

1. Зовнішні силові поля:  $P$  – поточне навантаження, кг, або тиск, МПа;  $T$  – температура, °С.
2.  $A$  – максимальна амплітуда у групі подій АЕ за момент часу, що розглядається, дБ. Умовно характеризує об'єм дефекту, що утворився.
3.  $Rt$  – найбільший час зростання амплітуди до максимуму у групі подій АЕ за момент часу, що розглядається, мкс;  $W$  – найбільша тривалість події, мкс. Характеризує зміцнення матеріалу в процесі його деформування.
4.  $O$  – число осциляцій в події АЕ. Характеризує кількість пошкоджень, що виникли в даний момент часу.

Параметри, побудовані на базі виміряних:

5.  $Ac$  – сумарна амплітуда подій АЕ за час випробувань, дБ. Характеризує загальний об'єм пошкоджень, що утворилися.
6.  $Oc$  – сумарне число пошкоджень в матеріалі за проміжок часу, що розглядається, що визначається за сумою осциляцій подій АЕ.
7.  $Nc$  – накопичені в процесі руйнування події АЕ. Характеризують загальне число пошкоджень,

що виникли за проміжок часу, що розглядається; може не збігатися з  $Oc$ .

8.  $A^2$  – характеризує енергію, витрачену на утворення дефекту, Дж.

9.  $Ac^2$  – характеризує сумарну енергію АЕ, витрачену на руйнування, Дж.

10.  $N$  – сума подій АЕ у даний момент часу. Характеризує число дефектів, що виникли у даний момент часу; може не збігатися з  $Oc$ .

11.  $X, Y$  – усереднені з заданою ймовірністю координати суми подій, що виникли в даний момент часу на певній ділянці зразка або конструкції, мм. Розмір ділянки задається автоматично в залежності від розмірів об'єкта контролю та схеми розташування датчиків АЕ.

Дослідження, які передбачають отримання акустичних паспортів (раніше – «портретів») матеріалів на стадіях руйнування, починаючи від старту тріщини і закінчуючи повним поділом матеріалу на частини, були розпочаті авторами ще в 90-ті роки за участю фахівців Інституту проблем міцності НАН України ім. Г.С. Писаренка. У відділі статичної міцності акад. А.А. Лебедевим та проф. М.Г. Чаусовим був розроблений метод отримання повних діаграм деформування з використанням жорсткого навантаження зразків<sup>2</sup>. Жорсткість навантаження, на відміну від такої для стандартних розривних машин (близько 3 т/мм), відрізнялася істотно (до 18 т/мм). Це дозволило відстежувати стадійність виникнення і зростання тріщини аж до повного руйнування. Застосування при таких випробуваннях методу АЕ дозволило досягти суттєвих результатів щодо встановлення зв'язку параметрів АЕ зі стадійністю руйнування.

Випробування проводили на круглих малогабаритних зразках довжиною від 80 до 200 мм з діаметром різьбової захватної частини 14 мм і різними типами концентраторів – круговими виточками радіусом 5, 10 і 20 мм, кутовими виточками 45, 90 та 120°, а також гладкими, без концентратора.

На рис. 1, *a* узагальнено показано поведінку АЕ на різних стадіях руйнування. Такі дані характерні для ряду сталей, включаючи сталь 3, сталь 20, 15Х2МФА, мартенситно-старіючу сталь ВНС25, алюмінієвих сплавів типу АМц і ряду інших матеріалів [2]. Представлена тільки заключна частина діаграми деформування, починаючи від моменту досягнення межі міцності в точці В. Суцільна крива деформування  $P$  закінчується в точці К, яка відповідає моменту старту тріщини за механізмом в'язкого відриву. Далі відбувається перехід до в'язкого зсуву (точка *a*) і потім до змішаного механізму відриву і зсуву (точка *b*). Крива деформування на стадії росту тріщини показана пунктиром.

<sup>2</sup> Жорстке навантаження характеризується постійною, рівномірною, незалежною від навантаження деформацією матеріалу при його розтягуванні аж до руйнування.

На рис. 1 представлені схематично два параметра АЕ, які реєстрували на заключних стадіях деформування:  $A$  – обвідна амплітуд подій дискретної АЕ;  $A_v$  – неперервна АЕ, що має характер постійного шуму. Чітко видно, що зміни дискретної АЕ відповідають зміні механізмів руйнування. Перший пік  $A_1$  виникає в момент старту тріщини і закінчується при переході до зсуву, другий пік  $A_2$  виникає при переході до змішаного механізму і закінчується незадовго до руйнування. Неперервна АЕ ( $A_v$ ), починаючи від точки В і до закінчення другого піку  $A_2$ , є умовно постійною. Остаточне руйнування характеризується стрибкоподібним її ростом ( $A_v+$ ). Фактично, отриманий узагальнений портрет АЕ при руйнуванні ряду матеріалів. У той же час, випробування кожного конкретного зразка або конструкції мають свої особливості в величинах параметрів  $A$  і  $A_v$  і їх розподілу в часі. Дане дослідження показало, що як мінімум на заключних стадіях деформування можна отримувати «акустичні паспорти» для досліджуваних матеріалів.

Відзначимо також ряд цікавих ефектів, пов'язаних з впливом пластичності матеріалів на заключ-

ні ділянки діаграм деформування і відповідну їм АЕ. В міру окрихчування матеріалу і вичерпання ним пластичних властивостей низхідна ділянка діаграм деформування стає все коротшою. Число подій АЕ відповідно зменшується, піки амплітуд стають більш вираженими, величина амплітуд подій АЕ для того ж самого матеріалу зростає (див. рис. 1, б, в). Зрештою, для матеріалів, руйнування яких є повністю крихким, заключну частину діаграми не вдається отримати навіть при максимально використаній в даній серії експериментів жорсткості випробувальних машин. На пружній висхідній ділянці такої діаграми події АЕ, як правило, не реєструються аж до руйнування при використанні малогабаритних зразків. Руйнування ж супроводжується єдиною подією АЕ високої потужності, після чого відразу ж відбувається стрибок неперервної АЕ (рис. 1, в).

Встановлено, що АЕ на заключних стадіях деформування чітко відображає, якісно і кількісно, властивості випробуваних матеріалів, реагуючи на жорсткість навантаження, тип концентратора і пластичні властивості матеріалів. У роботі [2] по-

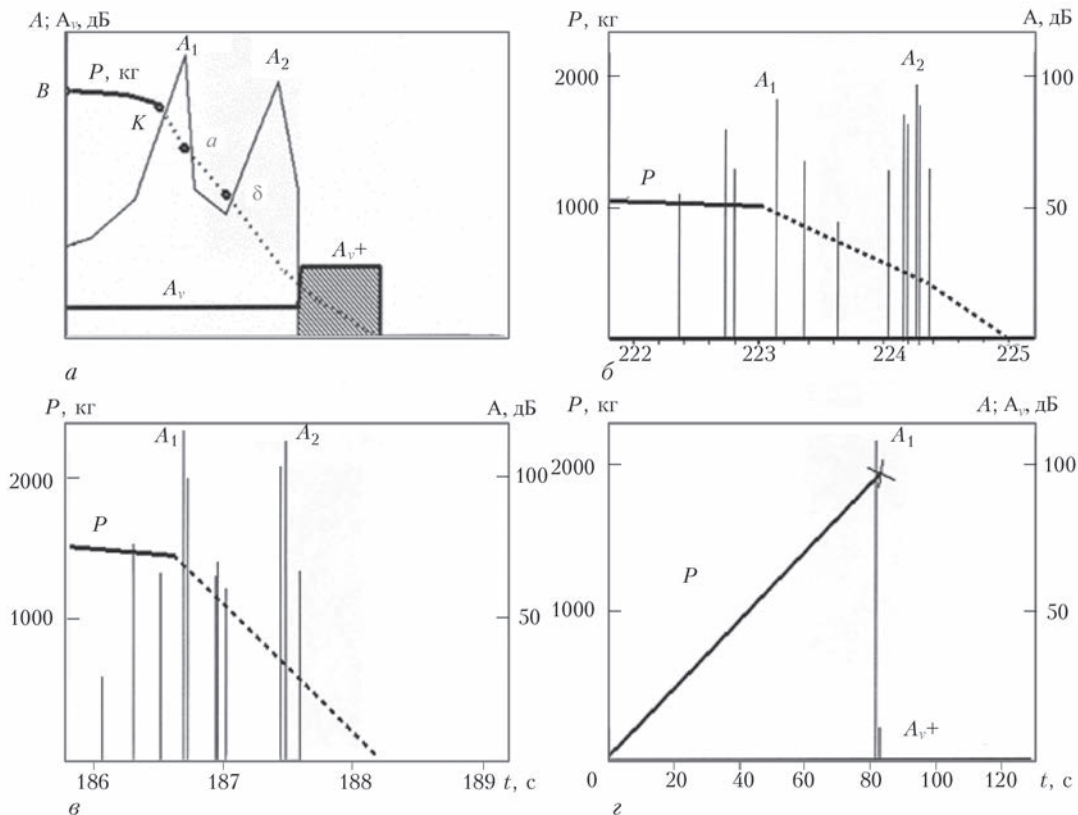


Рис. 1. Зміна параметрів АЕ, що реєстрували на заключних стадіях деформування: а – типовий розподіл у часі АЕ на стадіях виникнення і зростання тріщини, зіставлений з завершальною частиною повної діаграми деформування; далі типові розподілу АЕ у часі в залежності від навантаження при випробуваннях зразків з круговою виточкою  $R = 5$  мм; б – корпусна сталь 15Х2МФА у стані, що використовується в корпусах реакторів (КП60); в – ця ж сталь після спеціальної термообробки (КП100), що імітує радіаційне окрихчування внаслідок експлуатаційного напруження реактора<sup>3</sup>; з – інструментальна сталь 65Г, загартована до HRC 60

<sup>3</sup> Корпусна сталь 15Х2МФА в стані, що використовується в корпусах реакторів і після спеціальної термообробки, що імітує радіаційне окрихчування внаслідок експлуатаційної напруження, була надана у вигляді заготовок для зразків підприємством ОКБ «Гидропресс» (Подольск, РФ), який розробляв рішення для атомної енергетики.

казано і описано відповідними рівняннями багато залежностей такого роду. З огляду на те, що всі їх не можливо показати в рамках однієї статті, зупинимося на одній з найбільш важливих. Амплітуда піку подій дискретної АЕ, приведена до відносного звуження шийки зразка в момент старту тріщини, корелює з коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K_{lc}$  (рис. 2). Оскільки в проведених дослідженнях використовували повні діаграми деформування, в якості аналогу  $K_{lc}$  використовували параметр  $K_p$ , що добре корелює з ним, який визначається за параметрами низхідних ділянок повних діаграм деформування зразків [3] за формулою  $K\lambda = \frac{S_K l_p E}{2(1-\psi_K)}$ , де  $S_K$  – площа поперечного перерізу зразка в момент старту тріщини;  $\Delta l_p$  – відносне подовження;  $E$  – модуль пружності;  $\psi_K$  – відносне звуження шийки зразка.

Залежності, подібні показаним на рис. 2, були отримані і для низки інших металів. Вибір сталі 15Х2МФА в даному випадку показовий тим, що найбільший обсяг даних, включаючи варіювання пластичними властивостями і типами концентраторів напружень, був отриманий саме для цього матеріалу.

Показані на рис. 1, 2 дані, по-перше, дають переконливе підтвердження чіткого взаємозв'язку між зміною механічних властивостей матеріалів і АЕ; по-друге, дозволяють говорити про можливе кількісне використання даних АЕ для оцінки стану матеріалів.

Слід ще раз зробити акцент на тому, що АЕ відображає не механічні властивості матеріалу як такі, а їх динамічну зміну, викликану пошкоджуваністю матеріалу, незалежно від причини пошкоджень.

Природно, для конструкцій, що знаходяться в експлуатації, важливо не допустити переходу до заключної стадії деформування, що супроводжується зростанням тріщини і подальшим руйнуванням. У зв'язку з цим дослідження початкових стадій накопичення пошкоджень як на зразках, так і на конструкціях, являє собою вкрай важливе завдання. Розпізнавання небезпечного ступеня пошкоженості конструкцій при дотриманні коректних умов переходу може бути виконано, по-перше, за дани-

ми випробувань зразків, по-друге, на основі математичних моделей накопичення пошкоджень. Можливе використання обох підходів одночасно з вибором з отриманих результатів найбільш небезпечного.

Якщо зібрати на єдиному графіку перераховані вище вимірювані і похідні від них параметри АЕ, зіставивши їх з кривою навантаження, можна отримати візуальне уявлення про те, що являє собою акустичний паспорт матеріалу.

На рис. 3 представлена типова картина АЕ, що виникла в матеріалі зразка, в даному випадку зі сталі Х18Н9, що випробовувався на розтяг в машині з жорстким навантаженням.

Графік на рис. 3 містить практично всю необхідну інформацію щодо характеру процесу руйнування сталі Х18Н9, що використовується в розрахунку руйнівного навантаження та залишкового ресурсу матеріалу. Досить наочно показано нерівномірний розвиток руйнування протягом всього періоду деформування зразка. Видно, як зростає кількість пошкоджень (на графіку – синя крива), як змінюється жорсткість матеріалу в місці виникнення пошкоджень (на графіку – стовпчики бузкового кольору). Наочно видно умовний об'єм дефектів, що виникають (стовпчики зеленого кольору). Також наочно представлені координати дефектів, що виникають (точки чорного кольору). Вся інформація представлена на фоні зростаючого до межі міцності, а потім падаючого після старту тріщини випробувального навантаження (крива червоного кольору) [4, 5].

Являючи собою акустичний паспорт, що дзеркально відображає зміни стану матеріалу конструкцій, АЕ має серйозні переваги в оцінці його стану, оскільки дозволяє прогнозувати руйнівне навантаження матеріалу в процесі експлуатації без необхідності попереднього знання початкових значень його механічних властивостей. АЕ автоматично адаптується до його властивостей, що змінюються, незалежно від типу матеріалу. Багаторічні експерименти, проведені з численними матеріалами, що відрізняються своїми фізичними характеристиками, в тому числі різними металами, бетонами, як і дослідження деяких композитів [6], показали, що граничне навантаження при руйнуванні цих матеріалів за даними АЕ визначається за одним і тим самим алгоритмом з похибкою, що пов'язана лише з можливостями засобів вимірювання.

Накопичений досвід дозволив перейти до створення інтелектуальної технології оцінки стану матеріалів конструкцій при їх експлуатації (SHM – Structural Health monitoring) і АЕ систем на її основі. Такі системи вже отримали широке застосування при безперервному моніторингу стану конструкцій у виробничих умовах [7–9].

Для створення такої технології потрібні були спеціальні аналітичні розробки, які, поряд з ек-

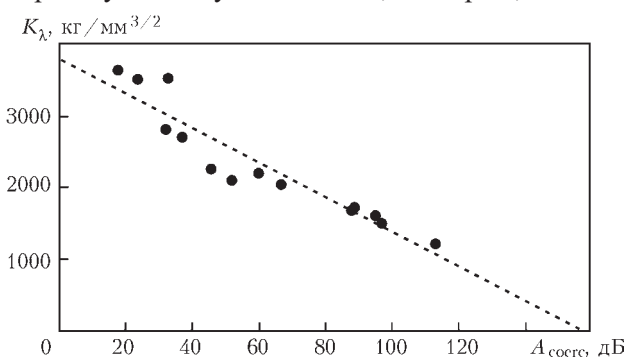


Рис. 2. Приклад кореляції зведених до площі зразка амплітуд АЕ в момент старту тріщини  $A_{sorp}$  з аналогом коефіцієнта інтенсивності  $K_\lambda$  для сталі 15Х2МФА

периментальною інформацією, що надходить з контрольованої конструкції, дозволять зв'язати параметри хвиль АЕ, що виникають в матеріалі, з його поточним станом.

Для аналітичного розв'язання даної проблеми найбільш прийнятним є метод розпізнавання образів (Pattern Recognition Principles), широко застосовуваний при створенні робочих алгоритмів і програм в обчислювальній техніці. Перевага методу полягає у відсутності необхідності використання в розрахунках для контрольованих матеріалів фізичних постійних, що мають широкий спектр значень. При оцінці технічного стану конструкцій це призводить до суттєвого зменшення похибок оцінок у порівнянні з розрахунковими методами.

Методів розпізнавання образів існує досить багато. У використовуваній тут технології вибраний метод найменшої відстані між центроїдами гіпереліпсоїдів (відстань Махаланобіса – Mahalanobis distance), що побудовані на даних подій АЕ і знаходяться в області з постійною щільністю розподілу. Метод виявився найбільш прийнятним, хоча і будувався в n-вимірному просторі, який визначається великою кількістю параметрів, що характеризують подію АЕ, які були зведені в спеціальний ВСМ. Квадрат такої відстані  $r^2$  на малому проміжку часу зміни образу ВСМ можна представити:

$$r_{i,j}^2 = (x_i - m_j)'C^{-1}(x_i - m_j),$$

де  $x_i$ ,  $x_j$  – i-те та j-те значення вектора ВСМ або АЕ подій в точках вимірювання;  $C^{-1}$  – обернена коваріаційна матриця сукупності образів.

Розглядається процес поелементно і приймається як міра подібності, якщо присутні статистичні характеристики всіх образів. У деяких випадках цю формулу зручно представити у вигляді квадрата відстані між математичними очікуваннями зафіксованих подій АЕ, що розглядаються в створених на їх основі кластерах.

$$r_{i,j}^2 = (m_i - m_j)'C^{-1}(m_i - m_j),$$

де  $m_i$ ,  $m_j$  – математичні очікування сукупностей ВСМ (кластерів), побудованих для різних значень АЕ;  $C^{-1}$  – обернена коваріаційна матриця сукупності образів. Приймається однаковою для всіх образів.

Зазначена методика дозволила побудувати на основі безперервного моніторингу алгоритм оцінки стану матеріалу конструкцій в процесі їх експлуатації. На рис. 4 представлена блок-схема роботи обчислювальної системи при прийнятті рішення щодо стану конструкції.

Як видно на рис. 4, повний пакет інформації щодо стану матеріалу (в даному випадку трубопроводів) надходить в обчислювальний блок, де обробляється з виділенням істотних параметрів

за ваговими характеристиками. Далі створюється основний розрахунковий блок ВСМ, що надходить в блок вчителя. У цьому блоці відбувається порівняння основного блоку інформації, що надійшла, з еталонами стану. При появі нев'язки інформація передається в блок самонавчання, де коригується попаданням в діапазон помилок  $\pm 15\%$  при ймовірності оцінок 0,95. Скориговані результати направляються в блок мінімакса для вибору рішення.

У розроблених алгоритмах для діагностичних систем ЕМА вирішення завдання прогнозу являє собою послідовність кроків з обробки початкової вимірюваної інформації, подібної до наведеної на рис. 3, з метою встановлення ступеня небезпеки та оціночного розрахунку руйнівного навантаження із заданою достовірністю, а потім на базі цих даних отримання кількісних показників пошкодженості і межі міцності матеріалу контрольованого об'єкту. Інформація щодо оцінки стану матеріалу відображується у кольоровому та кількісному вигляді на індикаторах небезпеки.

Результат прийнятого щодо стану матеріалу рішення передається у діагностичний центр підприємства і головної контролюючої організації, де відбувається автоматичний загальний аналіз і фіксування стану конструкції, оцінюється її залишковий ресурс і видаються рекомендації щодо можливої подальшої її експлуатації із зазначенням найбільш небезпечних ділянок. Оцінка стану конструкції може здійснюватися незалежно від того, де вона розташована. Інформація щодо її стану по мережі інтернет завжди може передаватися в головний діагностичний центр (рис. 4) безперервно або з певною періодичністю, встановленою відповідною нормативною документацією.

Прогноз руйнівного навантаження, ступеня пошкодженості і залишкового ресурсу матеріалу визначаються автоматично з використанням наведеної вище методики. На рис. 5 показані два моменти зняття інформації при випробуваннях трубопроводу гарячого промперегріву пари (сталь 15X1M1Ф) системою АЕ моніторингу, встановленої на одній з теплових станцій. Це типовий приклад SHM технології в дії. Для оператора системи інформація щодо пошкодженості і ресурсу об'єкта контролю не потрібна, але ці дані зберігаються і, за необхідністю, можуть бути затребувані в будь-який момент. Як правило, вони потрібні фахівцям в області міцності для вирішення питання про подальше подовження терміну експлуатації виробу. Проте, має сенс пояснити, як саме розраховується пошкодженість. Для цього потрібне знання поточного навантаження і прогнозу руйнівного навантаження. Трубопровід працює при навантаженні 22 ат. На рис. 5 представлені значення прогнозу руйнівного навантаження для трьох локаційних

антен. Для перших двох, показаних на екрані, прогнозоване руйнівне навантаження знаходиться в межах 77,9...89,6 ат., для третьої, якій відповідає помаранчевий індикатор небезпеки 2 рівня «Підвищити увагу», – 46,8...53,8 ат.

Оціночна пошкодженість, яку позначимо як  $\Delta W$ , для перших двох антен складе, якщо використовувати нижню, більш критичну межу прогнозного навантаження:

$$\Delta W = 22/77,9 \times 100 = 28,2 \%. \text{ Для третьої антени } \Delta W = 22/46,8 \times 100 = 47 \%.$$

У фахівців, що займаються питаннями пошкодженості, неодноразово виникало питання, яке саме значення пошкодженості слід вважати критичним і неприпустимим для конкретного матеріалу або конструкції. Відповідь на це питання можна отримати при використанні методу АЕ. Зокрема, для того, щоб відповісти на питання, чи є величина пошкодженості 47 %, як найбільша з отриманих при вимірюваннях, критичною з точки зору міцності матеріалу контрольованого трубопроводу, необхідно випробувати зразок з такого ж матеріалу за умов, близьких до його реальної експлуатації в трубах. На рис. 6 наведені на екрані програми ЕМА результати випробування такого зразка при температурі 560 °С. Детально елементи і можливості програми описані в роботі [10]. В даному випадку слід сконцентрувати увагу на індикаторі прогнозу руйнування (Destruction forecast) у верхній частині вікна, який показує червоним кольором, що матеріал досяг критично небезпечно-го стану, а представлені на ньому прогнозні значення руйнівного навантаження 5091,7...6289,7 кг відповідають реальному руйнівному навантаженню 6033 кг (червона лінія на графіку праворуч). Праворуч від індикатора на сірому фоні показаний відповідний прогнозному навантаженню результат розрахунку пошкодженості (Damage). Як бачимо, критичні значення пошкодженості для втрати міцності матеріалу складають 95...100 %.

Якщо порівняти результат даного випробування з отриманими даними для трубопроводів, то при пошкодженості 47 % матеріал найбільш пошкодженого трубопроводу має фактично дворазовий запас по міцності. Таким чином, запропоновано метод для оцінки того, яке саме кількісне значення пошкодженості можна вважати критичним для даного матеріалу. Дані, що отримуються таким методом, мають значну цінність при оцінці стану матеріалу діючих конструкцій. Особливо важливо, що для їх отримання потрібне знання лише поточного навантаження і вимірних параметрів АЕ.

Далі слід приділити увагу питанню визначення залишкового ресурсу матеріалу конструкцій. Запропоновано простий і зрозумілий метод для його розрахунку. На основі обчисленого за наве-

деним вище алгоритмом руйнівного навантаження визначають ступінь пошкодженості матеріалу на момент контролю, а потім за цими даними з використанням номограми (рис. 7) визначають залишковий ресурс. Представлена на рис. 7 номограма отримана на підставі декількох сотень повторених п'ятьма незалежними методами випробувань різних матеріалів з накопиченими в результаті експлуатації дефектами і накопиченням в них пошкоджень [9]. Розглянемо спосіб визначення залишкового ресурсу більш докладно. На номограмі пошкодженість виражена не у відсотках, а в вигляді шкали від 0 до 1, де  $\Delta W_{сер} = 1$  відповідає пошкодженості 100 %.

Залишковий ресурс  $t_{зал}$  виражений в роках. Точки, нанесені на номограму, є частиною експериментальних даних, на підставі яких була отримана основна лінія тренду для визначення ресурсу, і показані для того, щоб підтвердити їх точну відповідність наведеній кривій, яка пов'язує ресурс з пошкодженістю.

Для визначення залишкового ресурсу за відомою пошкодженістю слід відкласти на осі абсцис значення пошкодженості, вираженої за шкалою від 0 до 1, потім провести вертикальну лінію до перетину з кривою. Отримавши точку перетину, необхідно провести горизонтальну лінію вліво до перетину з віссю ординат. Отримане значення ординати і буде шуканим залишковим ресурсом.

З номограми, для прикладу, можна побачити, що пошкодженість 0,13 відповідає залишковому ресурсу  $\approx 60$  років, а 0,5 – залишковому ресурсу  $\approx 20$  років.

Слід чітко вказати, що номограма є осередненою, саме тому параметр пошкодженості вказаний як  $\Delta W_{сер}$ , а отриманий за її допомогою залишковий ресурс – оціночним. Проте, запропоновано достатньо ефективний спосіб оцінки ресурсу, який ґрунтується на досить великому обсязі експериментальних даних. Більш ефективним представляється тільки прямий спосіб оцінки – дочекатися руйнування конструкції, але він вимагає багатьох років очікування, а сам факт руйнування конструкції навряд чи задовольнить підприємство, що її експлуатує.

Вперше автоматизований розрахунок залишкового ресурсу був реалізований на Одеському припортовому заводі (ОПЗ) у вигляді спеціалізованого програмного забезпечення для сховищ рідкого аміаку типу ST. Розрахунок проводиться двома різними методами, один з яких використовує номограму (див. рис. 7), а другий – лінію тренду, що залежить від зміни прогнозного руйнівного навантаження. Остаточний варіант оціночного ресурсу видається за найменшим з результатів розрахунку. Вікно відповідної програми представлено на



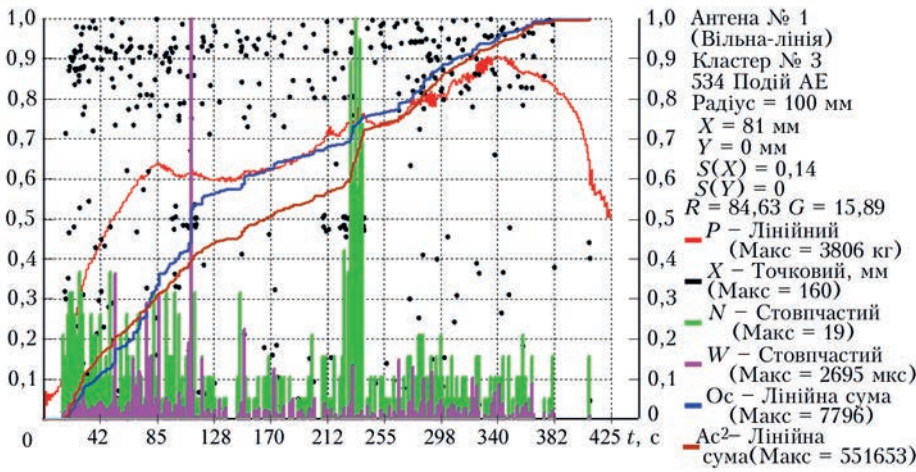


Рис. 3. Розподіл АЕ інформації в зразку зі сталі X18H9, отриманою приладом ЕМА-3 і обробленою програмою ЕМА-3.92 у всьому об'ємі зразка в залежності від часу. Область контролю 0...160 мм включає різьбові з'єднання в захватах розривної машини.  $S(X)$  – помилка визначення координати  $X$ , мм. Кількісні значення навантаження  $P$  і АЕ параметрів визначаються шляхом множення їх максимальних величин (зазначені в дужках у таблиці з правого боку графіка) на значення відносної величини на осі ординат

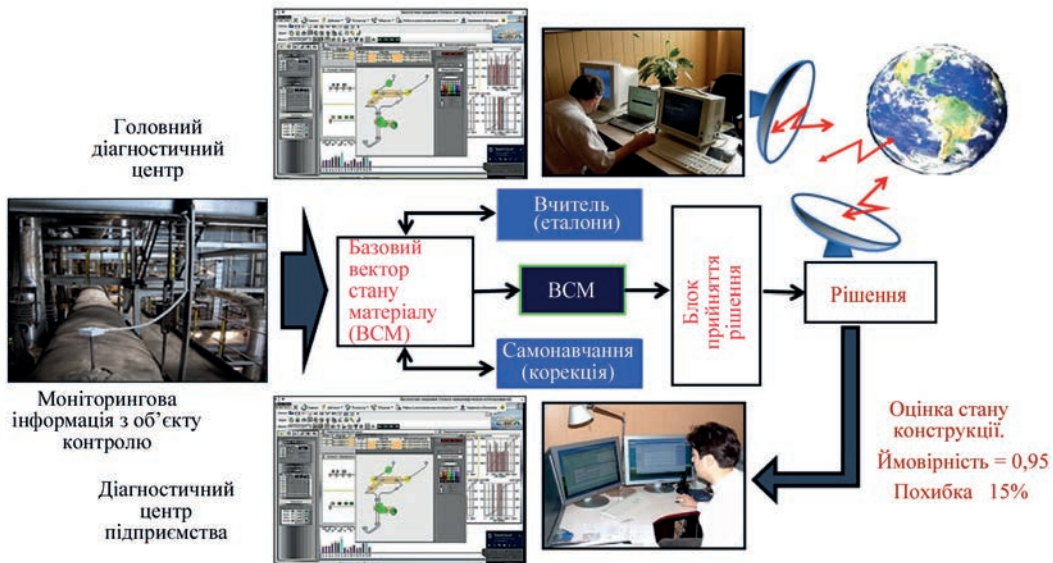


Рис. 4. Система управління безпекою експлуатації трубопроводу гарячого промперегріву пари типової теплоелектростанції

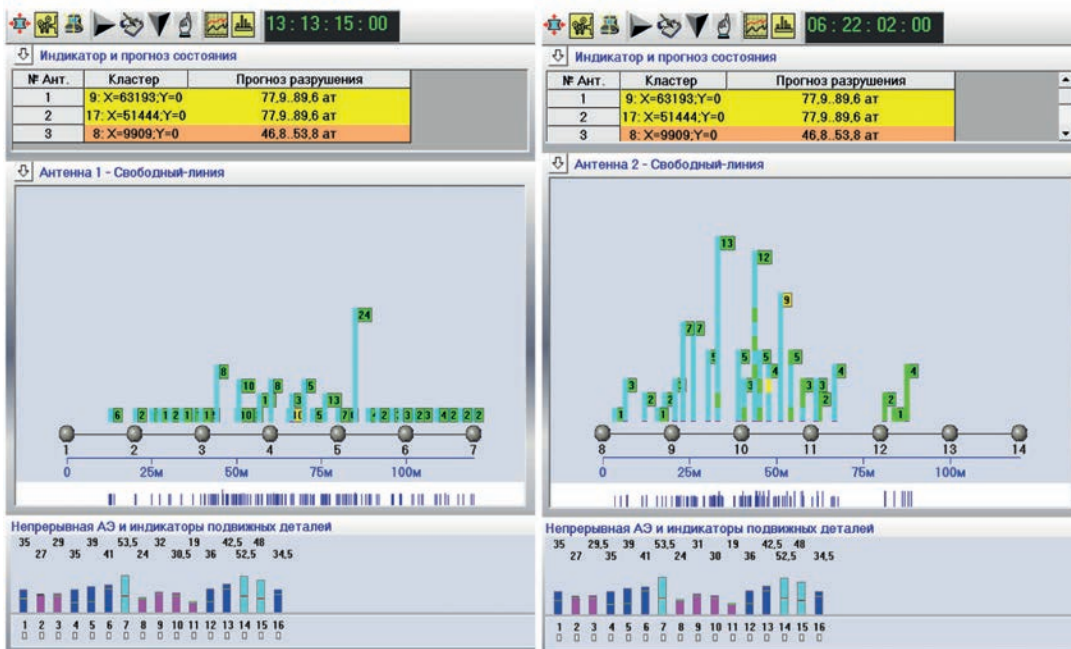


Рис. 5. Стан АЕ активності двох ниток трубопроводу в робочому стані через 13 год. 13 хв. (антена 1) і 6 год. 22 хв. (антена 2) з моменту початку контролю. У верхній частині екранів представлені індикатори небезпеки у вигляді таблиці прогнозованого граничного навантаження. Кольором відображено ступінь небезпеки. Індикатор пошкодженості не показаний

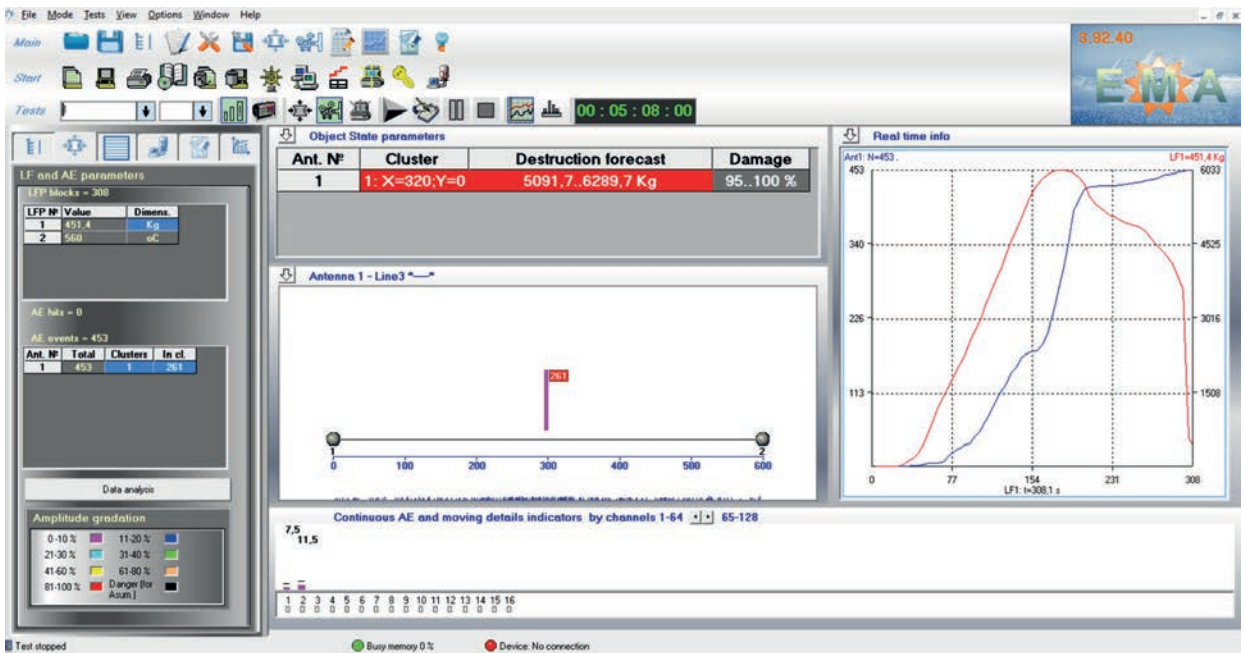


Рис. 6. Вікно програми EMA з результатами випробування зразка зі сталі 15X1МФ при температурі 560 °С

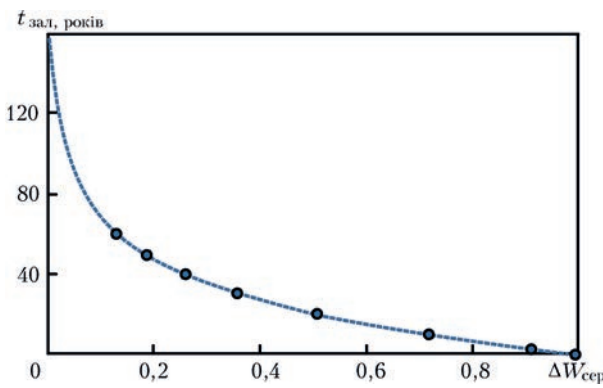


Рис. 7. Номограма для визначення залишкового ресурсу за відомою пошкодженістю

рис. 8. Вгорі розташовані дані по розрахунковому ресурсу і графіки його зміни для кожного зі сховищ, внизу – розгортка поверхні із зазначенням рівня наливу і ділянок акустичної активності. У самому низу стовпчиками позначені значення неперервної АЕ по кожному з вимірювальних каналів. Така програма-інтегратор дозволяє кваліфікованим фахівцям відразу на одному екрані отримувати повну інформацію про стан чотирьох резервуарів, контрольованих у режимі постійного моніторингу.

Резюмуючи представлені результати, слід підкреслити, що метод АЕ у поєднанні з кіне-

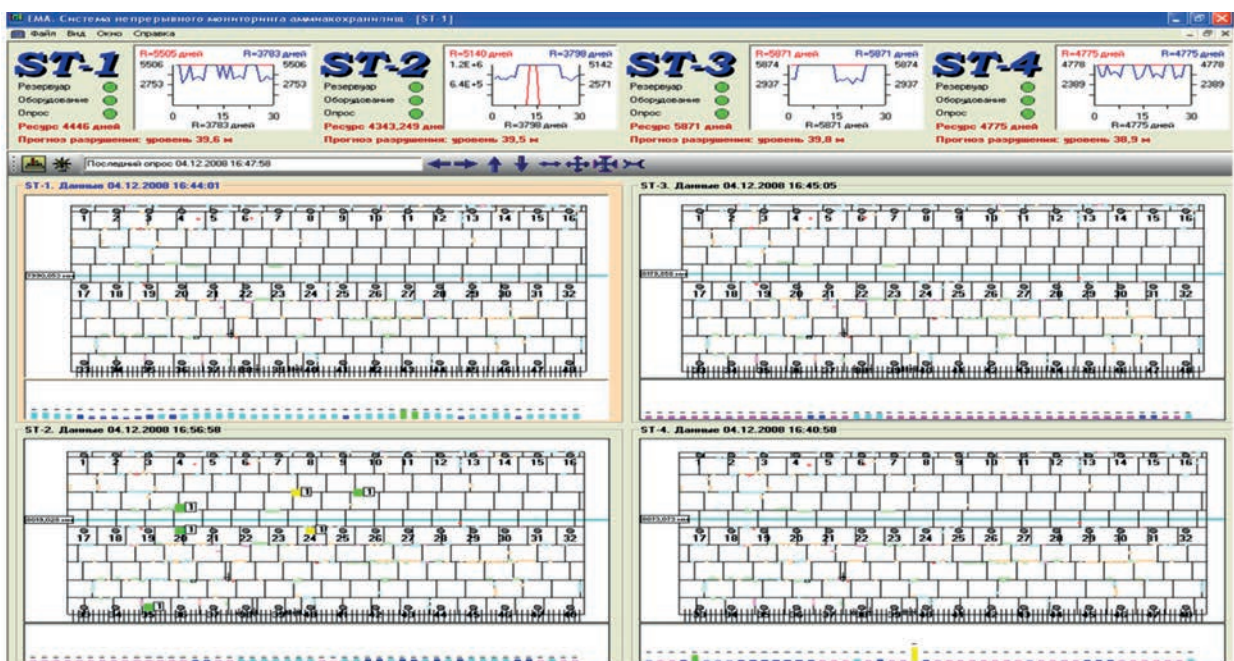


Рис. 8. Вікно програми-інтегратора для сховищ рідкого аміаку ОПЗ з результатами розрахунку залишкового ресурсу

тичним підходом до оцінки накопичення пошкоджень і розвитку руйнування доповнений алгоритмами розпізнавання образів, дає незаперечні переваги перед іншими неруйнівними методами контролю стану матеріалів. Отримуючи в реальному часі акустичний паспорт матеріалу, АЕ дозволяє прогнозувати руйнівне навантаження і залишковий ресурс конструкцій в процесі експлуатації, навіть якщо невідомі матеріал, з якого конструкція виготовлена, його механічні та фізико-хімічні властивості і час експлуатаційного напрацювання. З цієї точки зору метод АЕ видається оптимальним в якості основи для SHM технології, особливо при безперервному моніторингу діючих конструкцій.

На закінчення відзначимо, що ще задовго до виникнення в останні кілька років терміну SHM, а саме з 2001 р., системи безперервного АЕ моніторингу з можливостями оцінки стану матеріалу, розроблені за участю ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, впроваджені в Україні в хімічній і енергетичній галузях [8, 9] і продовжують успішно функціонувати на протязі багатьох років, що говорить про наявність безперечного пріоритету України у розвитку даної технології.

## Висновки

Запропонована гіпотеза щодо акустичного відображення фізичних властивостей матеріалів, що змінюються в процесі експлуатації.

Гіпотеза може бути сформульована як «акустичний паспорт матеріалів».

Отримані раніше експериментальні дані на різних матеріалах, в першому наближенні, підтверджують запропоновану гіпотезу.

Висунута гіпотеза дозволяє за однаковим алгоритмом оцінювати стан різних матеріалів, а саме прогнозувати руйнівне навантаження і, відповідно, пошкодженість, без необхідності попереднього знання поточних фізико-механічних властивостей матеріалу, оскільки АЕ автоматично адаптується до змін, викликаних пошкодженістю матеріалу, незалежно від його типу.

Запропоновано метод для визначення за даними АЕ критичної пошкодженості матеріалу і використання значень критичної пошкодженості для оцінки залишкового ресурсу.

Гіпотеза щодо АЕ як акустичного паспорту матеріалу, запропоновані в її рамках методи визначення пошкодженості і залишкового ресурсу використані при АЕ контролі зразків і конструкцій зі сталей та композитних матеріалів.

## Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: монографія. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.

2. Недосека С.А. (1994) *Исследование кинетики разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев.
3. Чаусов Н.Г. (1992) *Кинетика разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования*: автореф. дис. ... д-р техн. наук. Киев.
4. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашова Л.И. и др. (2018) Исследование методом акустической эмиссии кинетики накопления повреждений при разрушении материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 3–13.
5. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашова Л.И. и др. (2017) О накоплении повреждений в материалах. *Там же*, **3**, 3–13.
6. Nedoseka, S., Nedoseka, A., Shevtsova, M. (2019) Acoustic Emission Testing of Composite Materials Including Specimens Simulating the Embedded Sensors. *Civil Eng Res J*. 2019; 9(1): 555754. DOI: 10.19080/CERJ.2019.09.555754.
7. Васильев О.С., Грузд А.А., Йолкин А.О. та ін. (2012) 10-річний досвід впровадження безперервного акустико-емісійного моніторингу сховищ аміаку Одеського припортового заводу. *Хімічна промисловість України*, **3**, 43–52.
8. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2018) On the application of AE technology in continuous monitoring of pipelines of power units operating at high temperatures. *International Journal of Condition Monitorin*, **8**.
9. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 9–16.
10. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9. *Там же*, **3**, 16–22.

## References

1. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) Fundamentals of design and diagnostics of welded structures: Monography. 5th Ed. by B.E.Paton. Kiev, Indprom [in Russian].
2. Nedoseka, S.A. (1994) Investigation of the kinetics of metal fracture at final stages of deformation by acoustic emission method. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kiev [in Russian].
3. Chaусov, N.G. (1992) Kinetics of metal fracture at final stages of deformation. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kiev [in Russian].
4. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I. et al. (2018) Investigation by acoustic emission method of the kinetics of damage accumulation at fracture of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 3-13 [in Ukrainian].
5. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I. et al. (2017) Accumulation of damages in materials during fracture. *Ibid.*, **3**, 3-13 [in Ukrainian].
6. Nedoseka, S., Nedoseka, A., Shevtsova, M. (2019) Acoustic emission testing of composite materials including specimens simulating the embedded sensors. *Civil Eng. Res. J.*, 9(1):557754. DOI: 10.19080/CERJ.2019.09.555754.
7. Vasiliev, O.S., Gruzd, A.A., Jolkin, A.O. et al. (2012) Ten year experience of introduction of continuous acoustic emission monitoring in ammonia storage facilities at Odessa Port Plant. *Khimichna Promyslovist Ukrainy*, **3**, 43-52 [in Ukrainian].
8. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2018) On the application of AE technology in continuous monitoring of pipelines of power units operating at high temperatures. *Int. J. of Condition Monitoring*, **8**.
9. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 9-16 [in Russian].
10. Nedoseka, A.Ya. (2013) Software of AE diagnostic systems ЕМА-3.9. *Ibid.*, **3**, 16-22 [in Russian].

## FEATURES OF ACOUSTIC EMISSION AT EVALUATION OF THE STATE OF MATERIALS

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, O.I. Boichuk, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko

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

Conducted investigations were the base to formulate a hypothesis, which shows that acoustic emission is a mirror reflection, and, therefore, an acoustic certificate of material characteristics that change in operation, and, in particular, of their mechanical properties. Use of this hypothesis was verified in practice and allows prediction of breaking loading of the material without interrupting the object service and without the need to have prior knowledge of initial values of mechanical properties of the materials. In keeping with the presented hypothesis, AE reflects not the properties of the material proper, but their change, and it automatically adapts to such changes, irrespective of material type. Experiments, conducted with numerous materials, differing by their physical characteristics, including steels of different classes, aluminium alloys, concretes and composites, showed that limit breaking load of these materials by AE data is determined by the same algorithm with an error related just to the technical features of the measurement instruments. Accumulated experience allowed moving over to creation of an intelligent technology for assessment of structure material state in operation, and of AE systems based on it. Such systems have already become widely used at continuous monitoring of the state of the structure in production environment. 10 Ref., 8 Fig.

*Keywords: acoustic emission, prediction of breaking load; physical characteristics of materials, vector of material state; damage, resource*

Надійшла до редакції 25.01.2020

### Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд

(цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України)

На виконання постанови Президії НАН України від 16.12.2015 № 293 «Про виконання цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс») в 2016 – 2020 рр. науковими установами НАН України було проведено дослідження за наступними темами:

- розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки та авіакосмічної техніки;
- розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації;
- розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації;
- розробка ефективних методів оцінки та подовження ресурсу об'єктів атомної енергетики;
- підвищення надійності та продовження ресурсу енергетичного обладнання і систем;
- створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості;
- підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій;
- розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки з метою подовження терміну їх експлуатації;
- матеріали з подовженим ресурсом роботи для екстремальних умов експлуатації.

Мета програми – розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації технологічно та екологічно небезпечних об'єктів.

За результатами програми буде видано збірку «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», яку можна замовити в редакції журналу.

Архів збірок за програмою «Ресурс» за 2006, 2009, 2012, 2015 рр. на сайті <https://patonpublishinghouse.com/ukr/compilations#close>.



# ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ ФЕРОМАГНІТНИХ СТАЛЕЙ ПРИ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИМІРЮВАННЯ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

О.П. Гопкало<sup>1</sup>, Г.Я. Безлюдько<sup>2</sup>, А.А. Котляренко<sup>1</sup>, Ю.П. Кураш<sup>1</sup>, Р.М. Соломаха<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимирязевська, 2. E-mail: [ips@ipp.kiev.ua](mailto:ips@ipp.kiev.ua)

<sup>2</sup>ТОВ «Спеціальні наукові розробки». 61184, м. Харків, а/с 12036. E-mail: [mail@snr-ndt.com](mailto:mail@snr-ndt.com)

Проведено експериментальне обґрунтування можливості оцінки ступеня отриманих технологічних та експлуатаційних пошкоджень металу конструкцій із феромагнітних сталей за результатами вимірювання коерцитивної сили. Виявлений ефект різкої зміни напрямку та максимальних значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності на поверхні найбільш пошкоджених ділянок виробу дозволяє проводити сепарування пошкоджень, отриманих в металі конструкції в умовах пружного деформування (до умовної межі плинності), і пошкоджень, отриманих при пружно-пластичному деформуванні, аж до руйнування та чітко виділяти межі зон отриманих зворотних та незворотних пошкоджень. Завдяки ефекту різкої зміни напрямку та максимальних значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності у найбільш пошкоджених ділянках конструкцій зникає необхідність у визначенні механічних характеристик міцності та пластичності металу, оскільки діагностування навантаженості проводиться відносно умовної межі плинності. Варіювання орієнтації датчика для вимірювання значень коерцитивної сили відносно досліджуваної поверхні дозволяє визначати найбільш деформовані і пошкоджені зони, встановлювати напрямок головних напружень та оцінювати структурну гомогенність металу. Бібліогр. 14, рис. 10.

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

При технічному обслуговуванні складного високотехнологічного обладнання методи діагностування технічного стану на сьогодні є найбільш актуальними [1, 2]. Про це свідчить і велика кількість нормативної документації, зокрема, ГОСТів, якими регламентується широке коло питань: від термінології до класифікації методів технічного діагностування [3, 4].

Роботи останніх років в області магнітної структуроскопії дозволили встановити зв'язок магнітних і механічних властивостей ряду феромагнітних конструкційних сталей [5, 6]. В якості основного магнітного параметра була обрана коерцитивна сила ( $H_c$ , А/см) як найбільш чутлива до зміни щільності дислокаційної структури сталі [7] і пов'язана лінійною залежністю з механічними властивостями. В результаті діаграму розтягу стало можливим моделювати за даними зміни коерцитивної сили.

Раніше проведеними дослідженнями встановлено, що фізична природа реагування коерцитивної сили на механічні навантаження феромагнітних та аустенітних сталей має суттєві відмінності. Так для феромагнітних сталей зміни значень коерцитивної сили при статичному та циклічному деформуванні пов'язані з упорядкуванням орієнтації доменної структури металу (від хаотичної до спрямованої). Для аустенітних парамагнітних (не магнітних у початковому стані) сталей зміни

значень коерцитивної сили при статичному та циклічному деформуванні пов'язані із структурними перетвореннями вихідного аустеніту в деформаційний мартенсит з кінцевим феррито-перлітним розпадом, що викликає зміну магнітних властивостей металу з парамагнітного у феромагнітний стан [8]. В даній роботі представлені результати експериментальних досліджень реагування коерцитивної сили на механічні навантаження лабораторних зразків із феромагнітних сталей.

**Мета роботи.** Мета роботи полягає в експериментальній перевірці можливості використання одного із методів неруйнівного контролю, а саме інструментального вимірювання змін значень коерцитивної сили в процесі механічного навантаження лабораторних зразків із феромагнітних сталей для оцінки ступеня накопичених пошкоджень.

**Методика експериментальних досліджень.** Матеріалом для лабораторних зразків слугував лист із сталі Ст3 товщиною 5 мм, з якого у вздовж прокатки вирізали лабораторні зразки з розмірами робочої частини 4,16×50,19×100 мм та зразки із сталі X52 з розмірами робочої частини 7,65×25,14×220 мм, які вирізали із труби діаметром 630×8 мм у повздовжньому напрямку. Механічні характеристики сталі Ст3 складалі:  $\sigma_{0,2} = 306,7$  МПа;  $\sigma_b = 445$  МПа;  $\delta = 29,75$  %. Сталі X52 –  $\sigma_{0,2} = 355,6$  МПа;  $\sigma_b = 544,6$  МПа;  $\delta = 17,6$  %.

Гопкало О.П. – <https://orcid.org/0000-0001-7799-3870>, Котляренко А.А. – <https://orcid.org/0000-0001-8345-3547>,

Кураш Ю.П. – <https://orcid.org/0000-0003-3440-6351>

© О.П. Гопкало, Г.Я. Безлюдько, А.А. Котляренко, Ю.П. Кураш, Р.М. Соломаха, 2020

Були проведені також випробування на циклічний розтяг з перевантаженнями, які імітували штатні гідравлічні випробування та корозійне зношування трубопроводів, лабораторних зразків, з розмірами робочої частини  $2,0 \times 26 \times 135$  мм, виготовлених із труби діаметром  $630 \times 8$  мм із сталі 17Г1С після тривалої експлуатації тепломереж. Також були проведені експериментальні дослідження реагування коерцитивної сили на циклічний розтяг аналогічних лабораторних зразків з концентраторами напружень у вигляді отворів різного діаметру. Механічні характеристики сталі 17Г1С склали:  $\sigma_{0,2} = 413,2$  МПа;  $\sigma_b = 571$  МПа;  $\delta = 19,3$  %. При випробуваннях на циклічний розтяг напруження, які імітували гідравлічні випробування, склали  $1,15 \dots 1,25$  від напружень штатного режиму експлуатації тепломереж. Корозійне зношування імітували шляхом підвищення на 7 % діючих напружень.

Крім того, були проведені експериментальні дослідження реагування коерцитивної сили на багатоциклове навантаження лабораторних зразків з розмірами робочої частини  $12 \times 20 \times 5,8$  мм із сталі 20. Механічні характеристики сталі 20 склали:  $\sigma_{0,2} = 245$  МПа;  $\sigma_b = 410$  МПа;  $\delta = 25$  %.

Випробування на статичний розтяг при ступінчатому навантаженні з розвантаженням проводили на електрогідравлічній випробувальній машині INSTRON 8802 при швидкості переміщення активного захвату 2 мм/хв.

Випробування на циклічний вітнульовий розтяг зразків з частотою 2 цикла/хв. при контролі рівня прикладених зусиль проводили на важільній випробувальній машині ІП-4М (ЦНІИТМАШ, Росія), оснащеної механізмом циклічного підйому вантажу на важелі.

Випробування на багатоциклову втому проводили на резонансній випробувальній машині RUMUL TESTRONIC 50kN виробництва компанії RUSSENBARGER PRÜFMASCHINEN AG (Швейцарія). Всі вищезгадані випробування проводили при кімнатній температурі.

Вимірювання значень коерцитивної сили у навантаженому та розвантаженому стані на кожній ступені навантаження проводили за допомогою структуроскопів КРМ-Ц-К2М (розробник ТОВ «Спеціальні наукові розробки», м. Харків), укомплектованих датчиками з базами вимірювання – 65 мм (датчик D65), – 27 мм (датчик D27) та – 12 мм (датчик D12), які дозволяють вимірювати інтегральні значення коерцитивної сили у достатньо великих об'ємах металу ( $65 \times 32 \times 30$  мм,  $27 \times 25 \times 4$  мм та  $12 \times 12 \times 1$  мм відповідно). Глибина намагнічування металу датчиком D65 становить до 30 мм, датчиком D27 – до 4 мм та датчиком D12 – до 1 мм. Вимірювання значень коерцитивної сили на

поверхні виробу або лабораторного зразка полягає у намагнічуванні металу до насичення, його розмагнічуванні з наступним намагнічуванням магнітним полем протилежної полярності для нейтралізації залишкового магнетизму та вимірювання значень  $H_c$ . Тривалість циклу визначення значень коерцитивної сили складає 5 та 10 с для датчиків D27 та D65, D12 відповідно. Слід зазначити, що при наявності анізотропії структури металу, у тому числі після пластичного деформування, зміна орієнтації магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні впливає на вимірювану величину коерцитивної сили. Вимірювання значень коерцитивної сили структуроскопом не потребує будь якої підготовки досліджуваної поверхні. Наприклад, при використанні датчика D65 допускається загальна товщина лакофарбових та захисних покриттів до 6 мм.

На рис. 1 приведена схема орієнтації магнітів датчиків D65 та D27 відносно поверхні лабораторних зразків. В даній роботі прийнято вважати, що магнітний потік в положенні I датчика ( $H_{c\perp}$ ) направлений поперек зразка, а у положенні II ( $H_{c\parallel}$ ) – вздовж зразка.

**Результати експериментальних досліджень.** На рис. 2 приведені діаграма деформування ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) та кінетика коерцитивної сили ( $\sigma$ - $H_c$ ) при ступінчатому розтягуванні з розвантаженням в залежності від орієнтації полюсів магнітів датчика відносно осі зразків (напрямку навантаження) із сталей Ст3 (а, б) та Х52 (в, г) у навантаженому та розвантаженому стані.

Отримані результати показують, що максимальні значення коерцитивної сили при навантаженні суттєво залежать від позиціонування положення датчика відносно напрямку навантаження. Так при пластичному деформуванні у навантаженому стані напрямок максимальних значень коерцитивної сили ( $H_{c\perp}$ ) орієнтований перпендикулярно напрямку навантаження (рис. 2, а, в). Слід зауважити, що після пластичного деформування при орієнтації полюсів магнітів перпендикулярно напрямку навантаження ( $H_{c\perp}$ ) у навантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили перевищують аналогічні величини у розвантаженому стані (рис. 2, б, г). А при орієнтації полюсів магнітів у напрямку навантаження ( $H_{c\parallel}$ ), навпаки, у розвантаженому стані максимальні значення ко-

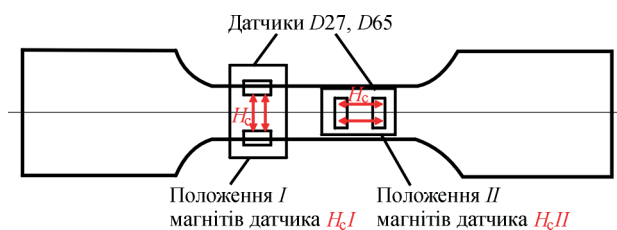


Рис. 1. Схема орієнтації полюсів магнітів датчиків D65 та D27 відносно поверхні лабораторних зразків

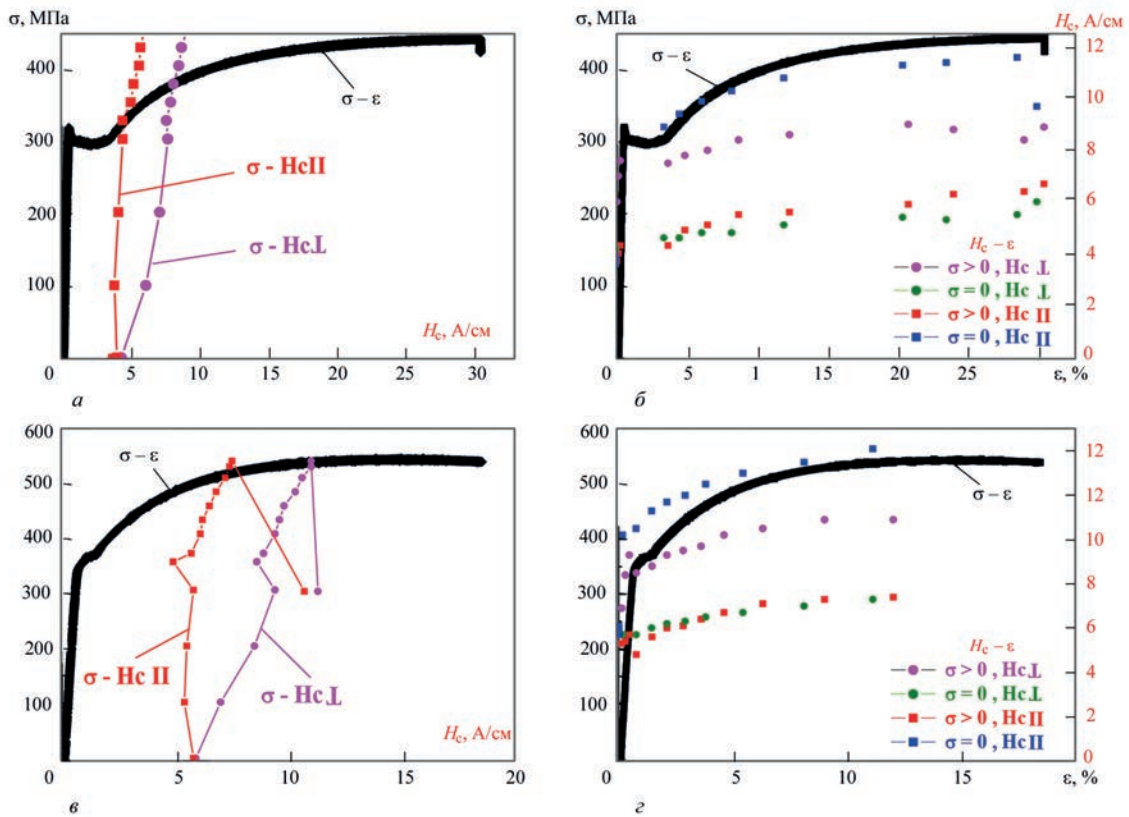


Рис. 2. Діаграми деформування ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) та кінетика коерцитивної сили ( $\sigma$ - $H_c$ ) при ступінчатому розтягуванні з розвантаженням в залежності від орієнтації полюсів магнітів датчика відносно осі зразків ( $H_{cII}$  – вздовж зразка,  $H_{cI}$  – поперек зразка) із сталей Ст3 (а, б) та X52 (в, г) у навантаженому ( $\sigma > 0$ ) та розвантаженому ( $\sigma = 0$ ) стані

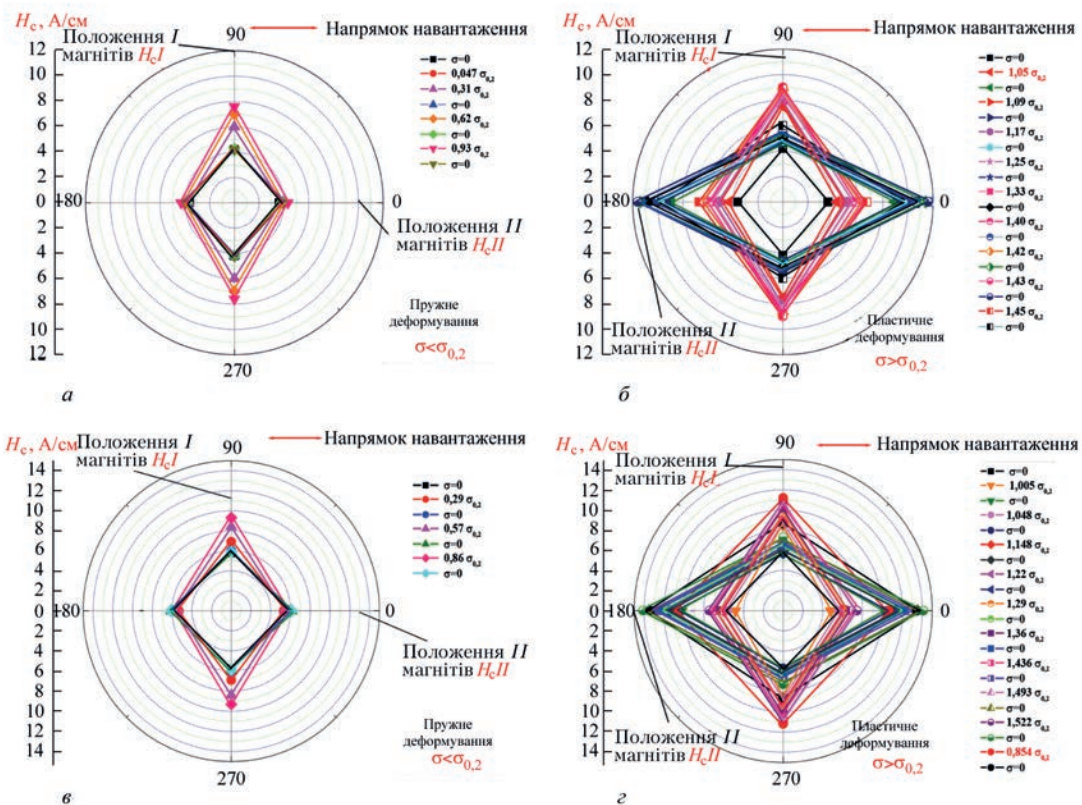


Рис. 3. Епюри коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка при ступінчатому пружному (а, б) та пластичному (в, г) деформуванні розтягом з розвантаженням на кожній ступені зразків із сталей Ст3 (а, в) та X52 (б, г), де епюри  $H_c$  по поверхні зразка у двох взаємно-перпендикулярних напрямках при дії напружень (у навантаженому стані,  $\sigma \neq 0$ ) відображені у червоних тонах, а у розвантаженому стані ( $\sigma = 0$ ) – у темних тонах

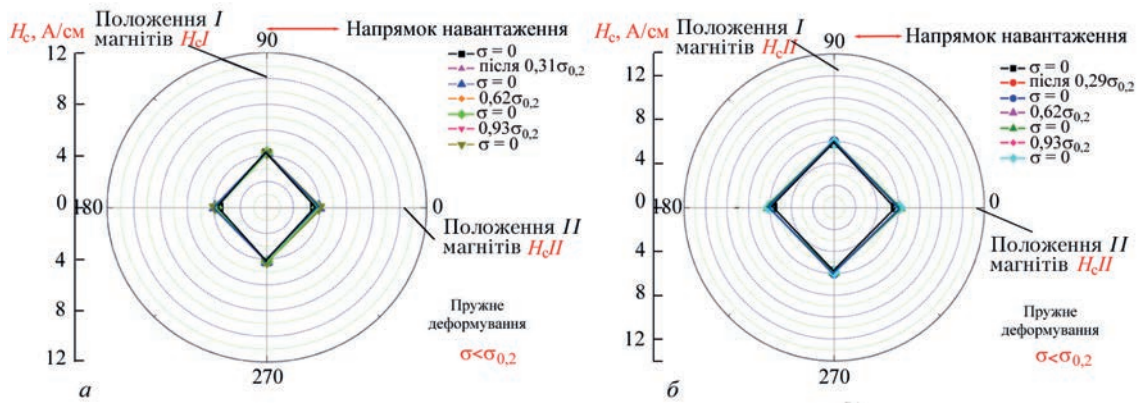


Рис. 4. Епюри коерцитивної сили по поверхні лабораторних зразків із сталей Ст3 (а) та Х52 (б) у розвантаженому стані після пружного деформування

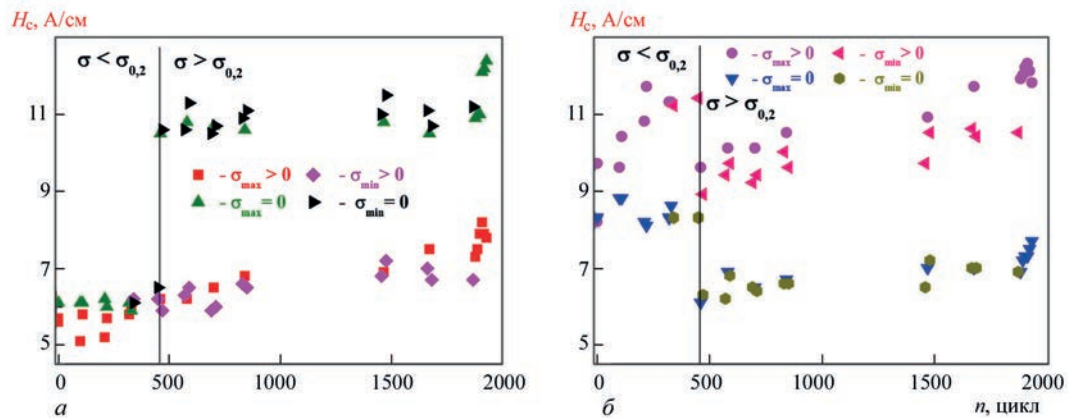


Рис. 5. Кінетика коерцитивної сили в зоні руйнування у навантаженому стані (точки у жовто-червоних тонах) та після розвантаження (точки у чорно-синє-зелених тонах) при орієнтуванні полюсів магнітів датчика вздовж (а) та поперек (б) робочої частини лабораторного зразка

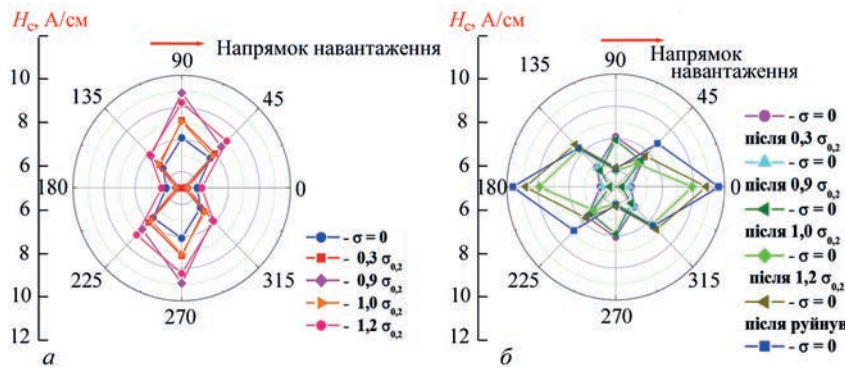


Рис. 6. Епюри коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка у навантаженому стані (а) та після навантаження (розвантажений стан) (б)



Рис. 7. Фото зразка

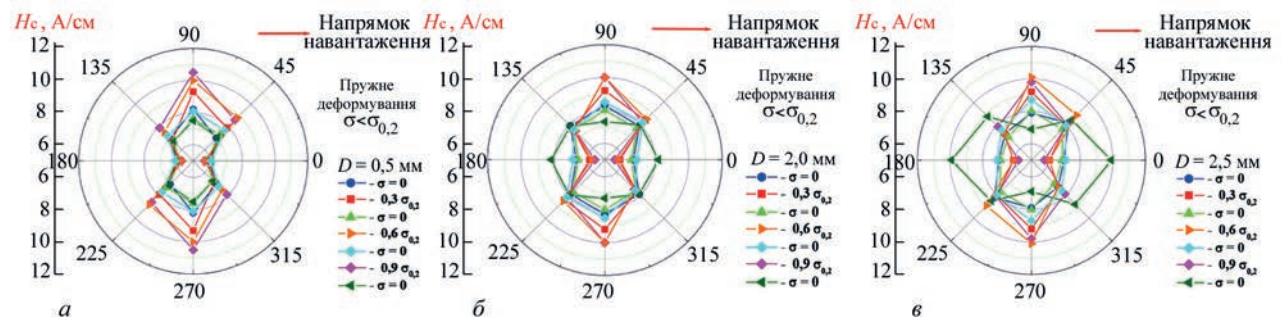


Рис. 8. Епюри коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка з концентраторами напружень у вигляді отворів: а – діаметром 0,5 мм; б – 2,0; в – 2,5 при пружному деформуванні



ерцитивної сили перевищують аналогічні величини у навантаженому стані.

Для наочності розглянуті на рис. 2 дані представлені на рис. 3 у вигляді епюр значень коерцитивної сили по поверхні зразків із сталей Ст3 (а, в) та Х52 (б, г) при ступінчастому пружному (а, б) та пластичному (в, г) деформуванні розтягом з розвантаженням на кожній ступені.

При пружному деформуванні (див. рис. 3, а, б) у навантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили перевищують аналогічні величини у розвантаженому стані і орієнтовані перпендикулярно напрямку навантаження.

Після пружного деформування у розвантаженому стані значення коерцитивної сили у двох взаємно перпендикулярних напрямках практично збігаються, що вказує на однорідність його структурного стану (рис. 4). Слід зазначити, що для багатьох видів прокату характерна структурна неоднорідність, яка викликає розкид механічних та фізичних характеристик сталей, у тому числі значень коерцитивної сили [9, 10]. За даними роботи [11] неоднорідність структури металу різних ділянок виробу може обумовлювати відмінності значень коерцитивної сили, вимірних у двох взаємно перпендикулярних напрямках в межах 10 %, а у деяких випадках до 18 %.

Після пластичного деформування (див. рис. 3, в, г) у розвантаженому стані напрямком максимальних значень коерцитивної сили збігається з напрямком навантаження. При цьому після пластичного деформування металу у розвантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили у напрямку навантаження приблизно у 2,5 та 1,75 рази (для сталей Ст3 та Х52 відповідно), перевищують аналогічні величини після пружного деформування. Тобто, при перевищенні діючих напружень умовної межі плинності після розвантаження відбувається різке підвищення («стрибок») значень коерцитивної сили.

Аналогічні закономірності реагування коерцитивної сили на статичний розтяг отримано і при циклічному ступінчастому розтязі з розвантаженням на кожній ступені навантаження лабораторних зразків із сталі 17Г1С. При даних дослідженнях використовували датчик з базою вимірювання 12 мм (датчик D12). На рис. 5, а, б приведена кінетика коерцитивної сили в зоні руйнування у навантаженому стані ( $\sigma > 0$ ) при дії циклічних напружень розтягу та у розвантаженому стані ( $\sigma = 0$ ) при орієнтуванні полюсів магнітів вздовж (а) та поперек (б) робочої частини зразка, де  $\sigma_{\max}$  – напруження, які імітували гідравлічні випробування труби із сталі 17Г1С, а  $\sigma_{\min}$  – напруження при штатному режимі навантаження. Слід зазначити, що у навантаженому стані при орієнтуванні полюсів маг-

нітів вздовж робочої частини зразка (рис. 5, а) незалежно від рівня напружень має місце монотонне зростання значень коерцитивної сили із незначним підвищенням їх величин при руйнуванні.

У розвантаженому стані після дії напружень, які перевищували значення умовної межі плинності металу ( $\sigma > \sigma_{0,2}$ ), відбувається різке, майже двократне підвищення значень коерцитивної сили, яке майже не змінює своїх величин, практично, до руйнування.

У навантаженому стані при орієнтуванні полюсів магнітів поперек робочої частини зразка (рис. 5, б) при пружному деформуванні ( $\sigma < \sigma_{0,2}$ ) має місце зростання значень коерцитивної сили до їх максимальних величин при досягненні напружень умовної межі плинності і при подальшому підвищенні напружень ( $\sigma > \sigma_{0,2}$ ) відбувається різке зниження («стрибок») приблизно на 20 % значень  $H_c$ . При подальшому циклічному розтязі з підвищенням напружень має місце поступове зростання значень коерцитивної сили, які при руйнуванні приблизно співпадають з аналогічними значеннями  $H_c$  при напруженнях умовної межі плинності. У розвантаженому стані відбувається аналогічне зниження («стрибок») значень коерцитивної сили після перевищення напружень умовної межі плинності.

Слід зазначити, що закономірності кінетики коерцитивної сили для досліджених сталей Ст3 та Х52 (рис. 3) співпадають також і для сталі 17Г1С (рис. 6), що може слугувати обґрунтуванням розповсюдження даних закономірностей для багатьох феромагнітних сталей. Так у навантаженому стані, у пружному ( $\sigma < \sigma_{0,2}$ ) та пластичному ( $\sigma > \sigma_{0,2}$ ) діапазоні деформування (рис. 6, а) напрямком максимальних значень коерцитивної сили орієнтований перпендикулярно напрямку навантаження. У розвантаженому стані ( $\sigma = 0$ , рис. 6, б) після пружного ( $\sigma < \sigma_{0,2}$ ) та пластичного ( $\sigma > \sigma_{0,2}$ ) деформування напрямком максимальних значень коерцитивної сили співпадає з напрямком навантаження. При цьому, після пластичного деформування металу ( $\sigma > \sigma_{0,2}$ ) при розвантаженні до  $\sigma = 0$  відбувається поворот на 90° напрямку максимальних значень коерцитивної сили. Дану обставину можна використовувати на практиці для контролю за мірою навантаження окремих ділянок відповідальних елементів конструкцій в період експлуатації. Ефект різкої зміни максимальних значень коерцитивної сили та їх напрямку при перевищенні напружень умовної межі плинності, при моніторингу напружено-деформованого стану елементів конструкцій можна використовувати для встановлення меж пружно- та пластично-деформованого металу. Подібні механізми поведінки магнітних властивостей феромагнітних сталей при навантаженні з розвантаженням описані в роботах [12, 13].

Для встановлення закономірностей реагування коерцитивної сили на механічні навантаження в умовах концентрації напружень були проведені випробування на циклічний розтяг лабораторних зразків з концентраторами напружень у вигляді наскрізних отворів діаметром 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 та 2,5 мм (рис. 7).

На рис. 8 приведені епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка з концентраторами напружень при пружному деформуванні. На рисунку епюри розподілу коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка з концентраторами напружень у навантаженому стані позначено символами у червоних тонах, а у розвантаженому стані (після відповідного навантаження) – синьо-зелених тонах.

Після пружного деформування до значень бруто напружень  $0,9\sigma_{0,2}$  металу у зонах концентраторів напружень від отворів діаметром 0,5, 1,0 та 1,5 мм у розвантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили складають 71,4 % від аналогічних величин у навантаженому стані (рис. 8, а) і орієнтовані перпендикулярно напрямку навантаження. При цьому, характер епюр коерцитивної сили по поверхні зразка при пружному деформуванні у зоні отвору діаметром 0,5 мм аналогічний епюрам  $H_c$  для зразка з отворами діаметром 1,0 та 1,5 мм. Після пружного деформування до значень бруто напружень  $0,9\sigma_{0,2}$  металу у розвантаженому стані ( $\sigma = 0$ ) в зоні концентраторів напружень від отворів діаметром 2 та 2,5 мм (номінальні напруження склали відповідно  $0,975\sigma_{0,2}$  та  $0,995\sigma_{0,2}$ , тобто нижчі за умовну межу плинності) мало місце зростання значень коерцитивної сили на 22 та 40,5 %, відповідно, і поворот на  $90^\circ$  напрямку їх максимальних значень відносно аналогічних зон з отворами діаметром 0,5, 1,0 та 1,5 мм (рис. 8, б, в).

Збільшення діаметра отвору від діаметром 2,0 до 2,5 мм при пружному деформуванні до значень бруто напружень  $0,9\sigma_{0,2}$  викликає збільшення об'єму пластично-деформованого металу у локальній зоні отвору, і, відповідно, підвищення максимальних значень коерцитивної сили у розвантаженому стані (відносно навантаженого стану) від 82 % (для отвору діаметром 2,0 мм) до 100 % (для отвору діаметром 2,5 мм, де значення  $H_c$  у навантаженому та розвантаженому стані, практично, співпадають, рис. 8, в). Відмічене приладом зростання максимальних значень коерцитивної сили у розвантаженому стані після навантаження до бруто напружень  $0,9\sigma_{0,2}$  в зоні концентраторів напружень від отворів діаметром 2,0 та 2,5 мм пов'язано з чутливістю датчика до об'єму пластично деформованого металу у зоні вимірювання, де діючі напруження перевищували

умовну межу плинності, які обумовлюють зміну напрямку (поворот на  $90^\circ$ ) та абсолютних значень  $H_c$  (рис. 8, б, в).

Слід зазначити, що не реагування коерцитивної сили на пружне деформування до бруто напружень  $0,9\sigma_{0,2}$  зразків з концентраторами напружень від отворів діаметром 0,5, 1,0 та 1,5 мм пов'язано з недостатньою чутливістю датчика до не великого об'єму пластично деформованого металу у зоні вимірювання, де діючі напруження перевищували умовну межу плинності. Величина об'єму пластично деформованого металу, де відбувається істотна зміна орієнтації доменної структури металу у зоні вимірювання, залежить від розподілу нормальних напружень  $\sigma_x$  по глибині та поверхні отвору (рис. 9, а, б).

Таким чином, чутливість приладу для вимірювання значень коерцитивної сили до концентрації напружень визначається співвідношенням пружно і пластично деформованих об'ємів металу у зоні вимірювання. Дана обставина може слугувати основою для розробки неруйнівних методів оцінки напружень у зоні концентраторів напружень.

Для визначення реагування коерцитивної сили на багатоциклове навантаження були проведені випробування лабораторних зразків із сталі 20 на осьовий знакозмінний розтяг-стиск з частотою 84 Гц при напруженнях 0,7 від межі плинності ( $\sigma_a = 169,5$  МПа) з асиметрією циклу напружень  $R_\sigma = -1$ .

На рис. 10 приведена кінетика значень коерцитивної сили по числу циклів навантаження в зоні руйнування зразка при орієнтуванні полюсів магнітів датчика поперек (а) та вздовж (б) робочої частини зразка. Оскільки при скануванні значень коерцитивної сили по поверхні робочої частини зразка та прилеглих до неї зон вимірювання проводили з кроком 6 мм (половина бази датчика D12 приладу), то значення  $H_c$  у тому числі в зоні руйнування визначали двічі. Слід зазначити, що руйнування лабораторних зразків відбувалось по галтелі (перехідній зоні від робочої частини по радіусу до зони затискання у активному захваті) зразка при дії амплітуди напружень  $\sigma_a^f = 0,8\sigma_a^n$  від номінальних напружень ( $\sigma_a^n$ ) з мінімальною площею поперечного перерізу по середині робочої частини зразка. Початок руйнування зразка супроводжувався різким зниженням частоти навантаження внаслідок підростання тріщини. При цьому в силу достатньо великої бази вимірювання датчика  $12 \times 12$  мм при площі тріщини втомі 0,25 від номінальної площі поперечного перерізу у зоні руйнування змін значень коерцитивної сили не було зафіксовано. І тільки при подальшому зростанні тріщини втомі до площі тріщини втомі 0,5 від номінальної площі поперечного

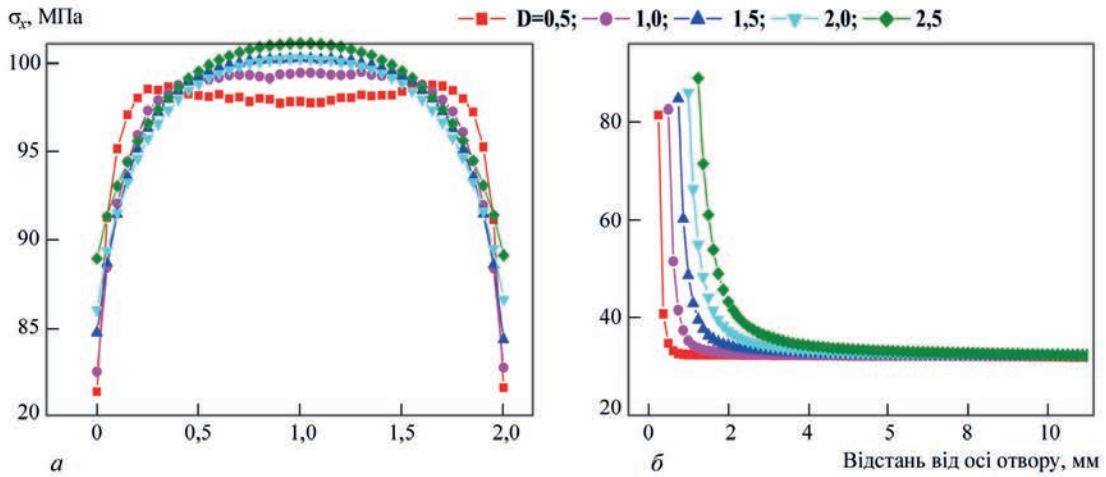


Рис. 9. Розподіл нормальних напружень  $\sigma_x$  по глибині отвору (*a*) та його поверхні (*b*)

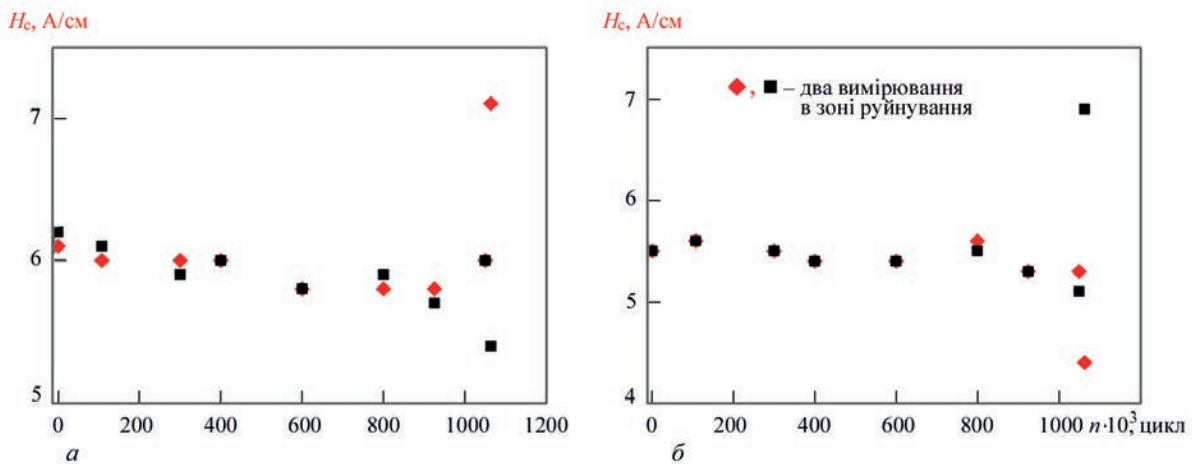


Рис. 10. Кінетика значень коерцитивної сили по числу циклів навантаження в зоні руйнування зразка при орієнтуванні полюсів магнітів датчика поперек (*a*) та вздовж (*b*) робочої частини зразка

перерізу у зоні руйнування були зафіксовані істотні зміни значень коерцитивної сили. Таким чином, при багатоцикловій втоми габарити датчика приладу дозволяють фіксувати тільки достатньо великі тріщини, коли втрата суцільності металу починає впливати на величину магнітних характеристик у зоні вимірювання коерцитивної сили. Тобто, при багатоцикловій втоми, коли основний об'єм металу у зоні вимірювання деформується пружно, чутливість приладу до появи тріщин втоми визначається її розмірами.

Метод діагностування технічного стану виробів коерцитиметричним контролем полягає у проведенні попередніх розрахунків напружено-деформованого стану для встановлення найбільш навантажених локальних ділянок металу конструкції та наступного вимірювання значень коерцитивної сили на поверхні у цих зонах. Оскільки величина коерцитивної сили залежить від орієнтації полюсів магнітів відносно напрямку діючих напружень, то при діагностуванні технічного ста-

ну виробів у найбільш небезпечних локальних зонах вимірювання значень  $H_c$  на поверхні необхідно проводити у 4-х напрямках при повороті датчика через кожні  $45^\circ$  відносно попереднього вимірювання з подальшим уточненням напрямку максимальних значень  $H_c$ . При цьому при моніторингу розподілу коерцитивної сили по поверхні виробу з'являється можливість встановити напрямки головних напружень, проводити оцінку структурного стану металу і оцінювати його гомогенність. На ділянках конструкцій у початковому стані та після пружного деформування добротного ізотропного металу конструкцій максимальні значення коерцитивної сили у двох взаємно перпендикулярних напрямках повинні відрізнятися не суттєво. При моніторингу значень коерцитивної сили на поверхні виробів різкі зміни значень та напрямку максимальних значень коерцитивної сили вказують на суттєві відмінності типу накопичених пошкоджень металу. Отримані результати можуть слугувати даними для подальшої оцін-

ки технічного стану виробів у поєднанні з іншими неруйнівними методами контролю.

### Висновки

Проведено експериментальне обґрунтування можливості оцінки ступеня пошкодженості металу конструкцій із феромагнітних сталей за результатами вимірювання коерцитивної сили. Ефект різкої зміни напрямку та максимальних значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності на поверхні найбільш пошкоджених ділянок виробу дозволяє проводити сепарування пошкоджень, отриманих у металі конструкції в умовах пружного деформування (до умовної межі плинності) і пошкоджень, отриманих при пружно-пластичному деформуванні, аж до руйнування та встановлювати фіксовану межу зворотної та незворотної пошкоджуваності. Завдяки ефекту різкої зміни напрямку та максимальних значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності у найбільш пошкоджених ділянках конструкцій зникає необхідність у визначенні механічних характеристик міцності та пластичності металу, оскільки діагностування навантаженості проводиться відносно умовної межі плинності.

Для феромагнітних сталей експериментально встановлено, що після першого перевантаження металу, коли діючі напруження перевищували умовну межу плинності, при розвантаженні до рівня напружень, нижчих за умовну межу плинності, відбувається «стрибок» і зміна напрямку (на 90°) максимальних значень коерцитивної сили і збереження при цьому їх максимальних величин у розвантаженому стані. Здатність «запам'ятовувати» максимальні значення коерцитивної сили у розвантаженому стані після дії напружень, які перевищували умовну межу плинності, можна використовувати на практиці для контролю за мірою навантаження (пошкодження) окремих ділянок відповідальних елементів конструкцій в період експлуатації.

Встановленні обмеження у можливості оцінки ступеня пошкодження металу по вимірам значень коерцитивної сили у зонах концентрації напружень при циклічному навантаженні, які обумовлені чутливістю приладу (при даних габаритах датчика для вимірювання  $H_c$ ) до співвідношення об'ємів пружно- та пластично-деформованого металу у зоні руйнування (вимірювання).

Отримані результати можуть бути корисними для оцінки отриманих пошкоджень у зонах локального деформування деталі виробу, при діагностуванні якості сучасних технологій, наприклад, локальної термообробки конструктивних елементів типу «термошок» та при розробці ме-

тодик оцінки залишкових напружень у зонах концентрації напружень та від зварювання.

Результати експериментальних досліджень розширюють уявлення про можливість застосування коерцитиметричного контролю для оцінки накопичених пошкоджень в металах в умовах статичного та циклічного навантаження і можуть стати основою для розробки нових підходів до експресної оцінки залишкового ресурсу металу конструкцій простим неруйнівним методом.

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи відділу втоми і термовтоми матеріалів Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України за темою 1.3.4.1910 «Розробка методів оцінки втомного пошкодження металічних матеріалів на стадіях зародження і росту тріщин».

### Список літератури

1. Лепеш Г.В. (2015) Современные методы и средства диагностики оборудования инженерных систем зданий и сооружений. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 4(34), 3–8.
2. Лепеш Г.В. (2015) Диагностика и комплексное обслуживание инженерно-технических систем и оборудования зданий и сооружений. *Там же*, 5(35), 6–16.
3. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Группа Т59. Non-destructive check. Classification of types and methods. Дата введения 1980-07-01. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 11 ноября 1979 г. № 4245 дата введения установлена 01.07.80. Взамен ГОСТ 18353-73. Электронный фонд нормативно-правовой документации. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18353-79> (дата обращения 5.05.2016).
4. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения Technical diagnostics. Terms and definitions. Дата введения 1991-01-01. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 26.12.89 № 4143. Взамен ГОСТ 20911-75. Переиздание. Ноябрь 2009 г. Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/1200009481> (дата обращения 5.05.2016).
5. Христенко И.Н., Кривова В.В. (1984) Влияние пластической деформации на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали. *Дефектоскопия*, 6, 90–98.
6. Горкунов Э.С., Федоров В.П., Бухвалов А.Б., Веселов И.Н. (1997) Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик. *Там же*, 4, 87–95.
7. Попов В.А., Гудошник В.А. (2012) Мифы и реальность применения магнитной структуроскопии при оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций подъемных сооружений. *Подъемные сооружения. Специальная техника*, 12, 20–21.
8. Гопкало О.П., Нехотящий В.О., Безлюдько Г.Я., Кураш Ю.П. (2019) Діагностування пошкодженості аустенітної сталі AISI 304 при механічному навантаженні по вимірах коерцитивної сили. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 1–13.
9. Ионов Д.В., Попов В.А. (2013) О практике применения магнитной структуроскопии для выявления структурной неоднородности в элементах конструкций объектов повышенной опасности. «Подъемные сооружения. Специальная техника», 4. [Электронный ресурс]. Режим

доступу : en.tuev-dieks.com > articles > sobyitiya-v-mire-diagnostiki-i-ekspertiz

10. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. (1993) Магнитные методы структурного анализа неразрушающего контроля, Москва, Наука.
11. Леонов И.С. (2013) Совершенствование коэрцитиметрического метода для анализа напряженного состояния нефтегазопроводов. Дис. ... канд. техн. наук 25.00.19. Ухта.
12. Малахов О.В., Кочергин А.В., Девяткин Д.С. (2013) Перспективы применения метода магнитной памяти металлов к диагностике состояния металлов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 4/5 (64), 20–24. ISSN 1729-3774.
13. Царькова Т.П., Кулеев В.Г. (2009) Особенности магнитоупругого эффекта в пластически деформированных ферромагнитных сталях в слабых магнитных полях. *Там же*, 108, 3, 227–236.

## References

1. Lepesh, G.V. (2015) Sovremennyye metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya inzhenernykh sistem zdaniy i sooruzhenij. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy` servisa*, 4(34), 3–8 [in Russian].
2. Lepesh, G.V. (2015) Diagnostika i kompleksnoe obsluzhivanie inzhenerno-tehnicheskikh sistem i oborudovaniya zdaniy i sooruzhenij. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy` servisa*, 5(35), 6–16 [in Russian].
3. GOST 18353-79 Kontrol` nerazrushayushhij. Klassifikatsiya vidov i metodov. Gruppy T59. Non-destructive check. Classification of types and methods. Data vvedeniya 1980-07-01. Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 11 noyabrya 1979 g. № 4245 data vvedeniya ustanovlena 01.07.80. Vzamen GOST 18353-73. Elektronnyy fond normativno-pravovoy dokumentatsii. Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18353-79> (data obrashheniya 5.05.2016) [in Russian].
4. GOST 20911-89 Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya Technical diagnostics. Terms and definitions. Data vvedeniya 1991-01-01. Utverzhden i vveden v deystvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po upravleniyu kachestvom produkcii i standartam ot 26.12.89 № 4143. Vzamen GOST 20911-75. Pereizdanie. Noyabr` 2009g. Rezhim dostupa <http://docs.cntd.ru/document/1200009481> (data obrashheniya 5.05.2016) [in Russian].
5. Khrystenko, I.N., Kryvova, V.V. (1984) Vliyanie plasticheskoy deformatsii na koertsitivnyy cilu malouglerodistoy stali. *Defektoskopia*, 6, 90. [in Russian].
6. Gorkunov, E.S., Fedorov, V.P., Bukhvalov, A.B., Veselov, I.N. (1997) Modelirovanie diagrammy deformirovaniya na osnove izmereniya ee magnitnykh characteristic. *Ibid*, 4, 87–95 [in Russian].
7. Popov, V.A. (2012) Mify i realnost primeneniya magnitnoy strukturoskopii pri otsenke napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsiy podzemnykh sooruzheniy. Podemnyye soorusheniya. *Spetsialnaya tekhnika*, 12, 20–21. [in Russian].
8. Gopkalo, O.P., Nekhotyashhij, V.O., Bezlyud`ko, G.Ya., Kurash, Yu.P. (2019) Diagnostuvannya poshkodzhennosti` austenitnoy stali` AISI 304 pri mekhanichnomu navantazhenni` po vimirakh koercitivnoy sili. *Tekhn. diagnostika i nerazrush. Kontrol`*, 4, 1–13. [in Ukrainian].
9. Ionov, D.V., Popov, V.A. (2013) O praktike primeneniya magnitnoy strukturoskopii dlya vyyavleniya strukturnoy neodnorodnosti v elementakh konstruktsiy obektov povyshennoy opasnosti. «Podyomnye sooruzheniya. Spetsialnaya tekhnika», 4. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa : en.tuev-dieks.com > articles > sobyitiya-v-mire-diagnostiki-i-ekspertiz > [in Russian].
10. Mikheev, M.N., Gorkunov, E`S. (1993) *Magnitnye metody strukturnogo analiza nerazrushayushhego kontrolya*. Moskva, Nauka. [in Russian].
11. Leonov, I.S. (2013) *Sovershenstvovanie koercitimetriceskoy metoda dlya analiza napryazhennogo sostoyaniya neftegazoprovodov. Dis. kand. tekhn. nauk 25.00.19. Ukhita*. [in Russian].
12. Malakhov, O.V., Kochergin, A.V., Devyatki, D.S. (2013) Perspektivy primeneniya metoda magnitnoy pamyati metallov k diagnostike sostoyaniya metallov. *Vostochno-Evropskiy zhurnal peredovykh tekhnologij* ISSN 1729-3774, 4/5 (64), 20–24 [in Russian].
13. Czarkova, T.P., Kuleev, V.G. (2009) Osobennosti magnitoupругого effekta v plasticheski deformirovannykh ferromagnitnykh stalyakh v slabykh magnitnykh polyakh. *Ibid*, 108, 3, 227–236. [in Russian].

## DIAGNOSIS OF DAMAGE TO FERROMAGNETIC STEELS DURING MECHANICAL LOADING BY RESULTS OF MEASUREMENTS OF COERCIVE FORCE

O.P. Gopkalo<sup>1</sup>, G.Ya. Bezlyudko<sup>2</sup>, A.A. Kotliarenko<sup>1</sup>, Yu.P. Kurash<sup>1</sup>, R.M. Solomacha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NASU, Kyiv, Ukraine. 01014, 2 Timiryazevska str., E-mail: ips@ipp.kiev.ua

<sup>2</sup>LLC «Special Scientific Developments», Kharkiv, Ukraine. 61184, Kharkiv, s/b 12036. E-mail: mail@snr-ndt.com

An experimental substantiation of the possibility of estimating the degree of technological and operational damage to metal structures made of ferromagnetic steels was performed by the results of measuring the coercive force. The revealed effect of a sharp change of direction and maximum values of coercive force when exceeding the stresses of the conditional yield strength on the surface of the most damaged parts of the product allows separating the damage received in the structure metal under elastic deformation (to the tensile yield strength) and damage obtained at elasto-plastic deformation right up to destruction, and clearly delineating the boundaries of the zones of received reversible and irreversible damage. Due to the effect of a sharp change in the direction and maximum values of coercive force at exceeding the stresses of the conditional yield strength in the most damaged parts of structures, there is no need to determine the mechanical characteristics of strength and ductility of the metal, as the load diagnostics is conducted relative to the conditional yield strength. Variation of the orientation of the pole tips of the sensor magnets to measure the values of coercive force relative to the studied surface allows determination of the most deformed and damaged areas, establishing the direction of principal stresses and assessing the structural homogeneity of the metal. 14 Ref., 10 Fig.

*Keywords: structuroscope, coercive force, load, damage, stress, deformation, fracture*

Надійшла до редакції  
24.01.2020

# МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ВИХРОСТРУМОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ МАЛОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ РЕСУРСОЄМНОСТІ

М.О. Редька<sup>1</sup>, Ю.В. Куц<sup>1</sup>, О.Е. Левченко<sup>1</sup>, О.Д. Близнюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. І. Сікорського. E-mail: y.kuts@ukr.net

<sup>2</sup>Науково-дослідна лабораторія технічної діагностики та неруйнівного контролю авіаційної техніки НАУ.  
E-mail: nau\_409@ukr.net

Запропоновано метод опрацювання сигналів вихрострумкової дефектоскопії, що ґрунтується на визначенні числа нулів аналізованого сигналу в ковзному режимі. Метод відрізняється малою ресурсоємністю, має просту схематехнічну реалізацію і може бути використаний в автоматизованих системах вихрострумового неруйнівного контролю. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 4.

*Ключові слова:* вихрострумова дефектоскопія, автоматизований вихрострумований контроль, виявлення сигналів

Вихрострумова дефектоскопія (ВСД) базується на взаємодії змінного електромагнітного поля з електропровідним об'єктом контролю (ОК) [1, 2]. Суттєвою ознакою ВСД є те, що вона реалізується за відсутності механічного контакту між вихрострумним перетворювачем (ВСП) та ОК. Це дає змогу проводити ВСД в умовах руху ВСП відносно ОК зі значною швидкістю, що суттєво збільшує продуктивність контролю і розширює можливості його автоматизації. Такі фактори, як різноманітність технологічних процесів виготовлення виробів, умов їх експлуатації, поява нових матеріалів і необхідність виявлення дефектів в широкому діапазоні зміни їх розмірів та глибин залягання, викликає потребу в розробленні нових та удосконаленні існуючих методів та засобів ВСД.

Зазвичай сигнали ВСД формуються диференціальними ВСП [3] за умови повної (чи часткової) компенсації неінформативних для ВСД складових – напруги холостого ходу та внесеної напруги. Такі сигнали спостерігаються на фоні шумів за різного відношення сигнал/шум (с/ш).

Для виявлення сигналів від дефектів в адитивній суміші з шумом можуть бути використані різні відомі методи, зокрема оптимальної фільтрації сигналів [4], узгодженої фільтрації сигналів [5], застосування сигналів з різними видами модуляції і маніпуляції [6], кореляційного прийому сигналів [4, 5], спліт метод [7], метод вейвлет-аналізу [8] та ін. Реалізація потенційних можливостей більшої частини цих методів, по-перше, потребує знання копії корисного сигналу, по-друге, характеризується значною ресурсоємністю обчислень. Під ресурсоємністю обчислень розуміють апаратні та часові витрати для їх реалізації.

Для ряду прикладних застосувань ВСД існує інша можливість виявлення сигналів від дефектів. Сигнали ВСП, як реалізації фізичних випад-

кових процесів, є функціями часу. Такі функції на кінцевому часі спостереження мають кінцеве число максимумів і мінімумів, отже і кінцеве число перетину (число нулів) знакозмінним сигналом нульового рівня [9]. Залежність статистичних характеристик числа нулів сигналу ВСП від відношення с/ш покладена в основу ідеї експрес-методу виявлення сигналів від дефектів у ВСД, запропонованого в роботі [10].

Метою дослідження є розвиток методу виявлення сигналів від дефектів, що ґрунтується на визначенні числа нулів аналізованого сигналу в ковзному режимі, порівняння ефективності та ресурсоємності цього методу з базовим. Розроблення методу опрацювання сигналів ВСД малої ресурсоємності дасть змогу використати їх в автоматизованих системах ВСД за значної швидкості сканування ОК.

**Постановка задачі.** Загальна схема формування сигналів ВСД у випадку використання трансформаторного диференціального ВСП наведена на рис. 1. Зазвичай такі перетворювачі збуджуються змінним електричним струмом синусоїдної форми частотою  $f$ . У випадку збалансованих вторинних обмоток, які включені диференціально, під час сканування ВСП на ділянці ОК з дефектом формується радіоімпульсний сигнал виду:

$$u_d(t, \bar{p}) = U(t, \bar{p}) \cos[2\pi ft - \varphi(t, \bar{p})] \quad (1)$$

де  $U(t, \bar{p})$ ,  $\varphi(t, \bar{p})$  – відповідно обвідна (амплітудно-часова характеристики сигналу (АХС)) та початкова фаза;  $2\pi ft - \varphi(t, \bar{p})$  – фазо-часова або фазова характеристика сигналу (ФХС);  $\bar{p}$  – вектор параметрів дефекту (до прикладу глибина та розкриття тріщини, її довжина тощо) та параметрів системи «ВСП – ОК» (відстань між ВСП та ОК, орієнтація ВСП відносно дефекту, режим сканування тощо).

Типовий сигнал від дефекту у випадку проведення ВСД в динамічному режимі та за умови ком-

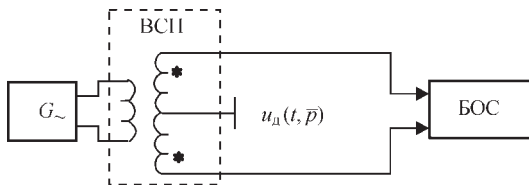


Рис. 1. Формування сигналу у вихрострумівому дефектоскопі з трансформаторним ВСП диференціального типу (БАС – блок опрацювання сигналів)

пенсації напруги холостого ходу та внесеної напруги представлено на рис. 2, а. Характеристики такого сигналу містять інформацію про дефекти досліджуваного об'єкту і підлягають подальшому вимірюванню і аналізу. Зазвичай такі сигнали спостерігаються на фоні шуму (рис. 2, б). Зі зменшенням розмірів дефектів та збільшенням глибини їх залягання зменшується і амплітуда інформаційної складової сигналу, відповідно зменшується відношення с/ш і ймовірність виявлення сигналів від дефектів. За відсутності повної компенсації напруги холостого ходу та внесеної напруги сигнал також містить гармонійну складову, наявну на всьому часі аналізу (рис. 2, в.). У більшості систем ВСП сигнали перетворюються на цифрові коди аналогово-цифровими перетворювачами (АЦП).

За базовий метод виявлення радіоімпульсних сигналів прийнято запропонований в [11] метод, що передбачає аналіз кругової статистики – результуючої довжини вектора (або скорочено г-статистики [12]), яка визначається за різницею фазових характеристик сигналів ВСП. Значення г-статистики отримують в результаті ковзного віконного опрацювання різниці  $\Delta\Phi(t)$ : ФХС  $\Phi(t)$  суміші сигналу ВСП з шумом та ФХС сигналу-носія –  $2\pi ft$ , тобто різниці  $\Delta\Phi(t) = \Phi(t) - 2\pi ft$ . Поточні значення ФХС обчислюють через дискретне перетворення Гільберта (ДПГ) сигналу. В базовому методі віконна функція має фіксовану апертуру М. Про наявність сигналу дефекту судять за перевищенням г-статистикою порогового рівня. Обчислювальна складність цього методу обумовлена необхідністю реалізації алгоритмів ДПГ, обчислення ФХС та тригонометричних моментів від  $\Delta\Phi(t)$ .

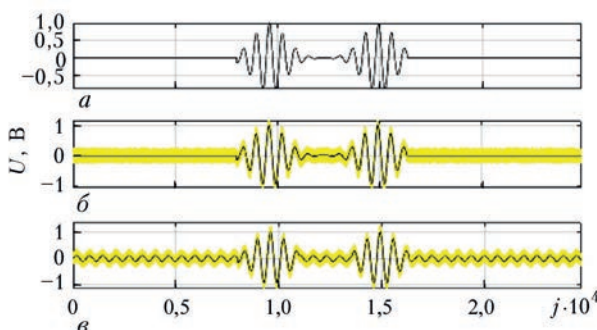


Рис. 2. Графіки сигналу ВСП за повної компенсації ВСП та відсутності шуму (а), сигналу ВСП за повної компенсації ВСП та наявності шуму (б) та графік сигналу за неповної компенсації ВСП з шумом (в)

Крім того, у випадку неповної компенсації неінформативних складових сигналу ВСП, можливе отримання некоректних результатів.

Згідно запропонованого методу виявлення сигналів ВСП проводиться за кількістю нулів процесу (без урахування їх знаку, тобто без урахування знаку похідної в момент перетину сигналом нульового рівня). В цьому випадку нуль процесу – це перетин осі абсцис знакозмінною функцією з нульовою постійною складовою. Кількість нулів шумового процесу має певні статистичні характеристики. У випадку аналізу адитивної суміші корисної складової сигналу (амплітудомодульованого гармонічного сигналу) та шуму дані характеристики змінюються. Ця властивість покладена в основу методу виявлення сигналів вихрострумівим неруйнівним контролем (ВСНК) на фоні шумів. Загальний алгоритм реалізації методу виявлення сигналів ВСП на фоні завод зображено на рис. 3.

Алгоритм отримання результуючого вектору нулів процесу  $Z[j]$  для сигнально-шумової суміші описується наступним чином: на початку алгоритму запускається зовнішній цикл, який реалізує сканування сигналу віконною функцією. На кожній ітерації зовнішнього циклу запускається внутрішній цикл, який реалізує процес підрахунку кількості нулів процесу всередині віконної функції. На кожній ітерації внутрішнього циклу проводиться перемноження значення поточного та наступного відліків сигналу. Якщо знак добутку від'ємний, між даними відліками міститься нуль процесу. У випадку виявлення чергового нуля процесу значення  $Z[j, m]$ , де  $m = 1 \dots M$  – номер відліку сигналу у вікні, збільшується на одиницю. Після завершення внутрішнього циклу відбу-

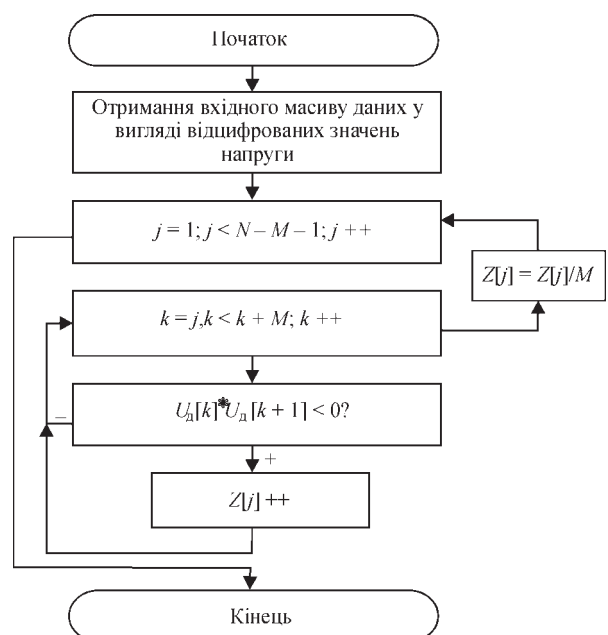


Рис. 3. Алгоритм реалізації методу виявлення сигналів ВСП на фоні шуму за кількістю нулів процесу

вається ділення отриманого результату  $Z[j, M]$  на значення апертури віконної функції з метою нормування результуючого вектору:  $Z[j] = Z[j, M]/M$ .

Важливою частиною дослідження є доведення можливості використання запропонованого методу для виявлення сигналів ВСД та його переваги над базовим за ресурсоемністю.

**Методика моделювання.** Моделювання процесу виявлення сигналів ВСД радіоімпульсної форми на фоні шумів проводилося в програмному середовищі MATLAB. Модельний експеримент складався з наступних етапів:

1. Формування послідовностей радіоімпульсів з гармонічним сигналом-носієм, зображених на рис. 1. Для подальшої обробки було обрано модель сигнально-шумової суміші некомпенсованого ВСП.

2. Проведення віконного опрацювання сигнально-шумової суміші з визначенням кількості нулів процесу у вікні аналізу в ковзному режимі.

3. Аналіз вектору нулів процесу  $Z[j]$ .

4. Реалізація ДПГ сигналу некомпенсованого ВСП та с/ш суміші некомпенсованого ВСП.

5. Отримання ФХС сигналу та сигнально-шумової суміші та розрахунок їх різниці.

6. Проведення ковзного віконного опрацювання різниці ФХС з розрахунком значення вектору  $r$ -статистики.

7. Побудова векторів  $r$ -статистики та нулів процесу  $Z[j]$ .

8. Розрахунок ефективності методів виявлення сигналів ВСД на фоні шумів.

9. Оцінювання ресурсоемності методів виявлення сигналів ВСД на фоні шумів.

**Параметри моделювання.** Для модельного експерименту було обрано наступні параметри: частота гармонічного сигналу-носія  $f = 1$  МГц; відношення с/ш = (1,2,5,10) для перевірки ефективності даних методів за різних відношень с/ш; частота дискретизації  $F_d = 12,8$  МГц; обсяг вибірки  $N = 25600$ ; апертура віконної функції  $M = 256$ , форма радіоімпульсів – гаусова, кількість імпульсів – 2.

**Аналіз результатів моделювання.** Перевірка ефективності методів виявлення сигналів ВСНК на фоні шумів проводилась шляхом розрахунку коефіцієнту ефективності  $K_{\text{еф}}$ , який для базового методу розраховується як  $K_{\text{еф}} = r_A / r_{\text{ш}}$ , де  $r_A$  – середнє амплітудне значення  $r$ -статистики на ділянках з корисною складовою сигналу,  $r_{\text{ш}}$  – середнє значення  $r$ -статистики шуму, а для запропонованого методу –  $K_{\text{еф}} = Z_n / Z_s$ , де  $Z_s$  – середнє значення вектору нулів процесу на ділянках з корисною складовою сигналу,  $Z_n$  – середнє значення вектору нулів процесу на ділянках тільки з шумом. Графічне зображення векторів  $r$ -статистики

та нулів процесу, отриманих в ході моделювання за відношення с/ш = 2, зображено на рис. 4.

Значення розрахованих коефіцієнтів ефективності методів за різних відношень с/ш наведено в таблиці.

Результати модельного експерименту засвідчили, що у випадку менших відношень с/ш метод виявлення сигналів за визначенням вектору  $r$ -статистики є більш ефективним, проте за умови відсутності повної компенсації напруги холостого ходу та внесеної напруги в ВСП, при збільшенні відношення с/ш використання даного методу виявлення сигналів є неефективним. В свою чергу метод виявлення сигналів за кількістю нулів процесу має більшу ефективність за більших значень відношення с/ш.

Також в ході модельного експерименту проводилось оцінювання ресурсоемності даних методів, основною оцінкою якої був час, витрачений на проведення розрахунку результуючих векторів  $r$ -статистики та  $Z[j]$ .

Модельний експеримент проводився на персональному комп'ютері з наступними технічними характеристиками:

- тактова частота процесору – 3,9 ГГц;
- кількість ядер/потоків процесору – 6/12;
- об'єм оперативної пам'яті – 16 Гб;
- частота роботи оперативної пам'яті – 3,2 ГГц.

Розрахунок часу, необхідного для виконання алгоритмів виявлення сигналів кожного з методів, проводився шляхом використання функцій `tic` та `toc` вбудованого `Start stopwatch` таймера MATLAB. Час роботи алгоритму базового та запропонованого методів наведено в таблиці. Велика різниця

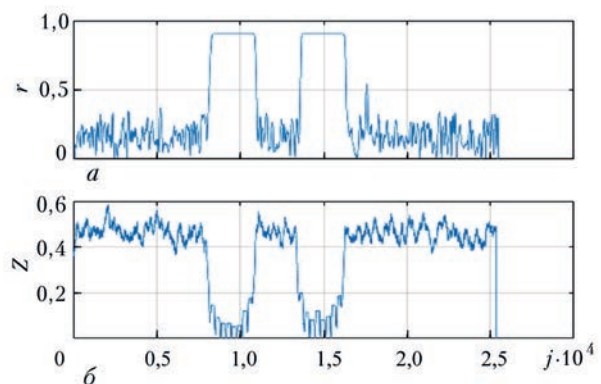


Рис. 4. Вектор  $r$ -статистики (а) та вектор нулів процесу  $Z[j]$  (б)

**Значення  $K_{\text{еф}}$  та ресурсоемності методів виявлення сигналів ВСНК**

с/ш	$K_{\text{еф}}$		Ресурсоемність, мс	
	Метод $r$ -статистики	Метод нулів процесу	Метод $r$ -статистики	Метод нулів процесу
1	6	4.5	650	58
2	6	6	600	70
5	1,1	6	564	48
10	1	8	649	54



в часі виконання алгоритмів базового та запропонованого методів виявлення сигналів обумовлена відсутністю необхідності використання додаткових бібліотек в запропонованому методі, в той час як базовий метод потребує проведення ДПГ, розгортку фазових характеристик сигналів тощо.

Розроблення методу опрацювання сигналів ВСД малої ресурсоемності дасть змогу забезпечити виявлення дефектів за значного темпу надходження даних без суттєвого зменшення ймовірності результатів контролю та спростить їх схемотехнічну реалізацію.

**Висновки**

Досліджено можливість виявлення сигналів ВСД, які спостерігаються на фоні шумів, за умови неповної компенсації ВСП, шляхом розрахунку вектору нулів процесу при виконному опрацюванні в ковзному режимі. Виконано порівняння за ефективністю запропонованого методу та базового методу, який передбачає аналіз векторів r-статистик, визначених за фазовою характеристикою сигналу. Запропонований метод вільний від ряду недоліків базового, головним з яких є висока ресурсоемність його реалізації. Показано, що коефіцієнт ефективності запропонованого методу дає змогу виявляти сигнали ВСД на фоні шумів за низьких значень с/ш.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз застосування розглянутого методу для виявлення сигналів ВСД в реальних автоматизованих системах ВСНК та оцінювання його ефективності.

**Список літератури**

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. (2005). *Не разрушающий контроль и диагностика*. Справочник. Москва, Машиностроение.
2. (2004) *Nondestructive Testing Handbook*, Third Edition: Volume 5, Electromagnetic Testing. Satish S Udpa (technical editor), Patrick O'Moore (editor). ASNT.
3. Учанін В.М. (2013) *Накладні вихроструміві перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів СПОЛОМ.
4. Качанов В.К., Мозговий О.В., Піголін О.І. та ін. (1994) *Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів*. Навч. посібник. Бабак В.П. (ред.). Київ, ІС ДО.
5. Марченко Б.Г., Приймак М.В., Щербак Л.М. (2001) *Теоретичні основи аналізу стохастичних сигналів і шумів*. Навчальний посібник. Тернопіль, ТДТУ імені Івана Пулюя.

6. Карпаш О.М., Рибіцький І.В., Карпаш М.О. (2008) Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 31–35.
7. Соколов И.В. (2007) Сплит-способ ультразвукового контроля. *Дефектоскопия*, **12**, 3–17.
8. Тютякин А.В. (2012) О применении вейвлет-преобразования в спектральном анализе информативных сигналов систем неразрушающего контроля и диагностики. *Контроль. Диагностика*, **8**, 11–16.
9. Тихонов В.И. (1970) *Выбросы случайных процессов*. Москва, Наука.
10. Куц Ю.В., Редька М.О., Близняк О.Д. (2020) Метод виявлення сигналів вихрострумівого неруйнівного контролю на фоні шуму за кількістю нулів процесу. *VII Міжнарод. наук.-техн. конф. Метрологія, інформаційно-вимірвальні технології та системи МІВТС-2020*. Тези доповідей, 18-19 лютого 2020. Харків, сс. 71–72.
11. Куц Ю.В., Єременко В.С., Монченко О.В. та ін (2006) *Способ ультразвукового вимірювання товщини виробів. Патент на корисну модель № 35057 Україна*, МПК. G01B 17/02; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.
12. Fisher N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge, Cambridge University Press.

**References**

1. Klyuev, V.V., Sosnin, F.R., Kovalyov, A.V. et al. (2005) *Non-destructive testing and diagnostics: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. (2004) *Nondestructive Testing Handbook*. 3rd Ed. Vol. 5: Electromagnetic testing. Ed. by Satish S Udpa, P. O'Moore. ASNT.
3. Uchanin, V.M. (2013) *Put-on eddy-current transducers of double differentiation*. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
4. Kachanov, V.K. (1994) *Modern methods and means of ultrasonic testing using statistical processing of signals: Manual*. Ed. by V.P. Babak. Kyiv, IS DO [in Ukrainian].
5. Marchenko, B.G., Pryimak, M.V., Shcherbak, L.M. (2001) *Theoretical fundamentals of analysis of stochastic signals and noises: Manual*. Ternopil, TDTU [in Ukrainian].
6. Karpash, O.M., Ribitskii, I.V., Karpash, M.O. (2008) Substantiation of the possibility of using Barker codes to improve the sensitivity of ultrasonic contactless method of thickness measurement. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 31-35.
7. Sokolov, I.V. (2007) Split-method of ultrasonic testing. *Defektoskopiya*, **12**, 3-17 [in Russian].
8. Tyutyakin, A.V. (2012) On application of wavelet transformation in spectral analysis of informative signals of nondestructive testing and diagnostic systems. *Kontrol. Diagnostika*, **8**, 11-16 [in Russian].
9. Tikhonov, V.I. (1970) *Spikes of random processes*. Moscow, Nauka [in Russian].
10. Kuts, Yu.V., Eremenko, V.S., Monchenko, O.V. et al. (2006) *Method of ultrasonic measurement of product thickness. Ukraine pat. for utility model 35057, Int. Cl. G01B 17/02*. publ. 26.08.2008, Bull. 16 [in Ukrainian].
11. Fisher, N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge, Cambridge University Press.

**METHOD TO DETECT SIGNALS OF EDDY CURRENT FLAW DETECTION WITH SMALL COMPUTER RESOURCE CAPACITY**

M.O. Redka<sup>1</sup>, Yu.V. Kuts<sup>2</sup>, O.E. Levchenko<sup>1</sup>, O.D. Bliznyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chair of NDT Instruments and Systems of I.Sikorsky KPI. E-mail: y.kuts@ukr.net

<sup>2</sup>Scientific-Technical Laboratory of Technical Diagnostics and Nondestructive Testing in Aeronautical Engineering of NAU. E-mail: nau\_409@ukr.net

A method for processing the signals of eddy current flaw detection is proposed. It is based on determination of the number of zeros of the analyzed signal in the sliding mode. The method features low resources capability, has simple circuit implementation and can be used in automated systems of eddy current nondestructive testing. 13 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

*Keywords: eddy current flaw detection, automated eddy current testing, signal detection*

Надійшла до редакції 26.06.2020

# СЛУЖБОВІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕЙ 09Г2С, 14ХГС І СТАЛІ 20 ПІСЛЯ ТРИВАЛОГО ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

С.А. Недосєка, А.Я. Недосєка, М.А. Яременко, М.А. Овсїєнко

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

Сталі 09Г2С, 14ХГС і сталь 20 входять до переліку найбільш застосованих для виготовлення будівельних конструкцій. Більшість газопроводів також виготовлені саме з цих сталей. Представляє значний інтерес зміна властивостей цих матеріалів у різноманітних умовах експлуатації з урахуванням часу і порушення експлуатаційних умов. Дослідження показують, що середовище та умови експлуатації, а також продукт, який транспортується трубопроводом, грають досить істотну роль у зміні їх властивостей з плином часу. Найбільш тонкі службові характеристики цих матеріалів може допомогти виявити технологія, заснована на акустичній емісії. Наведені нижче дослідження присвячені застосуванню АЕ для цих цілей. Бібліогр. 15, рис. 5.

*Ключові слова:* акустична емісія, АЕ активність, пошкодження, руйнування матеріалів, ударна в'язкість, навантаження

Службові властивості матеріалу являють собою характеристики, які виявляються при роботі матеріалу безпосередньо у реальних конструкціях. Вони є значно більш різноманітними, ніж ті, які визначаються для матеріалу при стандартних лабораторних випробуваннях зразків.

Дослідження зміни ударної в'язкості сталей 09Г2С, 14ХГС і сталі 20, які відпрацювали тривалий час у газопроводах, показало, що з плином часу ці властивості змінюються у бік зменшення (рис. 1, а). Ударну в'язкість визначали експериментально на стандартних зразках 10×10×55 мм з концентратором  $r = 0,25$  мм [1]. Зразки виготовляли з вирізок, отриманих з діючих газопроводів під час зупинки на проведення ремонтних робіт. Термін експлуатації вказано на момент вирізання зразків. Початкові значення ударної в'язкості визначали для матеріалу запасних труб.

Падіння ударної в'язкості для труб, по яких транспортується газ, викликане, найімовірніше, проникненням атомарного водню в стінку труби з подальшим перетворенням його в молекулярний з різким збільшенням об'єму молекули, пов'язаним з поглинанням частини енергії, наявної на поверхнях мікротріщини. Останнє призводить до розвитку мікротріщини [1, 2–12]. Тривала експлуатація трубопроводів у такому стані веде до поступового зниження механічних властивостей матеріалу труби. На рис. 1, б представлені фотографії зруйнованих під час випробування на ударну в'язкість зразків.

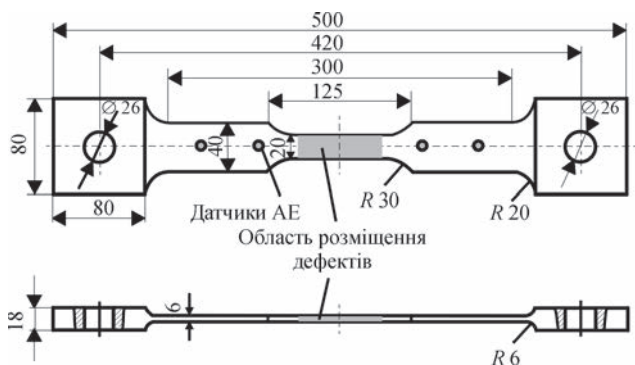
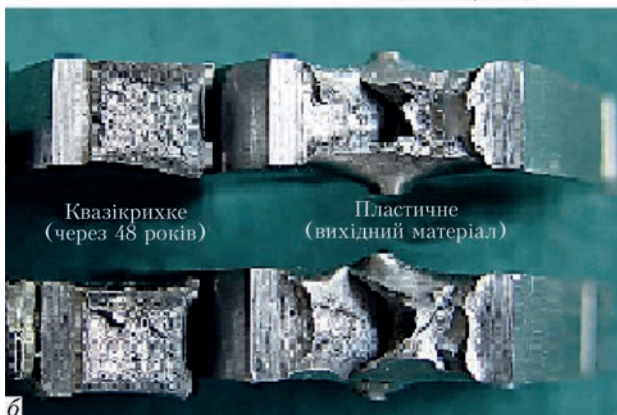
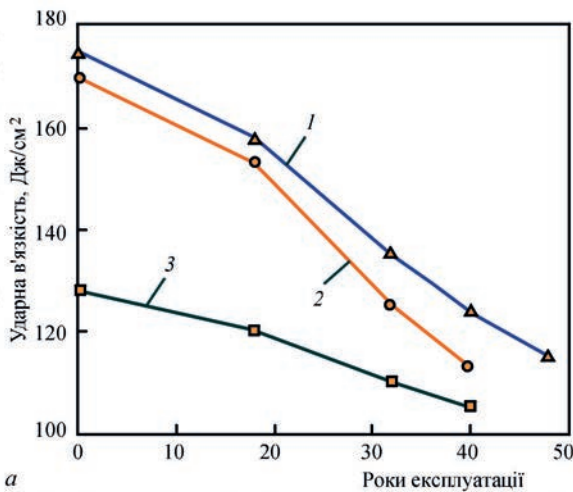


Рис. 1. Зміна властивостей сталей: а – властивості сталей 09Г2С, 20 і 14ХГС; б – пластичне і крихке руйнування сталі 20 в залежності від часу експлуатації

Рис. 2. Зразок для проведення випробувань з застосуванням АЕ технології

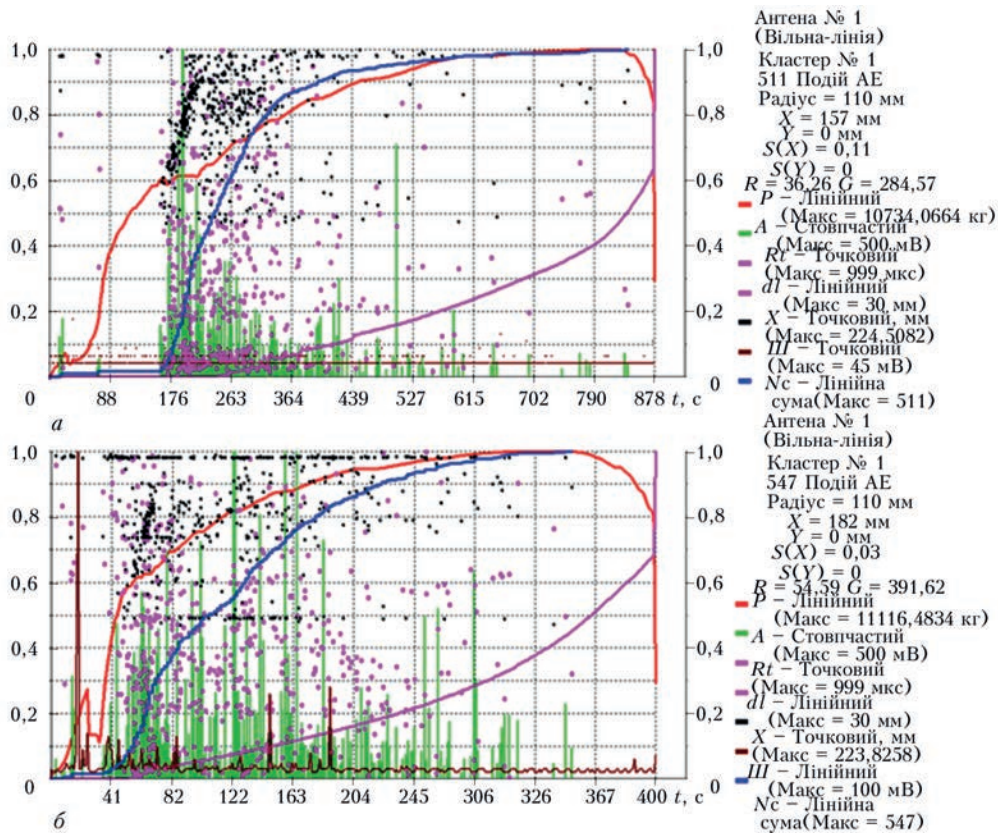


Рис. 3. Діаграми з графіками АЕ інформації при випробуванні зразків зі сталі 20: а – після 48 років експлуатації; б – вихідний матеріал. Праворуч від графіка у таблиці показані: dl – подовження зразка, мм (рожева крива), P – навантаження, кг (червона), A – амплітуда АЕ подій, мВ (зелені стовпчики), N – сума подій АЕ, пошкодження (синя), Rt – час наростання сигналу АЕ (рожеві точки), III – неперервна АЕ, що носить характер постійного шумового фону (чорна), K – координати кожної події АЕ (чорні точки). Граничні значення кожної вимірюваної величини показано у специфікації в правій частині діаграми. У специфікації також наведено радіус кластера, в якому об'єднувалися АЕ події, місце руйнування зразка X, мм, похибка вимірювання координат АЕ подій S(X), мм

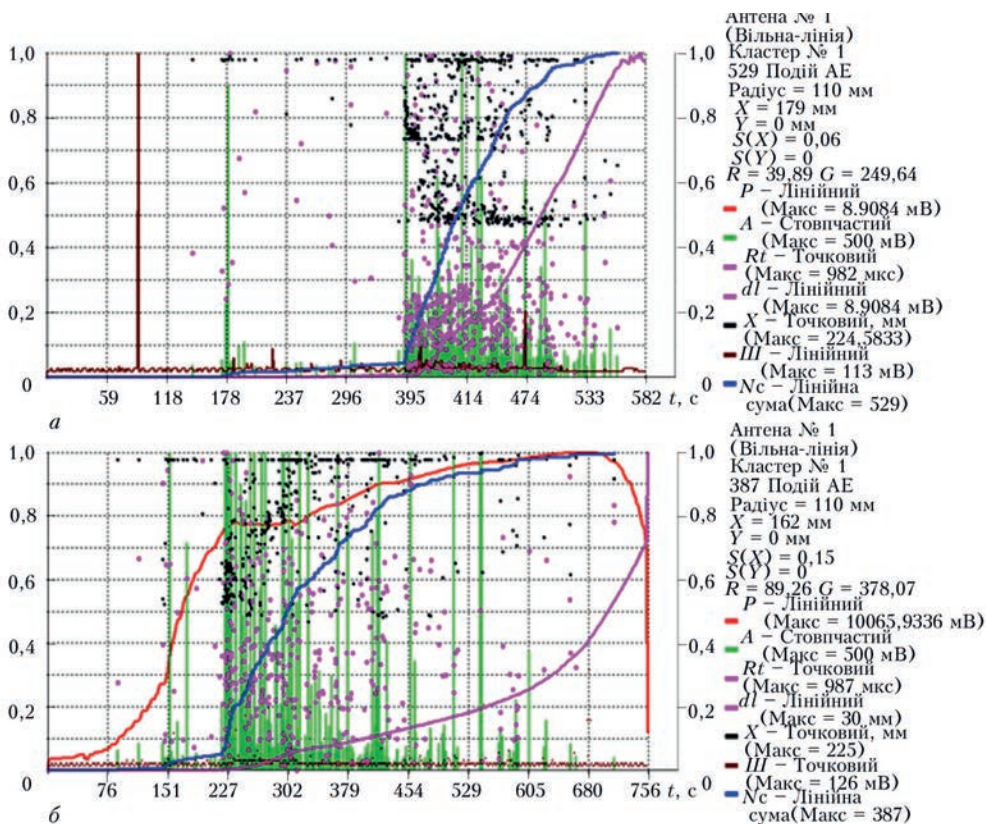


Рис. 4. Діаграми з графіками АЕ інформації при випробуванні зразків зі сталі 09Г2С: а – для матеріалу через 41 рік експлуатації труби; б – для вихідного матеріалу. Позначення як на рис. 3

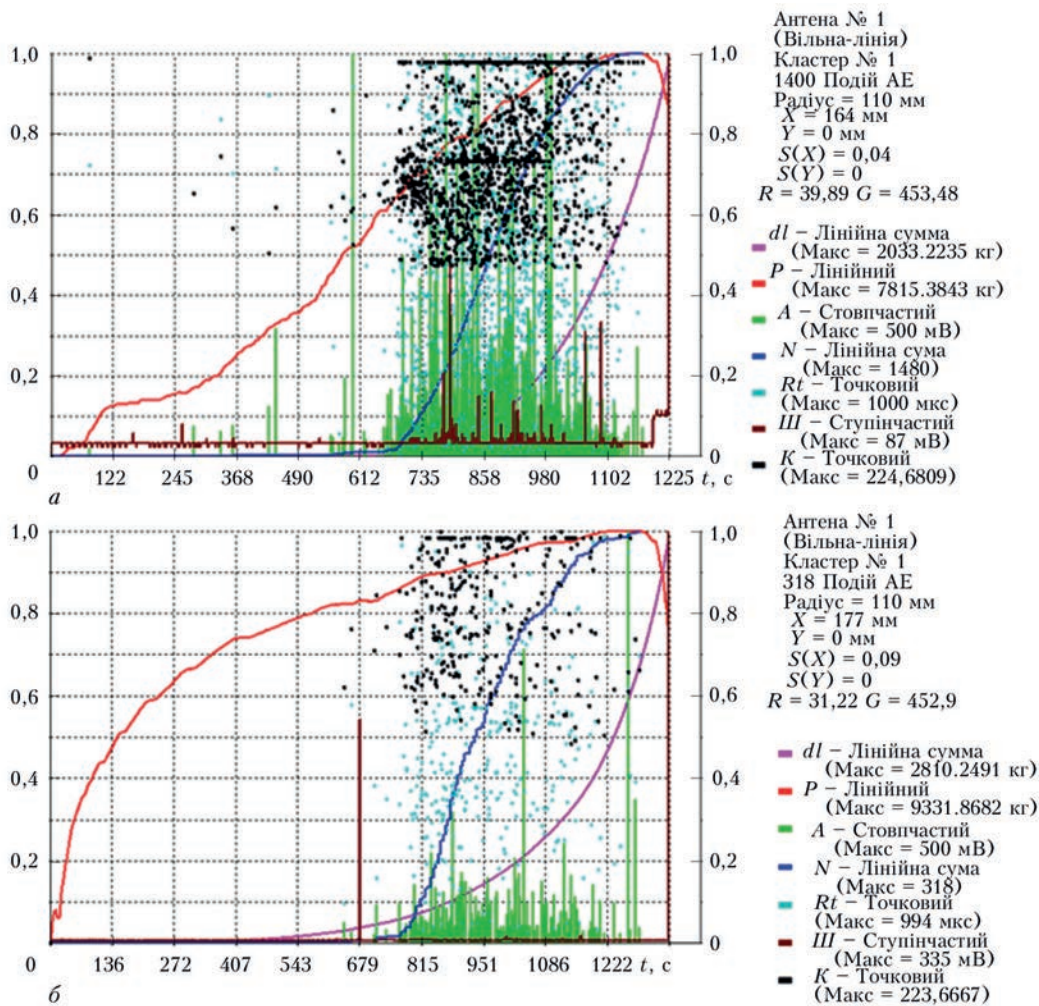


Рис. 5. Діаграми з графіками АЕ інформації при випробуванні зразків зі сталі 14ХГС: а – для матеріалу через 40 років після початку експлуатації труби; б – для вихідного матеріалу. Позначення як на рис. 3

Зразки на фото (рис. 1, б) розташовані за ступенем накопичених пошкоджень у послідовності справа наліво. Праворуч – вихідний матеріал, що не був у експлуатації. Його руйнування при випробуваннях відбувалося шляхом швидкої пластичної плинності. Ліворуч показані зруйновані під час випробування зразки сталі 20 через 48 років експлуатації підводної частини газопроводу Яготин–Черкаси. Руйнування цих зразків – квазікрихке. Дослідження матеріалів труб з застосуванням АЕ дозволило більш детально вивчити поступову зміну властивостей матеріалів, а також особливості навантаження труби при її експлуатації. Для дослідження стану матеріалів труб використовували стандартні зразки першого типу [1] для АЕ випробувань (рис. 2). Для руйнування зразків використовували розривну машину з гідравлічним приводом Р-20.

Діаграми з графіками розвитку руйнування при АЕ випробуваннях стандартних зразків (рис. 3–5) отримані приладом ЕМА-3.

АЕ діаграми параметрів АЕ, отримані для сталі 20 через 48 років експлуатації і в початковому стані, показані на рис. 3.

Представлені на діаграмі графіки детально описують процес руйнування сталі при розтягуванні зразка. В першу чергу слід відзначити, що АЕ почала виникати не з моменту навантаження зразка, а трохи пізніше – з урахуванням ефекту Кайзера, коли АЕ з'являється тільки при перевищенні навантаження над тим, до якого вже навантажували матеріал (рис. 3, а)<sup>1</sup>. У даному випадку видно, що це навантаження складає (рис. 3):  $0,6 \times 10735 = 6441$  кг, що відповідає напруженню 314,3 МПа.

Таким чином, у процесі експлуатації матеріал труби зазнавав навантаження, що перевищують нормоване значення межі плинності для сталі 20, що складає 280 МПа. Природно, це призводило до більш інтенсивного процесу утворення та накопичення пошкоджень. Число пошкоджень зростає (на графіках – синя крива), але в якийсь момент часу зростання сповільнюється [6, 8–11, 13–15].

<sup>1</sup> Незважаючи на наявність ефекту Кайзера, певне число АЕ подій виникає і в період його дії, що пов'язано з підростанням або виникненням нових дефектів у процесі попереднього експлуатаційного напруження. Цей процес досить наочно ілюструє рис. 3, а.

Як тільки навантаження розтягу перевищило навантаження зони тиші, з'являються перші АЕ події, інтенсивність яких наростає так само, як і кількість пошкоджень. За кривою зростання навантаження видно, що після нетривалої плинності матеріалу починається його зміцнення, що супроводжується зменшенням числа АЕ подій і величини часу наростання сигналу до максимуму амплітуди. Останнє підтверджує зміцнення матеріалу. Обсяг пошкоджень, що виникають, зменшується [6]. Нарешті, настає момент, коли число пошкоджень досягло критичної величини і відбувається руйнування.

Як видно з діаграми (рис. 3, б), пошкодження накопичуються рівномірно, розподіляючись по всьому контрольованому об'єму зразка, за винятком області початку пластичної плинності, коли координати пошкоджень зосереджені в цій області. Деяко по-іншому поводить себе сталь, що знаходилась у експлуатації протягом 48 років (рис. 3, а).

Тут найбільша скученість АЕ подій зосереджена в області пластичних деформацій і в області зміцнення. Далі, зі збільшенням руйнівного навантаження їх кількість стає все менше.

Загалом було зареєстровано 541 пошкодження, що призвело у кінцевому рахунку до руйнування. Пошкодження розвиваються зі зміцненням, про що свідчить зменшення часу  $Rt$ . Руйнування стає все більш крихким, про що свідчать випробування зразків з цієї сталі на ударну в'язкість (рис. 1, б).

Слід відзначити суттєві коливання неперервної емісії, коли процес утворення пошкоджень стає лавиноподібним. Можна також спостерігати, що області пластичної плинності спостерігаються окремими ділянками практично на всьому етапі навантаження зразка. Про це свідчать численні горизонтальні площадки на всій кривій навантаження.

Графіки (рис. 3, б) різко відрізняються від отриманих для матеріалу з терміном експлуатації 48 років (рис. 3, а). АЕ події з'являються з самого початку навантаження. Неперервна емісія показує активні сплески тільки на початковому періоді навантаження, що найімовірніше свідчить про інтенсивні переміщення дислокацій у цей момент часу. Інтенсивність накопичення пошкоджень триває довше, ніж на рис. 3, а, і тільки на останній, заключній стадії процес стабілізується. Амплітуди АЕ подій і час їх наростання протягом випробування весь час змінюються. Це говорить про монотонний стабільний розвиток руйнування матеріалу. Координати АЕ подій у даному випадку чітко зосереджуються в області майбутнього руйнування (чорні точки у верхній частині графіка).

Порівнюючи графіки на рис. 4, можна відзначити, що сталь 09Г2С у процесі експлуатації також піддавалася перевантаженням з незначним перевищенням тиску, який викликав напруження

вище межі плинності (реальна межа плинності сталі на момент контролю – 361,3 МПа, табличне значення – 295 МПа).

Порівнюючи графіки на рис. 5, можна відзначити, що і сталь 14ХГС у процесі експлуатації також піддавалася перевантаженням з незначним перевищенням тиску і, відповідно, накопиченню множинних пошкоджень, про що, зокрема, свідчить збільшення кількості подій АЕ приблизно у 4 рази.

Можна зробити загальний висновок за всіма випробуваними сталями: у процесі тривалої експлуатації в них досить інтенсивно накопичуються пошкодження. Як показують дослідження, найбільш схильні до накопичення пошкоджень з плином часу сталі 14ХГС і 09Г2С. Джерелом пошкоджень, за думкою авторів, в основному є гази, що вільно проникають у метал на атомарному рівні. Надалі наявність поверхневої енергії на наявних мікротріщинах призводить до появи у них молекулярного водню, при цьому розмір молекули значно більше розміру атома, і, що найістотніше, перевищує розміри кристалічної решітки металу. Останнє призводить до локального розриву решітки та розвитку дефекту [10]. Ділянки, на яких відбувається дане явище, з напрацюванням поступово збільшуються. В результаті утворюються мікро-, а потім і макропори, які є основою для подальшого виникнення макротріщини. У цьому випадку злам зразка наочно демонструє пористу структуру, а насиченість порами залежить від експлуатаційного напрацювання.

## Висновки

Дослідження АЕ активності розглянутих матеріалів – сталей 09Г2С, 14ХГС і сталі 20 показує, що матеріали труб, які перебували у процесі експлуатації, зазнавали при цьому перевантаження. Кількісні показники перевантаження досить надійно визначаються ефектом Кайзера.

Інформацію про перевантаження в конструкції можна отримати без зупинки експлуатації за даними АЕ випробувань.

Показано, що інтенсивність накопичення пошкоджень у процесі експлуатації конструкції і їх кількість в значній мірі залежать від вихідного стану матеріалу.

Аналіз руйнування матеріалів дозволяє при застосуванні акустичної емісії досить повно оцінити цей процес і визначити умови, у яких проводилася експлуатація конструкції.

## Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: монография. 5-те изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.)*. Киев, Индпром.
2. Бриджмен Н. (1955) *Исследование больших пластических деформаций и разрыва*. Москва, Изд-во иностр. лит.

3. Волков В.А. (1980) *Основные результаты всеоюзного базового эксперимента по механике разрушения на низкопрочной стали*. В книге: Проблемы разрушения металлов. Москва, МДНТН, 3–22.
4. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г. (1988) *Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов*. Киев, АН УССР. Препринт.
5. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2014) Особенности применения метода акустической эмиссии при контроле разрушения материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 3–11.
6. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашова Л.И. и др. (2018) Исследование методом акустической эмиссии кинетики накопления повреждений при разрушении материалов. *Там же*, **4**, 3–10.
7. Недосека А.Я., Недосека С.А., Овсиенко М.А. и др. (2016) Испытание сосудов давления международной группой специалистов. *Там же*, **3**, 3–10.
8. Недосека С.А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Там же*, **2**, 3–9.
9. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Там же*, **1**, 9–16.
10. Патон Б.Е. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение*. Киев, Изд-во «Индпром».
11. Скальський В.Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 29–36.
12. Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Лебедев А.А. (1993) Исследование кинетики разрушения сталей на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии. *Проблемы прочности*, **12**, 14–21.
13. Stone, D.E., Dingwall, P.F. (1977). Acoustic Emission parameters and their interpretation. *NDT international*, **10**, 51–56.
14. Nakamura, Yosio, Veach, C. L., McCauley, B.O. (1971) *Amplitude distribution of acoustic emission signals. A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour, 7-8 December, pp. 164–186.
15. Tetelman, A.S., Chow, R. (1971) *Acoustic emission testing and micro cracking processes. A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour. 7-8 December, pp. 30–40.
2. Bridgman, N. (1955) *Investigation of high plastic deformations and ruptures*. Moscow, Inostr. Lit-ra [in Russian].
3. Volkov, V.A. (1980) *Main results of an All-Union basic experiment of low-strength steel fracture mechanics*. In book: Problems of fracture of metals. Moscow, MDNTN, 3-22 [in Russian].
4. Lebedev, A.A., Chausov, N.G. (1988) *Express-method of assessment of crack resistance of ductile materials*. Kiev, AS of Ukr.SSR [in Russian].
5. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2014) Features of application of acoustic emission method at destructive testing of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3-11 [in Russian].
6. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I. et al. (2018) Investigation by acoustic emission method of the kinetics of damage accumulation at fracture of materials. *Ibid.*, **3**, 3-13 [in Ukrainian].
7. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Ovsienko, M.A. et al. (2016) Testing of pressure vessels by an international expert team. *Ibid.*, **3**, 3-10 [in Russian].
8. Nedoseka, S.A. (2007) Forecasting the fracture by the data of acoustic emission. *Ibid.*, **2**, 3-9 [in Russian].
9. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Ibid.*, 9-16 [in Russian].
10. Paton, B.E. (2012) *Acoustic emission and life of structures: Theory, methods, technologies, means, application*. Kiev, Indprom [in Russian].
11. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solids, based on acoustic emission signals. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 29-36 [in Russian].
12. Chausov, N.G., Nedoseka, S.A., Lebedev, A.A. (1993) Study of kinetics of steel fracture at final stages of deformation by acoustic emission method. *Problemy Prochnosti*, **12**, 14-21 [in Russian].
13. Stone, D.E., Dingwall, P.E. (1977) Acoustic emission parameters and their interpretation. *NDT Intern.*, **10**, 51-56 [in Russian].
14. Nakamura, Yosio, Veach, C.L., McCauley, B.O. (1971) *Amplitude distribution of acoustic emission signals. A Symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials* (Bal Harbour, 7-8 December, 1971), 164-186.
15. Tetelman, A.S., Chow, R. (1971) *Acoustic emission testing and microcracking processes. A Symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials* (Bal Harbour, 7-8 December, 1971), 30-40.

References

SERVICE PROPERTIES OF 09G2S, 14KHGS STEELS AND STEEL 20 AFTER LONG-TERM OPERATION


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

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


09G2S, 14KhGS steels and steel 20 are on the list of those the most widely applied for building structure fabrication. The majority of gas pipelines are also made exactly from these steels. Changing the properties of these materials under diverse operating conditions, taking into account the time and violation of operating conditions, is of considerable interest. Investigations show that the environment and operating conditions, as well as the product transported by the pipeline, have a quite significant role in the change of their properties over time. A technology based on acoustic emission, can help reveal the finest service properties of these materials. Investigations presented below are devoted to AE application for these purposes. 15 Ref., 5 Fig.

Keywords: acoustic emission, AE activity, damage, material fracture, impact toughness, load

Надійшла до редакції 05.11.2019



BULGARIAN  
ACADEMY  
of SCIENCES  
1869




UNION OF SCIENTISTS IN BULGARIA

**Materials, Methods & Technologies**

22 Міжнародна конференція  
29.08 – 01.09 2020  
Бураєс, Болгарія

<https://www.sciencebg.net/en/conferences/materials-methods-and-technologies/>

**SCIENCE & EDUCATION FOUNDATION**



# АНАЛІЗ НАПІВЕМПІРИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ В ОБ'ЄМНИХ ПОШКОДЖЕННЯХ НА ПОВЕРХНІ ТРУБОПРОВОДУ

П.С. Юхимець<sup>1</sup>, Л.Я. Юрко<sup>1</sup>, С.В. Кобельський<sup>2</sup>, В.І. Кравченко<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

В роботі проведено порівняльний аналіз деяких рівнянь для розрахунку напружень в зоні корозійних пошкоджень на поверхні трубопроводу. В якості еталонних значень використовувались результати розрахунків напружень МСЕ в зоні об'ємних поверхневих дефектів. Геометричні параметри, необхідні для проведення розрахунків, були представлені у вигляді відповідного набору випадкових незалежних величин, які варіювали в певних межах. Визначено залежності, застосування яких забезпечує помірно консервативні величини і відносно вузький діапазон занижених значень ККН, що є оптимальними при проведенні розрахунків максимальних напружень в дефектах, відповідно, на зовнішній та внутрішній поверхнях. Бібліогр. 19, табл. 3, рис. 5.

*Ключові слова:* концентрація напружень, корозійні дефекти, трубопроводи

Особливостям розрахунку концентрації напружень, зумовленої наявністю об'ємних поверхневих дефектів (ОПД), приділяється достатньо велика увага в науково-технічній літературі. Розподіл напружень поблизу поверхневого поглиблення є достатньо близьким до поля напружень наскрізного отвору і, внаслідок цього, може служити кращому розумінню особливостей напружено-деформованого стану пошкодженого трубопроводу. Тому, перш ніж перейти до аналізу залежностей для розрахунку концентрації напружень в об'ємному поверхневому дефекті, коротко зупинимось на результатах досліджень в цій області, наведених в довідковому виданні [1] та деяких інших роботах, що стосуються отворів.

Задача одноосового розтягу кругового отвору в нескінченній пластині була вирішена Кіршем [2]. В цьому випадку коефіцієнт концентрації напружень (ККН)  $\alpha_\sigma = 3,0$ . В разі циліндричної оболонки, навантаженої внутрішнім тиском [3–5], мінімальне значення концентрації  $\alpha_\sigma = 2,5$ . При значеннях концентрації  $\alpha_\sigma < 10$  максимальні напруження виникають в точках перетину контуру отвору з осьовою площиною симетрії труби. Зі зростанням концентрації напружень ( $\alpha_\sigma > 10$ ) точки максимальних напружень поступово відхиляються від осьового напрямлення. Концентрація напружень зростає разом з безрозмірним коефіцієнтом  $\beta$  (1) – внаслідок збільшення діаметру отвору  $r_0$ , зменшення радіусу серединної поверхні циліндричної оболонки  $R$  та товщини оболонки  $h$ :

$$\beta = \frac{r_0}{\sqrt{Rh}} \frac{(3(1-\mu^2))}{2}, \quad (1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу.

Розглянуті оболонки є одночасно пологими і тонкостінними. Відношення  $r_0/R$  (пологість) та  $h/R$  (тонкостінність) набувають відносно невеликі значення.

Для еліптичного отвору з осями  $a$  і  $b$ , зорієнтованими вздовж твірної та направляючої оболонки, відповідно:

$$r_0 = \frac{a+b}{2}$$

Залежність концентрації напружень на контурі еліптичного отвору в крайніх точках осі  $a$ , розрахована відповідно до [6], розглянута на прикладі труби 1000×12 мм (рис. 1), для трьох співвідношень  $a/d$ : 0,5; 1 та 2, в залежності від довжини осі  $a$ . Як бачимо, напруження по кінцях осі  $a$  в звужених еліптичних отворах вище, ніж в кругових.

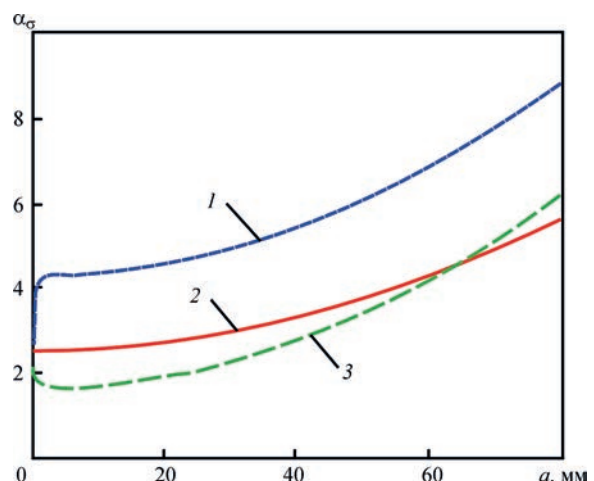


Рис. 1. Концентрація напружень на контурі еліптичного отвору в трубі 1000×12 мм (1, 2 й 3 відповідають співвідношенню  $a/d$ : 2; 1 та 0,5, відповідно)

Юхимець П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-8824-9024>, Кравченко В.І. – <https://orcid.org/0000-0003-1641-2336>

© П.С. Юхимець, Л.Я. Юрко, С.В. Кобельський, В.І. Кравченко, 2020

В роботі [7] розглянуто однорідне, нескінченне пружне рівномірно навантажене тіло з порожниною у формі тривісного еліпсоїда, напрямком осей якого збігається з напрямками напружень. Хоча еліпсоїд не відноситься до ОПД, проте є досить їх близьким аналогом і, крім того, одним з нечисленних прикладів точного рішення в даній області. На підставі отриманих результуючих рівнянь встановлено, що розподіл напружень навколо порожнини еліпсоїда залежить від значень головних напружень  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , що прикладені в нескінченності, співвідношення осей еліпсоїда, а не абсолютних значень їх довжини.

Концентрація напружень внаслідок наявності мілких сферичних поглиблень на обох сторонах 1-осьово розтягнутої пластини з діаметром в 4...5 разів більшим, ніж товщина пластини, виявляється незначною – нижчою, ніж у випадку наскрізного отвору [3]. Отримані результати поширюються й на рівномірний 2-осьовий розтяг. За таких великих радіусів поглиблення зростання напружень відбувається, головним чином, за рахунок потоншення зразка, а не концентрації напружень. Мілкі сферичні поглиблення часто використовуються як засіб для усунення невеликих дефектів на поверхні конструкції.

В роботі [8] було визначено коефіцієнт  $\alpha_\sigma = 2,23$  для випадку рівномірного розтягу напівнескінченного тіла з напівсферичним поглибленням. Під час рівномірного 2-осьового розтягу пластини з гіперболічним поглибленням величина коефіцієнту  $\alpha_\sigma$ , в залежності від розмірів поглиблення, змінювалась в межах 3,4...3,8 [10], що перевищує значення напружень для кругового отвору.

В роботі [10] представлено аналіз та узагальнення розрахункових та експериментальних досліджень локального НДС і міцності пластин та оболонок з ненаскрізними ушкодженнями, що мають різну геометрію, до яких відносяться подряпини, корозійні плями, поверхневі тріщини. Як наголошується, аналітичне розв'язання задачі оцінки параметрів НДС в зоні ненаскрізного отвору є вельми складним, існуючі рішення отримані для нескінченної пластини з напівсферичним потоншенням. В практиці інженерних розрахунків набули поширення, поряд з розрахунками МСЕ, напівемпіричні залежності, деякі з яких стосуються ОПД на поверхні трубопроводу під внутрішнім тиском. У зв'язку з можливими розбіжностями результатів при розрахунку ККН, у цій роботі було поставлено завдання порівняльного аналізу зазначених рівнянь з метою подальшого обґрунтованого використання, в тому числі, при розрахунку циклічної міцності пошкоджених трубопроводів.

Згідно роботи [11] рівень навантаження можна охарактеризувати коефіцієнтами концентрації

кільцевих  $\alpha_0$  і поздовжніх  $\alpha_z$  напружень, що виникають в дефектній зоні труби з зовнішнім діаметром  $D_o$  і товщиною стінки  $h$ , що представляється виїмкою глибиною  $b$ , довжиною  $2c$  уздовж осі труби і кутовим розміром  $\Theta$  в кільцевому напрямку (ширина дефекту  $2d$  дорівнює  $\Theta D_o/2$ ), під дією кільцевих  $\sigma_{\thetaном}$  і поздовжніх  $\sigma_{zном}$  номінальних напружень:

$$\alpha_0 = \frac{1 + \eta \alpha_0}{2\eta} + \frac{1 - \eta \alpha_0}{2\eta} th \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} (\hat{L} + \eta \pi - \pi) \right], \quad (2)$$

$$\text{де } \alpha_z = \frac{\pi \eta + 2(1 - \eta) \sin \gamma}{\eta [\pi - \gamma(1 - \eta)]} + \frac{(\alpha_0 - 1)(\pi - \gamma)}{\pi},$$

$$\eta = \frac{h - b}{h}, \quad \alpha_0 = 3 - 2^{\frac{3\eta - 1}{2\eta}}, \quad \hat{L} = \frac{L}{\sqrt{R(h - b)}}, \quad \gamma = \frac{\Theta}{2}.$$

Залежності (2) отримані на основі результатів скінчено-елементного аналізу в широкому діапазоні відношень розмірів труб та дефектів ( $h/R = 0,015...0,030$ ;  $2c/R = 0,01...3,0$ ;  $\Theta = 1...360^\circ$ ;  $b/h = 10...90\%$ ) окремо для кільцевих і поздовжніх напружень.

У статті [12] вираз для коефіцієнта концентрації напружень в одиночних виразах трубопроводів теплових мереж має вигляд:

$$\alpha_\sigma = 1 + 3,57 \frac{b}{2d} \left[ \frac{1,12 - 0,9b/2c}{1 - b/h(1 - 1,5b/2c)} \right] \quad (3)$$

Згідно роботи [12] максимальне напруження в дефекті:

$$\sigma_{max} = \alpha_\sigma \sigma_{nt}, \quad (4)$$

де  $\sigma_{nt}$  – напруження в перерізі, де знаходиться виразка:

$$\sigma_{nt} = \sigma_r h / (h - b),$$

де  $\sigma_r$  – номінальне напруження.

Розроблена в ІЕЗ інженерна методика оцінки залишкового ресурсу елементів трубопроводу з об'ємними поверхневими дефектами [13] в якості одного з кроків з визначення локального напружено-деформованого стану включає розрахунок ККН в зоні дефекту за запропонованою в [14] залежністю (5), в основу якої покладено вираз для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень в напівеліптичній тріщині з тією ж довжиною та глибиною, що має напівеліпсоїд, що описує пошкодження:

$$\alpha_\sigma = 1,4 \left\{ 1 + \frac{2 \frac{b}{d} [1,12 - 0,48 \frac{b}{c} + 0,13 \frac{b}{c} (3 \frac{b}{c} - 2 - \frac{b}{h})]}{1 - \frac{b}{h} (1 - 0,75 \frac{b}{c})} \sqrt{1 + \frac{5\pi \lambda^2}{32}} \right\} \quad (5)$$

де  $\lambda$  – функція, що враховує кривизну поверхні:

$$\lambda^2 = \frac{c^2}{Rh} [12(1 - \mu^2)]^{1/2}$$



Коригуючий коефіцієнт 1,4 був введений у вираз (5) після експериментальної перевірки, виконаної в ІЕЗ на натурному зразку труби 322×7 (Ст 20) [15]. Зіставлення експериментальних даних з результатами розрахунку МСЕ виявило досить близьку відповідність (відносна похибка в межах 15 %), що дозволило надалі в рамках даного дослідження прийняти результати розрахунків НДС в зоні об'ємних дефектів на поверхні трубопроводу під впливом внутрішнього тиску, за використання пакету програм [16], в якості еталонних значень. Розрахунки напружено-деформованого стану виконувались в пружній постановці на основі змішаних апроксимацій методу скінченних елементів з використанням просторових 8-ми вузлових елементів, побудованих на основі шестигранної призми з вузлами в її вершинах і центрі [17]. Переваги змішаних формулювань МСЕ полягають у зменшенні похибки апроксимації за напруженнями та деформаціями у порівнянні з такими для класичного МСЕ в формі методу переміщень, а також в можливості точного задоволення статичних граничних умов на поверхні тіла. Ще одна перевага полягає в тому, що змішана схема МСЕ дає безперервні апроксимації напружень і деформацій. В якості об'єкту розрахунку розглядалась прямолінійна ізотропна циліндрична оболонка (модуль пружності  $E = 210000$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\nu = 0,3$ ) під дією внутрішнього тиску 1 МПа, один торець якої жорстко закріплений, інший вільний для поздовжніх переміщень. Дефект трубопроводу моделювався половиною еліпсоїду, осями симетрії якого є найбільші розміри дефекту в осьовому, кільцевому і радіальному напрямках, що співпадають з напрямками осей оболонки.

Поставлена в роботі задача вирішувалась в наступній послідовності:

- формування масиву розрахункових варіантів і еталонних значень ККН;
- множинний регресійний аналіз еталонних значень;
- обрахунок масиву варіантів з використанням напівемпіричних залежностей та статистичний аналіз результатів.

**Таблиця 1. Результати розрахунку ККН**

N п/п	$D_0$ , мм	$h$ , мм	$b$ , мм	$c$ , мм	$b$ , мм	$\sigma_{i \max}^3$ , МПа	$\sigma_{i \max}^B$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$\alpha_\sigma^3$	$\alpha_\sigma^B$
31	245	24	8	30	24	7,64	7,93	4,0	1,9	2,0
32	245	28	12	33	38	7,27	6,52	3,4	2,2	1,9
33	245	15	7	12	8	15,77	19,00	6,7	2,4	2,8
34	245	10	6	50	42	45,86	21,00	10,2	4,5	2,1
35	245	9	2	35	27	19,81	15,99	11,4	1,7	1,4
36	245	25	10	24	33	7,46	8,44	3,8	1,9	2,2
37	245	28	8	5	12	5,08	6,85	3,4	1,5	2,0
38	245	21	11	15	46	10,19	10,83	4,6	2,2	2,3

Як свідчить досвід діагностування, форма об'ємних поверхневих дефектів відрізняється великим розмаїттям, а розміри – широтою діапазону. Таким чином, геометричні параметри трубопроводу (діаметр і товщина стінки), а також дефекту (довжина, ширина і глибина), що використовуються для визначення НДС в зоні пошкодження, можна представити у вигляді відповідного набору випадкових незалежних величин, які можуть варіюватися в певних межах.

Показність (відповідність властивостям генеральної сукупності) сформованої вибірки забезпечувалась за допомогою випадкового відбору (з використанням генератора випадкових чисел) всіх вихідних геометричних параметрів, необхідних для проведення розрахунку. Вибір діаметрів в діапазоні 57...600 та 630...820 мм проводився на базі сортаменту згідно з [18] й [19] відповідно. Діапазон товщини встановлювався в межах згідно з відповідним стандартом для даного діаметра труби.

Діапазони зміни розмірів дефекту відповідали обмеженням, встановленим для геометричної моделі розрахункової програми:

діапазон глибини  $b = (0,2 \dots 0,8) h_{ran}$ ,  
де  $h_{ran}$  – товщина труби у відповідному варіанті;  
напівдовжина дефекту  $c = (D_0 - b)/2 \times (0,03 \dots 0,46)$ ;  
напівширина дефекту  $d = (D_0 - b)/2 \times (0,03 \dots 0,46)$ .

Кожен з варіантів вибірки обраховувався двічі – при розташуванні дефекту на зовнішній і внутрішній поверхні. Число варіантів вибірки – 80, встановлювалося з урахуванням того, що достатнє для проведення статистичного аналізу число спостережень повинне перевищувати число незалежних змінних в 10...20 разів.

В якості прикладу в табл. 1 наведені вихідні дані (сформована вибірка) і відповідні результати розрахунку МСЕ для пошкоджень труби  $D_n 245$ .

В табл. 1 додатково використані наступні позначення:

$\sigma_{i \max}^3, \sigma_{i \max}^B$  – максимальна інтенсивність напружень в дефекті при його розташуванні на зовнішній та внутрішній поверхні, відповідно;

$\alpha_\sigma^3, \alpha_\sigma^B$  – ККН в дефекті при його розташуванні на зовнішній та внутрішній поверхні, відповідно;

$\sigma_{in}$  – інтенсивність номінальних напружень.

Вибіркові характеристики результатів розрахунку ККН методом скінчених елементів в дефектах на внутрішній та зовнішній поверхнях є близькими за значеннями (табл. 2).

При цьому відношення індивідуальних значень концентрації напружень при рівності геометричних параметрів дефекту і труби знаходяться в діапазоні 0,3...3,6 (рис. 2), коефіцієнт кореляції ККН на внутрішній і зовнішній поверхнях становить 0,47.

Множинний регресійний аналіз виконувався окремо для результатів розрахунку ККН в дефектах на внутрішній і зовнішній поверхні. Аналіз був виконаний для визначення залежності ККН від геометричних параметрів пошкодженої труби і розмірів дефекту та отримання відповідних регресійних рівнянь.

Попередньо було досліджено відповідність результатів розрахунків нормальному розподілу як для вихідних значень концентрації  $\alpha_{\sigma}$ , так і перетворених значень  $\ln(\alpha_{\sigma})$  та  $1/\alpha_{\sigma}$ . Найбільш близьку відповідність нормальному закону розподілу, що перевірялась за допомогою критерія хі-квадрат, продемонструвало перетворення  $1/\alpha_{\sigma}$ , для якого нульова гіпотеза може бути прийнята, у випадку

Змінна	$M$ – середнє значення	$S$ – стандартне відхилення
$\alpha_{\sigma}^3$	2,46	1,09
$\alpha_{\sigma}^B$	2,46	1,06

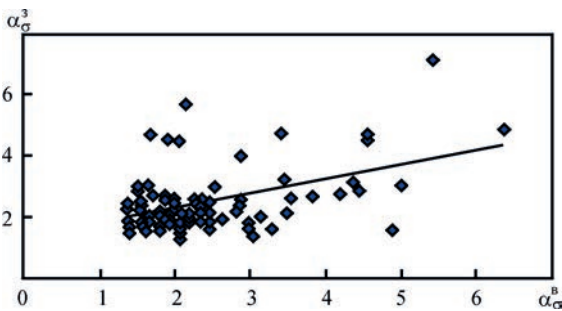


Рис. 2. ККН дефектів з однаковими геометричними параметрами в залежності від поверхні розташування

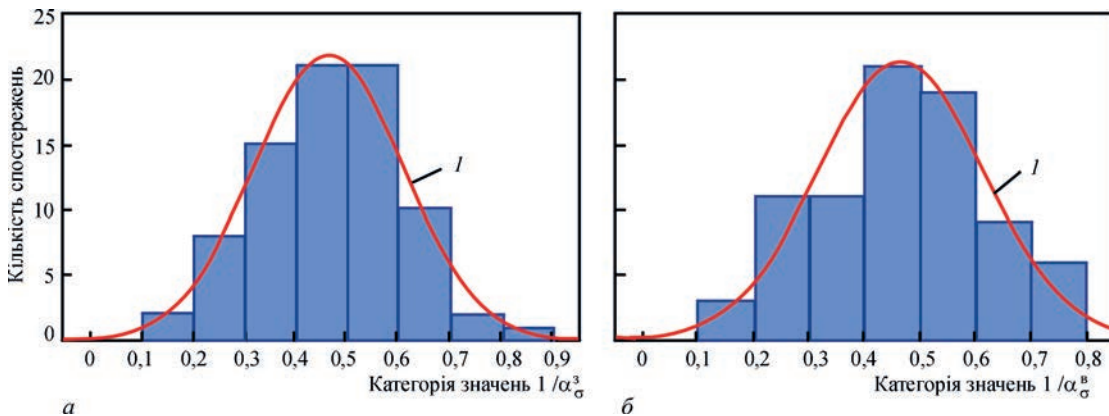


Рис. 3. Гістограми розподілу значень ККН в дефектах на поверхні: а – зовнішній; б – внутрішній. Цифрою 1 позначена крива відповідного нормального розподілу

ках зовнішньої та внутрішньої поверхні, при рівні значущості  $\rho = 0,73$  та  $\rho = 0,29$ , відповідно (рис. 3).

Розрахункові значення коефіцієнту множинної кореляції, що відображає щільність зв'язку між залежною змінною  $1/\alpha_{\sigma}$  та сукупністю незалежних змінних (діаметром та товщиною труби, глибиною, довжиною та шириною дефекту), становлять для зовнішньої та внутрішньої поверхні  $K_R = 0,79$  та  $K_R = 0,74$  відповідно.

Аналіз взаємозв'язку між величиною  $\alpha_{\sigma}^B$  або  $\alpha_{\sigma}^3$  і глибиною дефекту при фіксованих значеннях інших незалежних змінних (парціальна кореляція) свідчить про наявність позитивної кореляції. Індивідуальний вплив інших параметрів (діаметра і товщини стінки труби, довжини і ширини дефекту) є протилежним, залежно від того, чи є дефект внутрішнім або зовнішнім (рис. 4).

Регресійні рівняння залежності ККН в поверхневих об'ємних дефектах на зовнішній (6) і внутрішній (7) поверхні від геометричних параметрів пошкодження трубопроводу отримані з використанням процедури так званого багатокрокового регресійного аналізу. Цей метод заснований на обчисленні декількох проміжних рівнянь регресії, в результаті аналізу яких отримують кінцеву модель, що включає тільки фактори, що мають статистично істотний вплив на досліджувану залежну змінну.

$$1/\alpha_{\sigma} = 0,515 + 0,018h - 0,039b - 0,004c \quad (6)$$

$$1/\alpha_{\sigma} = 0,475 - 0,025b + 0,004d \quad (7)$$

Оцінка придатності вищевказаних напівемпіричних залежностей для обчислення ККН виконувалася на підставі зіставлення:

- діапазонів розкиду відносних значень ККН, що визначались як частка від ділення результату, отриманого за залежністю, на відповідне еталонне значення;
- ймовірності отримання результату обрахунку ККН за залежністю, що буде менше, ніж відповідне еталонне значення (занижений результат).

Слід відзначити, що:

- залежності (2) були виключені з аналізу, оскільки сформовані вибірки еталонних значень

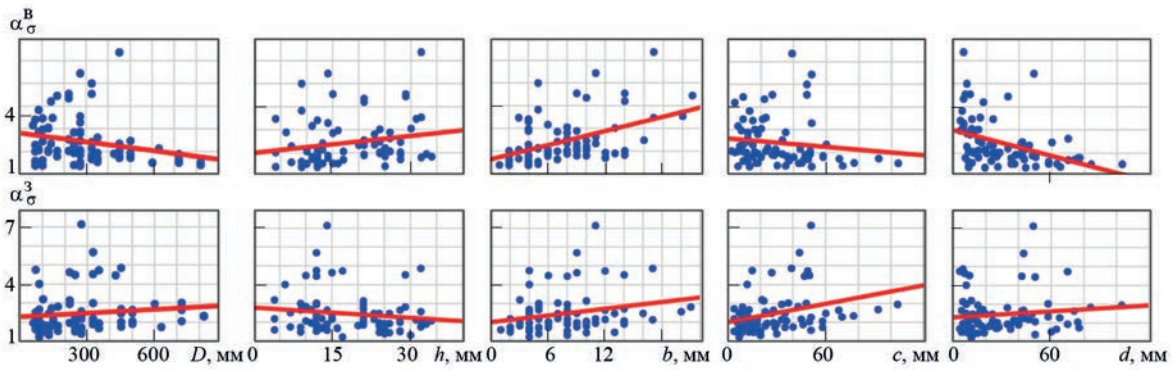


Рис. 4. Залежність ККН від геометричних параметрів та поверхні розташування

Таблиця 3. Ймовірнісні характеристики розрахункових залежностей

Залежність	Дефект внутрішньої поверхні		Залежність	Дефект зовнішньої поверхні	
	95 % довірчий інтервал $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$	Ймовірність $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе} < 1$		95 % довірчий інтервал $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$	Ймовірність $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе} < 1$
(5)	0,69...2,01	12,1 %	(5)	0,67...5,8	28 %
(3)	0,88...20	4,1 %	(3)	0,97...4,35	0,9 %
(7)	0,68...3,57	3,2 %	(6)	0,47...1,79	32,4 %

містили недостатньо результатів, що задовольняли встановлену в [11] вимогу по відношенню до геометричних параметрів труб ( $h/R = 0,015...0,030$ );

– з урахуванням сортаменту найбільш поширених в теплових мережах труб, при аналізі залежності (3) було встановлено обмеження  $h/R < 0,2$ , що зменшило обсяг варіантів еталонних вибірок з 80 до 60.

Ширина діапазону розкиду відносних значень, який використовувався для порівняння залежностей, обмежувалась 95 % довірчим інтервалом  $M \pm 2S$ , що визначався на основі вибіркових характеристик. Відповідно, ймовірність отримання заниженого результату розраховувалась в межах 95 % довірчого інтервалу (рис. 5).

Розглянемо результати розрахунків, що наведені в табл. 3. Відмітимо, що на відміну від регресій-

них рівнянь, залежності (3) та (5) використовувалися як для розрахунків дефектів зовнішньої, так і внутрішньої поверхні. При розрахунках дефектів внутрішньої поверхні найменшу ймовірність отримання неконсервативного результату дає використання залежності (3). При цьому одночасно існує велика ймовірність обчислення значно завищених (до 20 разів) значень ККН, що мабуть не є виправданим навіть при визначенні втомної міцності. Залежність (5) забезпечує помірно консервативні значення ККН і відносно вузький діапазон занижених (в 1...1,5 рази) значень, що в більшості випадків будуть компенсовані використанням стандартних коефіцієнтів запасу міцності. Очевидно, що при розрахунку дефекту на зовнішній поверхні найбільш універсальною є залежність (3), оскільки забезпечує прийнятно консервативні ( $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе} < 4,35$ ) і практично виключає занижені величини ККН.

**Висновки**

Виконано аналіз деяких рівнянь для розрахунку концентрації напружень в зоні корозійних пошкоджень на основі співставлення результатів розрахунку за їх використанням з даними розрахунків МСЕ, прийнятими в якості еталонних.

Встановлено, що при розрахунку концентрації напружень при використанні зазначених рівнянь, існує ймовірність (в залежності від поєднання геометричних параметрів дефекту й труби) отримання як значно завищених, так і занижених (неконсервативних) значень.

Визначено залежності, застосування яких забезпечує помірно консервативні величини і відносно вузький діапазон занижених значень ККН, що є придатними для проведення розрахунків максимальних напружень в дефектах, відповідно, на зовнішній та внутрішній поверхнях.

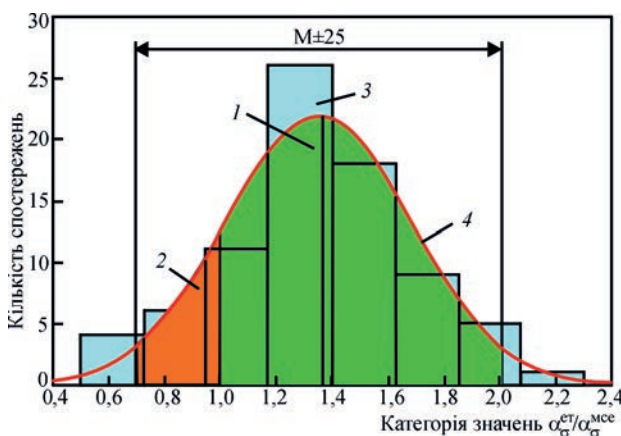


Рис. 5. Діапазон розкиду відносних значень  $\alpha_{\sigma}^{ст} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$  ( $\alpha_{\sigma}^{ст}$  – ККН, обчислений за (5);  $\alpha_{\sigma}^{мсе}$  – еталонне значення ККН в дефекті на внутрішній поверхні): 1 – середнє вибіркове значення М; 2 – область занижених значень ККН в межах 95 % довірчого інтервалу; 3 – гістограма розподілу значень  $\alpha_{\sigma}^{ст} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$ ; 4 – графік нормальної густини ймовірності, що відповідає вибірковим характеристикам значень  $\alpha_{\sigma}^{ст} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$

Список літератури

1. Петерсон Р. (1977) Коэффициенты концентрации напряжений. Москва, Издание Мир.
2. Kirsch B. Z. *VDI*. July 16., Vol. 42, (1898), pp. 797–807
3. Lekkerkerker J.C. (1964) Stress concentration around circular holes in cylindrical shells. Proc. 11th Internat. Congr. Appl. Mech., Springer, Berlin, 283.
4. Erigden A.C., Naghdi A.K., Thiel C.C. (1965) State of stress in a circular cylindrical shell with a circular hole. *Welding research council bulletin*, 102.
5. Van Dyke P. (1965) Stress about a circular hole in a cylindrical shell. *AIAA J.*, 3, p. 1733.
6. Савин Г.Н. (1968) Распределение напряжений около отверстий. Киев, Наукова думка.
7. Sadovsky M.A., Sternberg E. (1949) Stress concentrations around triaxial ellipsoidal cavity. *Journal of applied mechanics*, June, 149–157.
8. Eubanks R.A. (1954) Stress concentration due to a hemispherical pit at free surface. Trans. ASME, 76, *Applied Mechanics section*, p. 57.
9. Reed R.E., Wilcox P.R. (1970) *Stress concentration due to a hyperboloid cavity in a thin plate*. NASA TN D-5955, Washington, D.C.
10. Мясников Н.П., Родионов Г.Л., Сидоренко А.С. (2001) Прочность тонкостенных конструкций при наличии локальных повреждений. *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 3.
11. ВРД 39-1.10-004-99 *Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного ресурса*.
12. Гевлич С.О. (2010) *Об оценке механизма перехода в предельное состояние в водяных трубах*. <http://www.vestipb.ru/articles3617.html>.
13. Юхимец П.С., Гарф Э.Ф., Нехотящий В.А. (2005) Экспериментальное обоснование метода расчета остаточного ресурса трубопроводов с коррозионными повреждениями. *Автоматическая сварка*, 11, 17–21.
14. Фокин М.Ф., Трубицын В.А., Никитина Е.А. (1986) *Оценка эксплуатационной долговечности магистральных трубопроводов в зоне дефектов*. Москва, ВНИИОЭНГ.
15. Гарф Э.Ф., Нетребский М.А., Юхимец П.С., Кобельский С.В. (2000) Концентрация напряжений на участках коррозионных повреждений трубопроводов. *Автоматическая сварка*, 6, 3–6.
16. (2004) *Програма забезпечення «Тривимірне скінченно елементне моделювання теплового і тепло напруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)»*. Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04.
17. Кобельский С.В. (2010) Построение смешанных конечных элементов на основе шестигранной призмы для решения пространственных задач теории упругости. *Надежность и долговечность машин и сооружений*, 33, 248–262.
18. ГОСТ 8732-78 *Трубы стальные бесшовные горячедеформированные*. Сортамент.
19. ГОСТ 10704-91 *Трубы стальные электросварные прямошовные*. Сортамент.

References

1. Peterson, R. (1977) *Stress concentration factors*. Moscow, Mir [in Russian].
2. Kirsch B. Z. *VDI*. July 16., Vol. 42, (1898), pp. 797–807
3. Lekkerkerker, J.C. (1964) Stress concentration around circular holes in cylindrical shells. In: Proc. of 11th Intern. Congr. Appl. Mech., Springer, Berlin, 283.
4. Erigden, A.C., Naghdi, A.K., Thiel, C.C. (1965) State of stress in a circular cylindrical shell with a circular hole. *Welding Research Council Bulletin*, 102.
5. Van Dyke, P. (1965) Stress around a circular hole in a cylindrical shell. *AIAA J.*, 3, 1733.
6. Savin, G.N. (1968) *Stress concentration around holes*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Sadovsky, M.A., Sternberg, E. (1949) Stress concentrations around triaxial ellipsoidal cavity. *J. of Applied Mechanics*, June, 149–157.
8. Eubanks, R.A. (1954) Stress concentration due to a hemispherical pit at free surface. Trans. ASME, 76, *Applied Mechanics section*, 57.
9. Reed, R.E., Wilcox, P.R. (1970) *Stress concentration due to a hyperboloid cavity in a thin plate*. NASA TN D-5955, Washington, D.C.
10. Myasnikov, N.P., Rodionov, G.L., Sidorenko, A.S. (2001) Strength of thin-walled structures in the presence of local damages. *Electron J., Trudy MAI*, 3 [in Russian].
11. VFD 39-1.10-004-99: *Methodological recommendations for quantitative evaluation of the state of the main gas pipelines with corrosion defects, their ranking by the degree of criticality and determination of residual life* [in Russian].
12. Gevlich, S.O. (2010) *On evaluation of the mechanism of transition to limit state in water pipes*. <http://www.vestipb.ru/articles3617.html> [in Russian].
13. Yukhimets, P.S., Garf, E.F., Nekhotyashchy, V.A. (2005) Experimental substantiation of method for calculation of residual life of pipelines with corrosion damages. *The Paton Welding J.*, 11, 11-15.
14. Fokin, M.F., Trubitsyn, V.A., Nikitina, E.A. (1986) *Evaluation of service life of the main pipelines in the defect zone*. Moscow, VNIIOENG [in Russian].
15. Garf, E.F., Netrebsky, M.A., Yukhimets, P.S., Kobelsky, S.V. (2000) Stress concentration in the areas of corrosion damage of pipelines. *The Paton Welding J.*, 6, 2-5.
16. (2004) Software: 3D finite element modeling of thermal and thermal-stressed state of elements of mechanical engineering structures (SPACE). Certification system SEPRO. Certificate of conformity UA1.017.0054634-04 [in Ukrainian].
17. Kobelsky, S.V. (2010) Construction of mixed finite elements on the base of hexagonal prism for solution of 3D problems of elasticity theory. *Nadyozhnost i Dolgovechnost Mashin i Sooruzhenij*, 33, 248–262 [in Russian].
18. GOST 8732-78: *Seamless hot-deformed steel pipes. Range of sizes* [in Russian].
19. GOST 10704-91: *Electrically welded steel line-weld tubes. Range of sizes* [in Russian].

ANALYSIS OF SEMI-EMPIRICAL EQUATIONS FOR DETERMINATION OF STRESS CONCENTRATION IN VOLUMETRIC DAMAGES ON PIPELINE SURFACE

P.S. Yukhymets<sup>1</sup>, L.J. Yurko<sup>1</sup>, S.V. Kobelsky<sup>2</sup>, V.I. Kravchenko<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NASU, 2 Timiriyazivs'ka str., Kyiv, 01014, Ukraine. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

The paper deals with comparative analysis of some equations for calculation of stresses in a corrosion damage zone on pipeline surface. Stresses calculated by FEA in the area of volumetric surface defects were used as the reference values. The geometric parameters required for calculations were presented as a corresponding set of random independent values that varied within certain limits. Optimal dependencies were determined, the application of which provides moderately conservative values and a relatively narrow range of low values of stress concentration factor, when calculating the maximum stresses in the defects on the outer and inner surfaces, respectively. Ref. 19, Tabl. 3, Fig. 5.

Keywords: stress concentration, corrosion defects, pipelines

Надійшла до редакції 19.11.2019

# КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТАЛЕВИХ ШАХТНИХ КОПРІВ В ПРОЦЕСІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В.А. Куліш, Е.С. Крилов

ДП «Інститут «УкрНДПроект» Мінералогічного України, 03142, м. Київ, просп. Академіка Паладіна, 46/2.  
E-mail: [post.unp@ukr.net](mailto:post.unp@ukr.net)

В ДП «Інститут «УкрНДПроект» проведені науково-технічні дослідження, по результатах яких розроблені галузеві нормативно-технічні документи (НТД) СОУ-Н10.1.00174125.001:2012 «Порядок і організація обстеження металевих копрів» та КД 12.005-94 (зі змінами) «Металеві конструкції шахтних копрів. Вимоги до експлуатації», які регламентують процедури контролю і оцінки технічного стану несучих металевих конструкцій шахтних копрів в процесі їх обстеження і експлуатації. Вони відповідають вимогам діючого законодавства і нормативних документів та сприяють підвищенню безпеки і надійності експлуатації шахтних копрів за рахунок своєчасного отримання інформації про їх фактичний технічний стан. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 5.

*Ключові слова:* контроль, технічний стан, науково-технічне дослідження, несуча конструкція, металевий шахтний копер, дефект, обстеження, перевірний розрахунок.

В теперішній час в Україні одними з найрозповсюджених і відповідальних видів гірничотехнічних споруд шахтної поверхні є металеві копри (рис. 1), які були побудовані 40–60 років тому, в результаті чого спрацювання їх становить більше 50 % і має тенденцію до зростання. В той же час нормативний строк служби їх складає 35–55 років.

В металевих копрах основною частиною є металеві конструкції (МК), які складають 50–70 % маси копра, небезпека руйнування яких значно вища, ніж механізмів, і тому лімітуючим фактором працездатності є технічний стан МК.

В цій ситуації актуальною є проблема визначення можливості експлуатації копрів з використанням терміном служби, яка може бути вирішена по результатах контролю технічного стану несучих МК.

Зокрема вирішення цієї проблеми регламентується Постановою Кабміну від 26.05.2004 р. № 687 «Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки» [1].

Технічний стан копрів визначається в процесі їх оглядів, інструментальних обстежень та паспортизації, які являють собою комплекс заходів виявлення дефектів і пошкоджень конструкцій, оцінки технічного стану і визначення працездатності [2, 3].

Враховуючи вищезазначене ДП «Інститут «УкрНДПроект» провело науково-технічні дослідження, за результатами яких були розроблені нормативно-технічні документи, що регламентують порядок і організацію обстеження металевих копрів, а також вимоги до експлуатації їх несучих конструкцій.

Результати проведених досліджень мають наукову новизну в вугільній галузі України в частині:

– класифікації дефектів і пошкоджень несучих МК споруд шахтної поверхні (зокрема копрів) з урахуванням [4]:

а) гранично припустимих значень параметрів дефектів при працездатному технічному стані;

б) методів контролю та нормативних документів, по яких він здійснюється;

в) категорії небезпечності за ДБН 362-92 [5].

Завдяки цьому в процесі обстеження МК копрів в першу чергу виявляються дефекти і пошкодження в місцях концентрації напружень металевих ферм і балок з урахуванням ступеню небезпеки цих дефектів.

– розробки методики акустико-емісійного контролю несучих МК, яка передбачає схему навантаження для кожного вузла (елемента) за допомогою

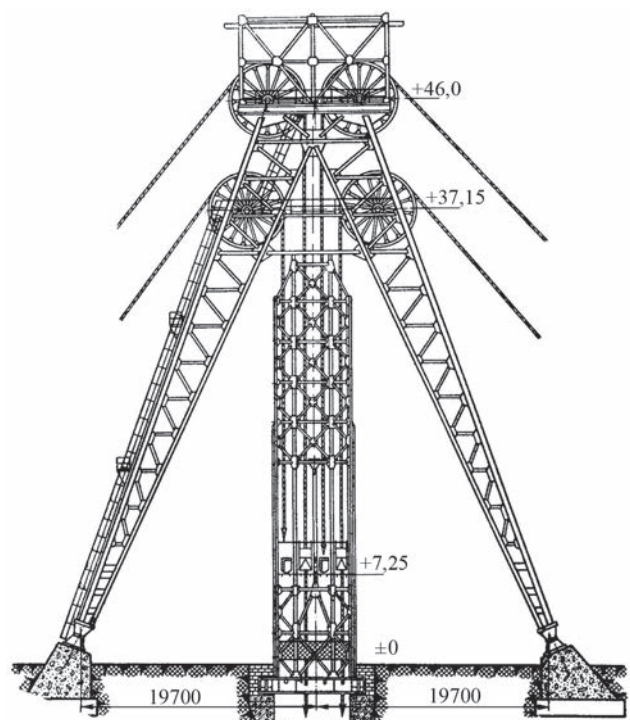


Рис. 1. Металевий шахтний копер шатрової системи

Таблиця 1. Дефекти і пошкодження елементів і вузлів металокопирів, які виявляються при обстеженні

Найменування вузлів і елементів металокопирів	Види пошкоджень							
	Вигнутість, скрученість	Увігнутість (опуклість)	Вирізи	Корозія	Тріщини в метали, розшарування	Дефекти зварних швів	Ослаблення кріплення	Різкі
1. Підкопирова рама								
1.1. Опорні вузли головних балок	-	+	+	+	+	+	+	+
1.2. Вузли сполучення балок зі стійками станка	-	+	+	+	+	+	+	+
1.3. Вузли сполучення головних та допоміжних балок	-	+	+	+	+	+	+	+
1.4. Балки	+	+	+	+	+	+	+	+
2. Станок копра								
2.1. Опорні балки	+	+	+	+	+	+	-	+
2.2. Стійки	+	+	+	+	+	+	+	+
2.3. Вузли кріплення елементів решітки	-	+	-	+	+	+	+	+
2.4. Вузли кріплення елементів решітки до стійок	-	+	+	+	+	+	+	+
2.5. Елементи решітки ферм	+	+	+	+	+	+	+	+
2.6. Розстріли	+	+	+	+	+	+	+	+
2.7. Площадка під амортизатори	+	+	+	+	+	+	+	+
2.8. Обшивка станка	-	+	+	+	+	+	+	+
3. Голівка копра								
3.1. Підшківна ферма (елементи ферми, фасонки)	+	+	+	+	+	+	+	+
3.2. Опорні підкоси	+	+	-	+	+	-	+	+
3.3. Вузли обпирання підшківних ферм на головні балки укосини	-	+	-	+	+	+	+	+
3.4. Вузли примикання підшківних ферм до опорних балок станка	-	+	-	+	+	+	+	+
3.5. Надбудова для монтажу шківів (елементи надбудови, фасонки)	+	+	+	+	+	+	+	+
3.6. Елементи зв'язків головки копра	+	+	+	+	+	+	-	+
4. Укосина								
4.1. Вузли обпирання віток укосини на фундаменти (опорні ребра, фасонки)	+	+	-	+	+	+	+	+
4.2. Вітки (головні балки) укосини (верхній пояс, нижній пояс, стінка, опорні ребра, ребра жорсткості)	+	+	+	+	+	+	+	+
4.3. Ферми укосини і підпірки під укосину	+	+	+	+	+	+	+	+
4.3.1. Елементи решітки ферм	+	+	+	+	+	-	-	+
4.3.2. Вузли кріплення елементів решітки	-	+	-	+	+	+	+	+
4.3.3. Вузли кріплення елементів решітки до балок укосини	-	+	-	+	+	+	+	+
4.4. Вузол сполучення віток (головних балок) укосини з голівкою копра	-	+	-	+	+	+	+	+

Примітка: «+» – перевірка на присутність пошкодження; «-» – перевірка не проводиться.



Рис. 2. Корозія металевих листів і балок із двотавра підкопрові рами копра

робочих і холостих режимів роботи копрів (розроблені спеціальні карти режимів навантаження).

Для інструментальних обстежень МК копрів використовуються як традиційні методи НК (радіографічний, ультразвуковий, магнітний та інші), так і перспективні (акустико-емісійний (АЕ)).

АЕ метод контролю дозволяє накопичувати інформацію про динаміку виникнення і розвиток пошкоджень в металі в процесі навантаження і деформування МК з наступною інтегральною оцінкою технічного стану.

До того ж, виявлені за допомогою АЕ контролю дефекти (особливо тріщини), розвиваються і є особливо небезпечними. Тому при використанні

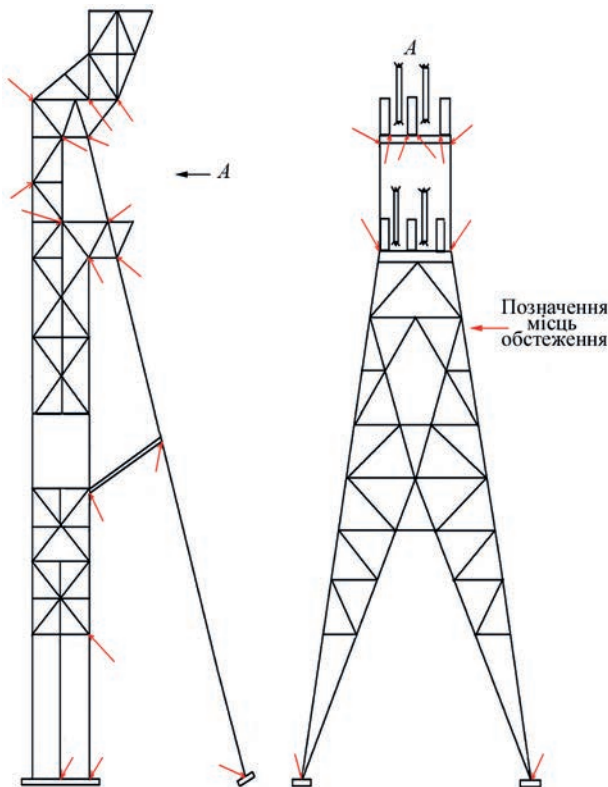


Рис. 3. Місця обстеження металоконструкцій копра станкової системи

цього методу питання про ступінь небезпечності вирішується автоматично.

В ДП «Інститут «УкрНДІпроект» розроблені, виготовлені і пройшли успішно випробування в стендових і виробничих умовах комплекси АЕ контролю «КАРАТ» і «КОМПАС».

Серед традиційних методів і засобів контролю при обстеженні металевих копрів, в основному, застосовуються наступні методи [4]:

- ультразвуковий – дефектоскопи УД2-70, серія DFX, товщиноміри ЕУЗ-1, ТУЗ-2;
- радіографічний – портативні рентгеновські апарати серій SITE-X, РАТМИР-160; РАТМИР-190;
- магнітопорошковий – магнітні дефектоскопи DA750, DA1500;
- капілярний (кольоровий) – комплект OVER-SHECK для капілярного контролю.

На рис. 2 наведено несучі МК підкопрових рам копра, які пошкоджені атмосферною корозією і шахтними водами в процесі його експлуатації на шахті «Степова» ДП «Львіввугілля».

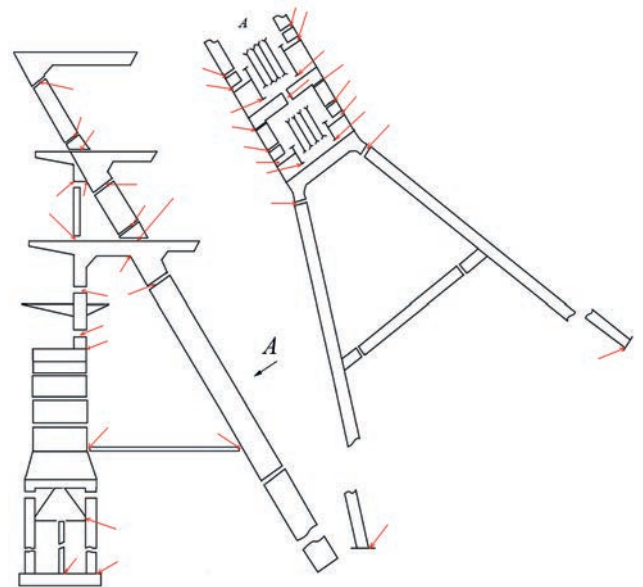


Рис. 4. Місця обстеження металоконструкцій копра напівшатрової системи

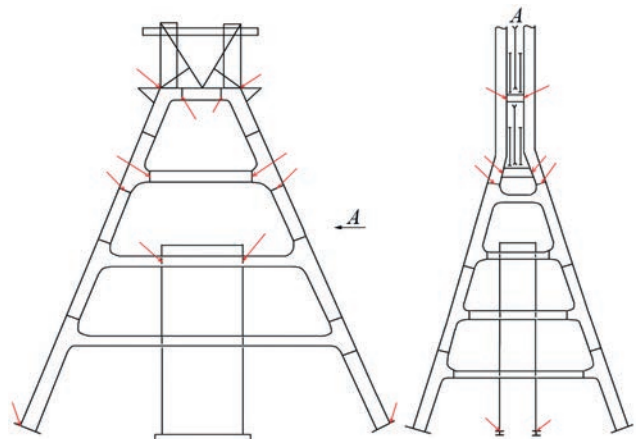


Рис. 5. Місця обстеження металоконструкцій копра шатрової системи

Дослідження і впровадження розробок в наведених вище напрямках проводились впродовж декількох років на металевих шахтних копрах різних конструкцій і призначення, які експлуатуються на шахтах вугільної галузі України, а саме:

- ДП «Львіввугілля»
- ДП «Красноармейськвугілля»
- ДП «Волиньвугілля»
- ДП «Шахтарськантрацит»
- ДП «Дзержинськвугілля»
- ДП «Ровенькиантрацит»
- ДП «Донецька вугільна енергетична компанія».

В процесі обстеження копрів виявленню підлягають дефекти і пошкодження в місцях, наведених в табл. 1 та рис. 3–5 та які класифіковані по категоріях небезпечності згідно ДБН 362-92 [5].

У випадку, якщо виявлені дефекти і пошкодження знижують міцність конструкцій або призводять до їх непроєктних навантажень, необхідно виконувати перевірний розрахунок несучих МК.

Розрахункові системи конструкцій (умови спирання, геометрія, розрізи, перетини, в т. ч. ослаблені) приймаються по результатах обстеження, з врахуванням виявлених дефектів і пошкоджень.

Розрахунок МК шахтних копрів проводиться за методом граничних станів згідно вимог ДБН В. 1.2-14-2009 та ДБН В. 2.6-163:2010 [6, 7], які забезпечують надійність копра як в процесі його експлуатації за основним призначенням, так і при проходці ствола і будівництві копра. При цьому розрахунок проводиться по першій і другій групам граничних станів.

**Таблиця 2. Перелік конструкцій копрів і їх елементів з класифікацією за групами і категоріями [7]**

Конструкція та елемент	Група конструкцій по ДБНВ.2.6-163:2010	Категорія	
		за призначенням	за напруженим станом
1. Підкопрова рама:			
1) Балки, фасонки, опорні ребра;	1	A	II
2) опорні плити;	3	B	II
3) ребра жорсткості	4	B	III
<b>2. Станок:</b>			
1) основні елементи станка, які належать до конструкцій в'язів (вітки, грати);	2	A	III
2) листова оболонка станка оболонкової конструкції або обшивка станка стрижневої системи, яка включена в силову схему;	2	A	III
3) фасонки;	1	A	II
4) розпори;	2	B	I
5) балки спирання протипожежних яд, балки майданчиків для посадки посудин, балки парашутних та амортизуючих пристроїв, розвантажувальні криві скіпових підйомів;	1	A	I
6) балки перекриття станка;	3	B	II
7) обшивка, яка виконує тільки функцію огороження (зокрема ребра жорсткості і фахверк)	4	B	III
<b>3. Укосини:</b>			
1) основні елементи укосини (вітки і розподільні балки, ригелі укосин рамного типу, опорні ребра розподільних балок);	2	A	III
2) в'язи між витками;	3	B	III
3) фасонки в'язів;	1	A	II
4) опорні бази віток;	3	B	II
5) грати двоплощинних в'язів, діафрагми, ребра жорсткості	4	B	III
<b>4. Головка:</b>			
1) підшківні і фасадні ферми, балки, які безпосередньо сприймають навантаження від шківів;	1	A	I
2) ребра балок, які передають великі зосереджені сили, опорні ребра;	1	A	II
3) фасонки;	1	A	II
4) балки, які забезпечують спільну роботу укосини і станка;	2	A	III
5) горизонтальні в'язи;	3	B	II
6) грати, які з'єднують елементи підшківних і фасадних ферм, діафрагми елементів коробчастого перетину	4	B	III
<b>5. Горизонтальні в'язи між станком і укосиною:</b>			
1) основні елементи;	3	B	III
2) фасонки	2	A	III
<b>6. Пристрій для зміни шківів</b>	2	A	III
<b>7. Допоміжні конструкції:</b>			
1) косоури сходин;	2	A	III
2) інші елементи сходин, майданчика, обгороджування	4	B	III

Примітка. 1) Елементи, які сприймають зусилля розтягнення в напрямку товщини прокату, слід відносити до групи 1. 2) Невантажені елементи (з напруженням менше  $0,2 R_y$  (розрахункового опору основного металу)), які призначені тільки для зменшення розрахункової довжини інших елементів, допускається відносити до групи 4 і категоріям B та III.



Конструкції копра та їх елементи поділяються на три категорії в залежності від наслідків, які викликані їх відмовою.

А – основні несучі конструкції або конструкції, які поєднують несучі і огорожувальні функції, а також елементи, відмова яких може призвести до повної непридатності копра до експлуатації в цілому, або значної його частини;

Б – допоміжні несучі функції, які поєднують несучі і огорожувальні функції, а також елементи, відмова яких може призвести до утруднення нормальної експлуатації копра або до відмови інших конструкцій, які не належать до категорії А;

В – допоміжні несучі і огорожувальні конструкції, відмова яких не призводить до порушення експлуатаційних вимог, які пред'являються до інших конструкцій.

Перелік конструкцій копра та їх елементів з класифікацією по групах і категоріях наведені в табл. 2.

Навантаження і впливи на шахтні копри приймаються згідно вимог СНиП 2.01.07-85 (актуалізована редакція) і паспортними даними підйомних машин і устаткування.

Види навантажень копрів з класифікацією за СНиП 2.01.07-85 (актуалізована редакція) і коефіцієнти надійності по навантаженню наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Класифікація навантажень копрів

Класифікація навантажень за СНиП 2.01.07-85	Вид навантажень	Коефіцієнт надійності за навантаженням, $\gamma_f$
Постійні	1. Вага несучих і огорожувальних металевих конструкцій, розпорів, провідників, майданчиків і сходів.	1,05
	2. Вага бетонних, залізобетонних і кам'яних фундаментів з середньою щільністю не менше 1600 кг/м <sup>3</sup> .	1,1
	3. Вага зворотньої засипки ґрунту на фундаментах <sup>1</sup> .	1,15
	4. Вага споруд, які спираються на копер <sup>1</sup> .	розрахункові
Тимчасові, тривалі	5. Вага стаціонарного обладнання (шківів, амортизаторів, парашутних пристроїв, посудин, вагонеток, підйомних і урівноважувальних канатів).	1,05
	6. Вага вантажів, що переміщуються:	1,2
	1) насипних;	1,1
	2) інших.	1,2
	7. Зусилля натягу канатних провідників.	1,3
	8. Динамічні навантаження від коливань посудин на канатах в нормальному робочому режимі.	1,3
	9. Динамічні навантаження на копер від нерівноважених мас відхиляючих шківів, які обертаються в робочому режимі.	1,2
	10. Тиск, який викликаний депресією або компресією.	розрахункові
	11. Навантаження, які передаються на копер спорудами, що спираються на нього і впливають тривалий час.	Відповідно СНиП 11-8-78 в залежності від виду деформації земної поверхні
	12. Вплив від нерівномірного осідання основи в результаті підроблення.	1,1
13. Температурні кліматичні впливи зі знизженими нормативними значеннями.	розрахункові	
14. Впливи осідання основи від дії будівель і споруд, які розташовані рядом.	розрахункові	
Короткочасні	15. Навантаження від обладнання, які виникають в пусконаладжувальному режимі (пуск і зупинка приводів для підйому-спускання ляд).	1,0
	16. Навантаження, які виникають при монтажу, транспортуванні, заміні канатів і шківів.	1,2
	17. Навантаження, які виникають при використанні копра для проходки ствола.	1,2
	18. Розподілене навантаження на сходи, сходові майданчики і майданчики для обслуговування при величині:	1,3
	до 2 кПа	1,2
	більше 2 кПа	розрахункові
	19. Навантаження від споруд, які спираються на копер і викликані дією на ці споруди короткочасних навантажень.	1,1
	20. Температурні кліматичні впливи.	1,4
21. Снігові навантаження <sup>2</sup>	1,4	
22. Вітрові навантаження, включаючи пульсації ну складову.	1,3	
23. Навантаження від ожеледиці <sup>2</sup>	1,2	
24. Навантаження від посадки кліті на кулаки.	1,0	
Особливі	25. Аварійні навантаження, які передаються на копер головними канатами.	1,0
	26. Навантаження, що викликані перепідйомом посудини, або спрацюванням амортизуючого пристрою.	1,0
	27. Навантаження від тормозних канатів при спрацюванні парашута.	1,0
	28. Сейсмічний вплив.	Згідно з СНиП III-7-81
	29. Вплив вибухів в зоні копра.	розрахункові
	30. Вплив при замочуванні просадних ґрунтів і осіданні в районі виробок.	розрахункові

Примітка. <sup>1</sup>Для перевірки основи. <sup>2</sup>Навантаження від снігу і ожеледиці можуть не враховуватися.

Результати контролю і оцінки технічного стану МК шахтних копрів (зокрема з використанням перевірного розрахунку) заносять в паспорт технічного стану згідно НПАОП 45.2-1.01. Паспортизація технічного стану копрів, забезпечує їх періодичними обстеженнями силами спеціалізованих організацій, надає своєчасну інформацію для планування і здійснення ефективних заходів підтримання надійності, безпеки та експлуатаційної придатності копрів, а за потреби виведення їх із небезпечного стану (аж до ліквідації).

Багаторічний досвід проведення обстежень копрів в різних регіонах України, а також розробки НТД для їх реалізації, дозволили ДП «Інститут «УкрНДДПроект» розробити наступні галузеві НТД [8, 9]:

– СОУ-Н10.1.00174125.001:2012. Порядок і організація обстеження металевих копрів.

– КД 12.005-94 (із змінами). Металеві конструкції шахтних копрів. Вимоги до експлуатації.

## Висновки

За результатами проведених багаторічних науково-технічних досліджень шахтних копрів в ДП «Інститут «УкрНДДПроект» розроблені галузеві НТД, які регламентують процедури контролю і оцінки технічного стану металевих копрів в процесі їх обстеження і паспортизації, а також вимоги до їх експлуатації.

Впровадження на шахтах рекомендацій цих документів дозволяє:

– оцінювати термін безпечної експлуатації несучих конструкцій копрів;

– встановлювати елементи несучих копрів, які потребують ремонту конструкцій або заміни;

– забезпечувати прогноз залишкового ресурсу елементів несучих конструкцій копрів та обґрунтування подовження терміну їх безпечної експлуатації;

– визначати перелік та забезпечення показників надійності елементів несучих конструкцій копрів з урахуванням відмов;

– визначити конструктивні, технологічні та експлуатаційні обмеження, що забезпечують роз-

рахунковий термін служби конструкцій при обслуговуванні їх згідно з фактичним станом.

## Список літератури

1. Постанова Кабміну України від 26.05.2004 № 687. *Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки.*
2. НПАОП 10.0-1.01-10. *Правила безпеки у вугільних шахтах.*
3. НПАОП 45.2-1.01-98. *Правила обстежень, оцінки технічного стану та паспортизації виробничих будівель та споруд.*
4. Куліш В.А., Крилов Е.С. (2018) Контроль і оцінка технічного стану металевих конструкцій будівель і споруд шахтної поверхні. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 47–52.
5. ДБН362-92. *Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації.*
6. ДБН В.1.2-14-2009. *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ.*
7. ДБН В.2.6-163:2010. *Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу.*
8. СОУ-Н10.1.00174125.001:2012. *Порядок і організація обстеження металевих копрів. Стандарт Міненерговугілля України.*
9. КД 12.005-94 (зі змінами). *Металеві конструкції шахтних копрів. Вимоги до експлуатації. Керівний документ Міненерговугілля України.*

## References

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 26.05.2004 No. 687: *Procedure for conducting inspection, testing and expert examination (technical diagnostics) of high-risk machines, mechanisms and equipment* [in Ukrainian].
2. NPAOP 10.0-1.01-10: *Safety rules in coal mines* [in Ukrainian].
3. NPAOP 45.2-1.01-98: *Rules for inspection, assessment of technical conditions and certification of industrial buildings and structures* [in Ukrainian].
4. Kulish, V.A., Krylov, E.S. (2018) Monitoring and assessment of the technical condition of metal structures of buildings and constructions of mine surface. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 47-52 [in Ukrainian].
5. DBN362-92: *Evaluation of technical condition of steel structures of production buildings and facilities in operation* [in Ukrainian].
6. DBN V.1.2-14-2009: *General principles for ensuring the reliability and constructive safety of buildings, facilities, civil structures and bases* [in Ukrainian].
7. DBN V.2.6-163:2010: *Steel structures. Standards of design, manufacturing and installation* [in Ukrainian].
8. SOU-T10.1.00174125.001:2012: *Procedure and organization of metal headgear. Standard of Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine* [in Ukrainian].
9. KD 12.005-94 (modified): *Metal structures of shaft headgears. Operating requirements. Directives of Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine* [in Ukraine].

## MONITORING THE TECHNICAL STATE OF LOAD-CARRYING STRUCTURES OF METAL SHAFT HEADGEAR IN OPERATION

V.A. Kulish, E.S. Krylov

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

SC «Інститут «УкрНДДПроект» conducted scientific-technical research, the results of which were used as the base to develop industry regulatory-technical documents (RTD) SOU-N10.1.00174125.001:2012 «Procedure and organization of metal headgear inspection» and DD 12.005-94 (modified) «Metal structure of shaft headgear. Operating requirements», which regulate the procedures of monitoring and assessment of the technical condition of load-carrying metal structures of shaft headgear during their inspection and operation. They meet the requirements of current legislation and regulatory documents and promote improvement of the safety and operating reliability of shaft headgear due to timely obtaining of information on their actual technical state. 9 Ref., 3 Tabl., 5 Fig.

*Keywords: monitoring, technical state, scientific-technical research, load-carrying structure, metal shaft headgear; defect, inspection, verification calculation*

Надійшла до редакції 18.12.2019

# СПРОЩЕНИЙ МОНІТОРИНГ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ БЕЗ ЗАЧИСТКИ ЇХ ПОВЕРХОНЬ

Троїцький В.О., Литвиненко В.А.

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

Утворення тріщин, корозійна поразка і старіння металу є основною проблемою довго експлуатованих металоконструкцій. Найчастіше ці споруди мають несприятливі умови для якісної зачистки їх поверхні, що потрібно за правилами неруйнівного контролю. Для оцінки стану таких численних об'єктів існує метод Alternative Current Field Measurement (ACFM) (Метод вимірювання полів змінного струму). У методі ACFM поєднуються фізичні основи вихорострумів та магнітних методів неруйнівного контролю. Прилади методу ACFM призначені в основному для виявлення протяжних дефектів у вигляді тріщин без зачистки поверхні об'єкта, а також для контролю під водою. Існує багато об'єктів, які підлягають контролю, мають погану поверхню об'єкту контролю (ОК) (груба поверхня, велика шорсткість або погано підготовлена поверхня ОК тощо) зварних споруд, та інших металевих виробів. Назвемо цю ідею умовно Crack Testing (СТ) (Контроль тріщин). СТ – ідея реалізується не тільки методом ACFM, а й традиційними методами: електромагнітно – акустичним (ЕМА), магнітних полів розсіювання (MFL), вихорострумовим (ЕТ). Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 6.

*Ключові слова: металоконструкції, неруйнівний контроль, ACFM, вихорострум, магнітний порошок, ЕМА, тріщини, дефектоскопія, Crack Testing, дефекти*

Для металоконструкцій, термін експлуатації яких перевищив 25-річний термін, цінується не той метод неруйнівного контролю (НК), який виявляє найменший дефект, а той метод, який не пропустить найнебезпечніший дефект згідно з нормативним документом на виріб. Найнебезпечнішими дефектами є протяжні тріщини. Такі дефекти пропускати не можна. Дрібних дефектів багато, вони не завжди можуть бути причиною аварій у найближчому майбутньому. Інформація про дрібні дефекти мало цікава, так як вони не завжди є критичними. Критичність дефектів визначається згідно з нормативним документом на виріб.

Згідно з літературними джерелами [11], руйнування металу відбувається тоді, коли відбувається накопичення дислокацій в металі в великих кількостях. Місця з великим скупченням дислокацій є джерелами зародження мікротріщин. Мікротріщина є концентратором напруги. Коли напруга перевищує межу міцності виробу, відбувається розрив основного металу. Тому потрібно не допускати утворення тріщин шляхом виконання комплексних робіт НК.

На практиці в НК в першу чергу цінується достовірність результатів контролю. Також не є винятком, коли важливо знати узагальнену інформацію, таку, як: «Має виріб критичний дефект чи ні», «Чи може виріб експлуатуватися в подальшому». При цьому пошук небезпечної тріщини на поверхнях може проводитися крізь захисні шари різних покриттів, з великими проміжками між перетворювачами і поверхнею об'єкта. Тому в цих випадках варто звернути увагу на безконтактні методи контролю.

В роботі [1] описано пристрій для безконтактного виявлення тріщин в процесі експлуатації важкодоступних об'єктів без зачистки їх поверхонь, включаючи об'єкти, що знаходяться під водою.

Прилади на основі методу ACFM вже використовуються в різних країнах для трубопроводів і елементів конструкцій, плавучих бурових установок та їх опор, які знаходяться у воді, технологічних трубопроводів в нафтовій і газовій промисловості, а також для контролю рухомого складу в залізничній промисловості.

Прилад на основі ACFM-методу був розроблений компанією TSC Inspection systems на початку 1990 р. в Великобританії. Метод ACFM дозволяє виявляти і вимірювати тріщини, що виходять на поверхню металу, через фарбу і захисні покриття товщиною до 10 мм. Спочатку застосування призначалося для морських нафтових споруд, плавучих установок для видобутку, зберігання і відвантаження нафти, а саме для контролю об'єктів, частини яких знаходяться в підводному стані [3, 4]. Далі ми розглянемо, з чого складається найпростіший принцип роботи ACFM [1, 2].

У перетворювачі ACFM (рис. 1) [13] вбудований індуктор з двома котушками, по яким протікає змінний електричний струм, під дією якого індуктується струм в об'єкті контролю. Якщо дефектів немає, то наведений струм рівномірно розподілений під перетворювачем. Рівномірність електричного струму (вихорового струму) порушується при наявності дефекту у вигляді тріщин, пор і т. п. При цьому струм тече навколо тріщини (рис. 2) [1], огинаючи її. Сигнал, отриманий магнітним

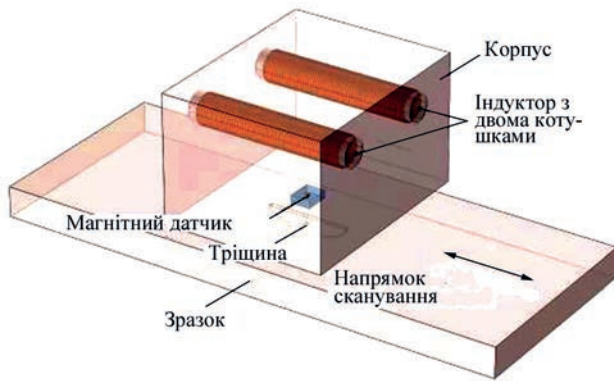


Рис. 1. Найпростіша схема перетворювача ACFM TSC Amigo датчиком, пропорційний індукції магнітного поля  $B_x B_x$ , реагує на зменшення поверхневої густини електричного струму, коли струм обтікає поверхню тріщини. Інша складова цього поля  $B_z B_z$  реагує на полюси, що виникають при обтіканні електричного струму навколо кінців тріщини. Тріщини можуть бути розпізнані і кількісно оцінені за сигналами магнітної матриці або одиночного датчика, розташованого між індуктором і виробом.

На рис. 3 показані сигнали від дефекту на екрані приладу ACFM при проходженні перетворювача над дефектом. У лівій частині екрана відобра-

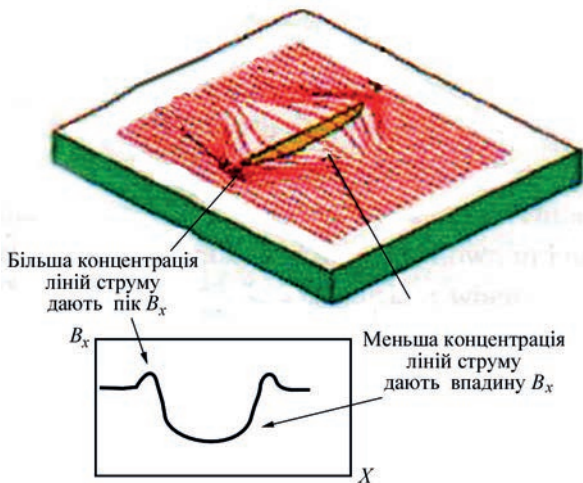


Рис. 2. Розподіл змінного струму над дефектом

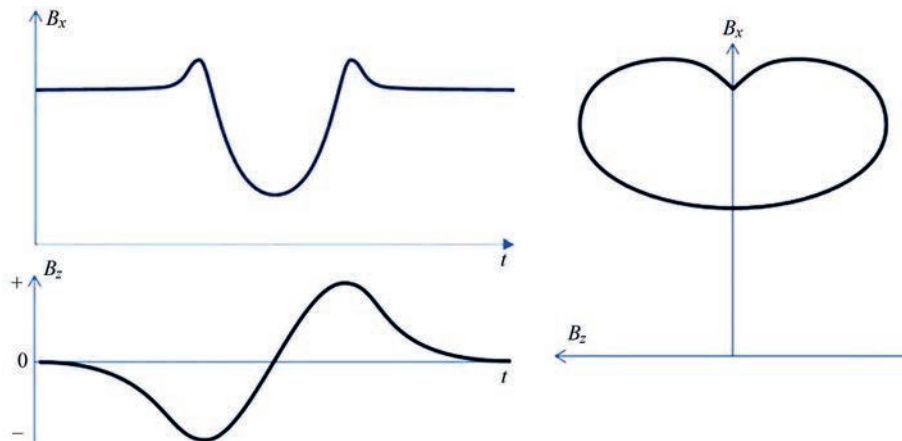


Рис. 3. Інформація про дефект на екрані приладу ACFM,  $B_x$  та  $B_z$  – складові магнітного поля над дефектом

жаються значення  $B_x$  та  $B_z$ . Протяжність дефекту визначається западиною на графіку  $B_x = f(X)$ . Найглибша точка цієї кривої відповідає найглибшій частині тріщини. Піки на цьому графіку вказують на розташування кінців тріщини. Щоб полегшити інтерпретацію результатів, в правій стороні екрану побудована характерна петля дефекту  $B_x = f(B_z)$ . Форма цієї петлі характеризує дефект. Ця фігура не чутлива до швидкості контролю і покращує розуміння результату контролю.

Програмні алгоритми приладу миттєво визначають значення довжини і глибини тріщини. Інформація відображається на графіку  $B_x = f(B_z)$ .

Перетворювач для методу ACFM фірми Amigo працює на частоті 5 кГц (також робоча частота може бути спроектована під будь-які завдання контролю), містить дві котушки і магнітний датчик. Корпус перетворювача виготовлений із пластику. Магнітний датчик визначає значення щільності магнітного потоку на поверхні.

Прилад (рис. 4) [3, 4] може виявляти поверхневі дефекти як у феромагнітних металах, так і в кольорових металах. Об'ємні дефекти, такі, як корозія або пористість, дають набагато більш слабкі сигнали, ніж площинні дефекти.

Зараз випускаються прилади, які забезпечують швидкість сканування до 0,3 м/с. Це швидкий, точний та відносно спрощений метод пошуку і оцінки тріщин, при якому не потрібно мати контрольний зразок і не має потреби в зачистці поверхні. У разі одного чутливого датчика в ACFM – перетворювачі, сканування повинно проводитися з повертання на 90°, щоб виявляти поздовжні і поперечні тріщини. Після визначення орієнтації тріщини проводиться сканування вздовж тріщини для визначення її розмірів. Все вирішується швидше в разі використання матричного датчика всередині.

Згідно з літературними даними [1, 2], перетворювач для приладу ACFM може надійно виявляти тріщини на поверхні довжиною 10 мм і глибиною до 2 мм на багато прохідних зварних з'єднаннях,



Рис. 4. Загальний вигляд системи АСFM фірми TSC Amigo

або довжиною 5 мм і глибиною 0,5 мм на хороших поверхнях (шорсткість поверхні відповідає  $R_a = 1,25$ ), тобто різниця в якості поверхонь. Також для різбових з'єднань, якщо необхідно, техніку АСFM можна зробити більш чутливою завдяки використанню мікросондів і більш високих частот. В цьому випадку протяжні дефекти у вигляді тріщин будуть виявляються довжиною 2,2 мм і глибиною 0,3 мм, а в кольорових металах близько 4 мм і глибиною 0,5 мм. Очевидно, при цьому виникає більш високий відгук від шорсткості поверхні і т. п.

Також варто зауважити, що існує можливість безконтактного визначення розмірів тріщин, і в той же час оператор може не бути фахівцем в НК, що є важливою перевагою АСFM – методу у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю.

Порівняємо АСFM з іншими методами НК, такими, як електромагнітно-акустичний (ЕМА), магнітних полів розсіювання (MFL) та вихрострумний (ЕТ). На наш погляд, це ті безконтактні методи, які можуть бути застосовані для виявлення прихованих протяжних тріщин у важких умовах та важкодоступних місцях (контроль під водою) (таблиця).

Чутливість до тріщин всіх методів, зазначених в таблиці, збільшується з підвищенням частот і змен-

**Порівняння методів НК**

Найменування методу Особливість	Вимірювання полів змінного струму (АСFM)	Магнітних полів розсію- вання (MFL)	Вихрострумо- вий метод (ЕТ)	Електро-магнітно- акустичний метод (ЕМА)
Низька якість поверхні не впливає на результат	+	+	-	+
Витратні матеріали	-	-	-	-
Можливість контролю кольорових металів	+	-	+	+
Можливість вимірювання товщини	±	±	±	+
Визначення протяжності тріщини, її довжини без еталонування	+	±	±	±
Залежність рівня сигналів від величини зазорів від поверхні	±	±	±	±

Прийняті позначення: + так; ± прийнятно, частково обмежено; - немає.

шенням зазорів, але не варто забувати, що також підвищується ймовірність шумів, які обумовлені відображеннями від неоднорідностей структури матеріалу, або електричними шумами апаратури, що в свою чергу може вплинути на достовірність результатів.

Дія електромагнітно-акустичного методу (ЕМА) заснована на електродинамічній і магнітопружній взаємодії всередині металу [7]. Імпульсні акустичні коливання збуджуються і приймаються при ЕМА безконтактно. Чим більше зазор, тим менше чутливий ЕМА – перетворювач до дрібних тріщин.

Електродинамічна взаємодія між магнітним полем і індукованим струмом виникає в струмопровідних матеріалах. Ультразвукова хвиля викликає механічні коливання, які генеруються безпосередньо в досліджуваному об'єкті (рис. 5). Збудження і прийом ультразвукових хвиль походить від впливу на поверхні електропровідного об'єкта змінних і постійних магнітних полів. Індуктор, через який протікає імпульс високочастотного струму, створює в поверхневому шарі металу вихровий струм. В результаті спільної дії вихрового струму і магнітного поля виникають сили Лоренца, що створюють механічні ультразвукові коливання відповідного типу. Залежно від конструктивних параметрів індуктора і орієнтації поляризуючого поля, збуджуються зсувні SH – хвилі радіальної

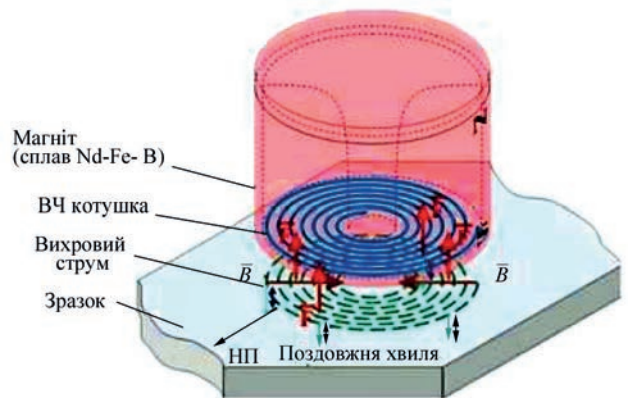


Рис. 5. Схема ЕМА-перетворювача для поперечних хвиль [10]

або лінійної поляризації. При ЕМА УЗК є можливість роботи крізь неметалеві покриття до 4 мм.

Перевагою даного методу є висока ймовірність контролю виробу в умовах низьких і високих екстремальних температур при погано підготовленій поверхні ОК. Недоліком є мертва зона поверхнього шару виробу (близько 5 мм).

Далі розглянемо Magnetic Flux Leakage Technology (MFL) – метод виявлення витoku магнітного потоку, технологію магнітного неруйнівного контролю, яка реалізується, наприклад, на основі датчиків Холла [8, 9]. Витік магнітного потоку є найчастіше використовуваними для оцінки цілісності трубопроводів. Також він найчастіше використовується для виявлення тріщини, як в осьовому, так і в окружному напрямках, хоча він схильний до впливу товщини стінки труби та інших факторів. В цьому випадку в результаті локального намагнічування матеріалу з'являється магнітний потік розсіювання над поверхнею об'єкта, який реєструється датчиком Холла. Даний метод так само працює при наявності зазору між перетворювачем і ОК. При розташуванні твердотілого чутливого елемента перпендикулярно поверхні ОК записується тангенціальна складова напруженості потоку розсіювання магнітного поля. Обмотка зі змінним струмом збуджує безпосередньо під собою в електропровідному напівпросторі однорідне електромагнітне поле, де відповідно до принципу дзеркального відображення вихровий струм буде практично лінійним. При знаходженні обмотки над протяжним дефектом, напрямком якого збігається з віссю обмотки, відбудеться насичення тріщин вихровими струмами і магнітне поле розсіювання на поверхні об'єкта збільшується. Довжина тріщини може визначатися за допомогою одного магнітного датчика або матриці таких датчиків, які переміщуються разом з котушками збудження всередині перетворювачів.

Перевірка витoku магнітного потоку не вимагає попередньої обробки і сигнали легко виявляються, що в результаті дає можливість виявити безліч типів поверхневих дефектів. Недоліком методу є чутливість до швидкості, стінки виробу повинні досягнути повного магнітного насичення.

Вихрострумний метод (Eddy – current testing) (ЕТ) неруйнівного контролю заснований на аналізі взаємо-

дії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, створюваних котушкою збудження в електропровідному ОК цим полем.

На рис. 6 показано принцип виникнення вихрових струмів і їх перерозподіл при наявності тріщини.

Магнітне поле вихрових струмів (рис. 6) протилежно первинному магнітному полю обмотки збудження, тому результуюче поле залежить від електромагнітних властивостей ОК і від зазору між ОК і датчиком. Цей метод в залежності від розмірів котушок збудження може виявляти дрібні дефекти, аж до визначення структури матеріалу, які необхідно виявляти в таких галузях, як авіація і енергетика. Перевірка методом вихрових струмів вимагає попередньої ретельної обробки ОК, тоді сигнали легко виявляються, що в результаті дає можливість виявити безліч типів поверхневих дефектів. Недоліком методу є відносно невелика глибина проникнення в феромагнітну сталь, щоб можна було виявляти дефекти, який знаходяться на глибині більше 1...2 мм. Глибина проникнення в металах з низькою електропровідністю (таких, як нержавіюча сталь, титан, нікелеві сплави, бронза і т. п.) становить 5...8 мм при 5 кГц, тоді як глибина проникнення в металах з високою електричною провідністю (таких, як алюміній, мідь і вольфрам) становить близько 1...2 мм при тих же частотах.

Сьогодні методи ЕМА, MFL і ЕТ можуть застосовуватися для товщинометрії і виявлення інших дрібних дефектів. Їх основна відмінність в тому, що за допомогою ЕМА зручно контролювати великі товщини і їх залишкове значення. Метод вихрових струмів ефективно використовується для контролю поверхневих шарів виробів, виконаних з немагнітних металів, там, де не можуть застосовуватися магнітні методи. Метод АCFM ґрунтується на принципах вихреструмного методу і може бути альтернативою методам MFL, де застосовується локальне намагнічування основного металу.

Очевидно, що НК без зачистки поверхні, контроль через фарбу і ізоляцію будь-яким з зазначеним в таблиці методом, буде втрачати інформацію через велику відстань до об'єкта, а також зростає ймовірність виникнення помилкових сигналів, що в свою чергу ускладнює інтерпретацію результату контролю.

Назвемо умовно цей підхід Crack Testing, тобто контроль тріщин (СТ – ідея), або пошук розколин (великих тріщин), так як виявлення дрібних дефектів в деяких випадках неможливо з об'єктивних причин (наприклад, груба, не зачищена поверхня ОК).

При виборі фізичного методу для реалізації підходу Crack Testing треба зуміти відповісти на питання: «Який великий дефект не може бути пропущений» при непідготовленому або погано підготовленому об'єкті під НК.

Суть підходу СТ – ідеї, в тому, що вона не розрахована на високу чутливість і якісну зачистку

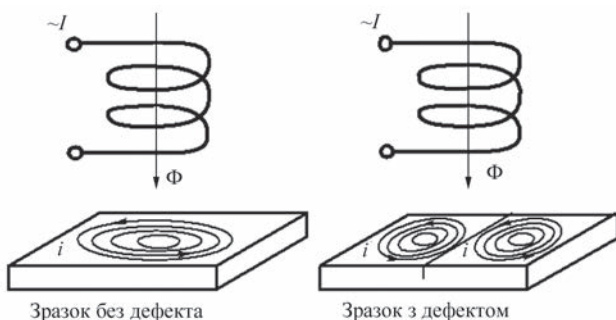


Рис. 6. Розподіл струмів в бездефектній і дефектній ділянках з тріщиною при традиційному вихрострумному контролі

поверхні виробу, що обмежує застосування НК, важкодоступність об'єктів контролю (наприклад, висотні або підводні ОК), а в деяких випадках збір даних виконує фахівець, що не має відношення до НК (наприклад, водолаз або альпініст). Виявлення дрібних дефектів в такій ситуації стає вкрай важким з вище викладеної причини.

Метод АСFM може застосовуватися при перевірці грубої поверхні конструкцій з будь-яких електропровідних матеріалів (кольорових металів). При цьому, кількість пропущених великих дефектів і хибних сигналів при АСFM нижче в порівнянні з традиційним вихрострумним методом. Також існує можливість використання методу ЕМА спільно з АСFM – методом, якщо це необхідно. При цьому глибина проникнення поширюється на всю товщину виробу.

Вихрострумний метод гірше справляється з підходом Crack Testing, так як спочатку був розрахований на добре підготовлену поверхню ОК і велику частоту збуджуючих обмоток. В іншому випадку котушки збудження повинні бути протяжними (велика робоча площа) або повинна бути матриця з великої кількості дрібних датчиків (котушок) малого діаметра. Також робоча частота не повинна перевищувати 5 кГц. В такому виконанні з'являється можливість виявляти великі тріщини при відповідній потужності збудження. MFL в основному застосовується для феромагнітних виробів і також добре підходить під завдання Crack Testing, так як у нього досить висока швидкість і надійність при контролі.

На завершення потрібно відзначити переваги АСFM-методу:

- можливість контролю без попередньої зачистки;
- можливість визначення глибини дефекту (тріщини);
- можливість контролю в екстремальних умовах (під водою);
- не вимагає у оператора (збирача даних) навичок в НК (аналіз і обробка результатів відбувається віддалено).

Також не слід забувати, що в НК немає універсального методу, за допомогою якого можна було проконтролювати і зробити висновок про його придатність. Кожен метод НК має свої переваги і в цей же час і недоліки. Тому для контролю особливо небезпечних об'єктів застосовують комплекс різних методів НК, щоб виключити пропуски дефектів.

### Список літератури

1. Ge Jiu hao, Li Wei, Chen Guoming Yin Xiaokang et al. (2017) Analysis of signals for inclined crack detection through alternating current field measurement with a U-shaped probe. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 59, 3, 121–128.
2. Li Wei an, Chen Guoming, Yin Xiaokang et al. (2013) Analysis of the lift-off effect of a U-shaped ACFM system. *NDT&E International*, 53, 31–35.
3. Eddyfi Technologies. Available at: <https://eddyfi.com/en> [Accessed 22.06.2020].

4. TSC Subsea. Available at: <https://www.tscsubsea.com/> [Accessed 22.06.2020].
5. Троицкий В.А. (2018) *Дефектоскопия XXI века*. Киев, Изд-во ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ.
6. Шаранова Д. А. (2016) Бесконтактные методы выявления питинговых дефектов стенок металлических изделий. *Территория Нефтегаза*, 10, 34–40.
7. Кириков А.В., Забродин А.Н., Комлик А.В. (1999) Методы и средства ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно-акустических преобразователей. *В мире неразрушающего контроля*, 3, 18–20.
8. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П. (2015) Оптимизация параметров первичных измерительных преобразователей, реализующих технологию MFL. *Дефектоскопия*, 8, 64.
9. Слесарев Д.А., Абакумов А.А. (2013) Обработка и представление информации в MFL методе неразрушающего контроля. *Там же*, 9, 3.
10. Потапов А.И., Сясько В.А., Соломенчук П.В. и др. (2015) *Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий*. Т. 2. СПб, Нестор-История.
11. Гуляев А.П. (1986) *Металловедения*. Рипол Классик.
12. Троицкий В.А., Радко В.П., Демидко В.Г. Бобров В.Т. (1986) *Неразрушающий контроль качества сварных конструкций*. Киев, Техника.
13. EMWORKS, Alternating Current Field Measurement. Available at: <https://www.emworks.com/application/alternating-current-field-measurement> [Accessed 22.06.2020].

### References

1. Ge Jiu hao, Li Wei, Chen Guoming Yin Xiaokang et al. (2017) Analysis of signals for inclined crack detection through alternating current field measurement with a U-shaped probe. *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 59(3), 121–128.
2. Li Wei an, Chen Guoming, Yin Xiaokang et al. (2013) Analysis of the lift-off effect of a U-shaped ACFM system. *NDT&E Intern.*, 53, 31–35.
3. Eddyfi Technologies. <https://eddyfi.com/en> (Accessed 22.06.2020).
4. TSC Subsea. <https://www.tscsubsea.com/> (Accessed 22.06.2020).
5. Troitskiy, V.A. (2018) *Defectoscopy of XXI century*. Kiev, PWI [in Russian].
6. Sharanova, D.A. (2016) Contactless methods of detection of pitting defects in metal product walls. *Territoriya Neftegaza*, 10, 34–40 [in Russian].
7. Kirikov, A.V., Zabrodin, A.N., Komlik, A.V. (1999) Methods and means of ultrasonic testing of rolled stock with application of electromagneto-acoustic transducers. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, 3, 18–20 [in Russian].
8. Potapov, A.I., Syasko, V.A., Pudovkin, O.P. (2015) Optimization of parameters of primary measuring transducers implementing the MFL technology. *Defektoskopiya*, 8, 64 [in Russian].
9. Slesarev, D.A., Abakumov, A.A. (2013) Data processing and presentation in MFL method of nondestructive testing. *Ibid.*, 9, 3 [in Russian].
10. Potapov, A.I., Syasko, V.A., Solomenchuk, P.V. et al. (2015) *Electromagnetic and magnetic methods of nondestructive testing of materials and products*. Vol. 2. St.-Petersburg, Nestor-Istoriya [in Russian].
11. Gulyaev, A.P. (1986) *Metals science*. Ripol Classic [in Russian].
12. Troitskiy, V.A., Radko, V.P., Demidko, V.G., Bobrov, V.T. (1986) *Nondestructive testing of welded structure quality*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
13. EMWORKS, Alternating Current Field Measurement. <https://www.emworks.com/application/alternating-current-field-measurement> (Accessed 22.06.2020).

## SIMPLIFIED MONITORING OF METAL STRUCTURES WITHOUT CLEANING THEIR SURFACES

V.O. Troitskiy, V.A. Litvinenko

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

The formation of cracks, corrosion damage and aging of the metal are the main problem of long-life metal structures. Most often, these structures have unfavorable conditions for high-quality cleaning of their surface, which is required by the rules of non-destructive testing. To assess the condition of such numerous objects, there is the method of Alternative Current Field Measurement (ACFM). The ACFM method combines the physical foundations of eddy current and magnetic methods of non-destructive testing. ACFM devices are designed mainly for the detection of extended defects in the form of cracks without scraping the surface of the object, as well as for underwater control. There are many objects that are subject to control, have a poor surface of the object of control (OC) (rough surface, high roughness or poorly prepared OC surface, etc. of welded structures and other metal products). Let us conditionally call this idea Crack Testing (CT). CT idea is implemented not only by the ACFM method, but also by the traditional methods of electro-magnetic acoustic (EMA), magnetic flux leakage (MFL), and eddy – current testing (ET). 13 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

*Keywords: metal structures, nondestructive testing, ACFM, eddy current, magnetic powder, EMA, cracks, flaw detection, crack testing, defects*

Надійшла до редакції 17.07.2019

XII Міжнародна спеціалізована виставка  
**КИЇВСЬКИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК**

МІЖНАРОДНИЙ  
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР  
Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15  
тел.: (044) 201-11-58, 201-11-55, 201-11-56  
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua,  
plasto@iec-expo.com.ua  
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

**24–27 листопада  
2020**

Генеральний інформаційний партнер: **Український інженерний журнал**  
Ексклюзивний медіа-партнер: **ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА**  
Технічний партнер: **RealMedia**

**XIX МІЖНАРОДНИЙ  
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2020**  
МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

**24 - 27  
листопада**

ОРГАНІЗАТОР:  
Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер: **Український інженерний журнал**  
Ексклюзивний медіа-партнер: **ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА**  
Технічний партнер: **RealMedia**

Міжнародний виставковий центр  
Україна, 02002, Київ  
Броварський пр-т, 15  
"Леобережна"  
☎ (044) 201-11-55, 201-11-56, 201-11-58  
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua  
www.iec-expo.com.ua, www.mcc.ukr  
www.tech-expo.com.ua

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

**DVS** GERMAN WELDING SOCIETY  
**MESSE  
ESSEN**

www.schweissen-schneiden.com



# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ РИЗИКІВ НА ТЕХНІЧНУ БЕЗПЕКУ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Ю.К. Бондаренко, О.В. Ковальчук

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

Згідно обов'язкових вимог технічних регламентів до технічної документації на відповідальну продукцію зварювального виробництва, технічна документація повинна давати можливість оцінити відповідність продукції нормативним вимогам і включати опис проведення і результати належного аналізу та оцінки ризику (ризиків). На даний час достовірна методика оцінювання ризику зварної конструкції відсутня. В статті визначено особливості виникнення ризиків протягом життєвого циклу продукції. Розглянуто алгоритм виникнення складових ризику при експлуатації зварної конструкції, який є сумарною як ризиків, пов'язаних з відхиленнями процесів проектування, виготовлення, експлуатації (іншими словами, пов'язаних з процесами життєвого циклу продукції), так і ризиків, пов'язаних з небезпеками, які виникають від дій на конструкції та імовірністю експлуатації конструкції поза межами призначення. Відзначено, що ризик при експлуатації є імовірність досягнення конструкцією граничного стану протягом визначеного періоду експлуатації. При цьому граничні стани підрозділяються на дві групи. До першої групи належать граничні стани, перехід через які призводить до повної непридатності об'єкта. До другої групи відносяться ті, які ускладнюють нормальну експлуатацію об'єкта або зменшують його довговічність порівняно з встановленим терміном. При експлуатації зварна металева будівельна конструкція зазнає, насамперед, механічних і корозійних впливів. Дано посилання на теорії та наведено формули, які визначають імовірності відмови металевої конструкції. Рекомендовано для розрахунку сумарної величини ризику експлуатації користуватись формулою Байеса. Бібліогр. 17, табл. 8, рис. 4.

*Ключові слова:* ризик, ризик експлуатації, управління ризиками, менеджмент ризику, імовірність виникнення небезпек, зварна конструкція, технічна безпека

Кожен виробник зварної конструкції має на меті випускати продукцію належної якості, задовольняти споживача, зацікавити нових покупців, інвесторів і при цьому виконувати обов'язкові законодавчі та нормативні вимоги, які до неї пред'являються. На даний час обов'язкові технічні вимоги до відповідальної зварювальної продукції визначені Технічними регламентами [1–3] (табл. 1) та конкретизовані стандартами, переліки яких затверджені відповідними наказами Міністерства економічного розвитку та торгівлі України.

Проте, в реальному житті виробники зварних конструкцій стикаються з низкою небезпек, які можуть негативно впливати на виробництво і бути причиною випуску бракованої продукції, зниження обсягу випуску, втрачання ринку та інше. Небезпеки (небезпечні фактори) можуть мати по відношенню до виробництва як зовнішнє, так і внутрішнє походження. Ці фактори детально розглянуто в попередніх статтях авторів [4–6]. Небезпеки породжують ряд невизначеностей щодо того, чи зможе виробництво досягнути поставлених цільових показників і у який термін. Такий вплив невизначеностей на цілі і розглядається як ризики [7, 8].

Дійсно, за визначенням, згідно стандарту ДСТУ ISO Guide 73:2013 «Керування ризиками.

Словник термінів», термін ризик визначається як вплив невизначеності на цілі.

Вплив розглядається як відхилення з позитивними і негативними наслідками. Цілі можуть мати різні аспекти (такі як фінансові аспекти, які стосуються професійної безпеки та здоров'я, екологічні завдання) і можуть відноситись до різних рівнів (таким як стратегічний рівень, організаційний, рівень проекту, продукції, процесу). Ризик часто характеризується посиланнями на потенційно можливі події і наслідки або їх комбінації. Ризик часто виражається в комбінації події і пов'язаної з нею імовірності інцидентів (аварій, невідповідностей вимогам нормативних документів). Невизначеність – це стан, в тому числі, часткової відсутності інформації відносно розуміння чи знання подій, їх наслідків або імовірності [7].

Підприємство ідентифікує ризики, аналізує, оцінює ризики і приймає рішення, чи слід змінювати ризик шляхом його обробки, чи слід прийняти його [9]. Якщо такий процес керування конкретними ризиками інтегрований в загальну систему управління на підприємстві, це означає, що підприємство впроваджує менеджмент ризику. При цьому об'єктами менеджменту ризику є як система управління в цілому, її процеси, так і

Таблиця 1. Зварювальна продукція, на яку поширюються технічні регламенти

Номер з/п	Назва зварної конструкції	Назва технічного регламенту
<b>Зварні конструкції</b>		
1	Парові та водогрійні котли	Технічний регламент водогрійних котлів, що працюють на рідкому чи газоподібному паливі Технічний регламент приладів, що працюють на газоподібному паливі
2	Посудини, що працюють під тиском	Технічний регламент безпеки обладнання, що працює під тиском Технічний регламент безпеки простих посудин високого тиску
3	Пересувне обладнання, що працює під тиском	Технічний регламент пересувного обладнання, що працює під тиском
4	Зварні конструкції для будівництва, будівельні матеріали (в тому числі полімерні труби)	Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд
5	Складові частини для залізничного транспорту, рейки	Технічний регламент безпеки інфраструктури залізничного транспорту
6	Зварні вироби для сільськогосподарських та лісгосподарських машин	Технічний регламент щодо складових частин і характеристик колісних сільськогосподарських та лісгосподарських тракторів, їх причепів і змінних причіпних машин, систем, складових частин та окремих технічних вузлів
7	Вантажопідіймальне обладнання	Технічний регламент безпеки машин
8	Кузови автомобілів	Технічний регламент з технічного обслуговування і ремонту колісних транспортних засобів (в т. ч. Постанова КМУ від 22 грудня 2010 р. N 1166 «Про єдині вимоги до конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів, що експлуатуються»)
<b>Зварювальне обладнання</b>		
9	Зварювальне обладнання	Технічний регламент низьковольтного електричного обладнання Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання Технічний регламент машин і механізмів
<b>Зварювальне обладнання (засоби індивідуального захисту)</b>		
10	Засоби індивідуального захисту	Технічний регламент засобів індивідуального захисту

конкретні проекти, процеси, продукція. Всі складові менеджменту пов'язані між собою. Дійсно, результируючим якісних технологічних процесів (процесів, ризик яких визначено і утримується на прийнятному рівні) є якісна продукція (та, яка несе в собі мінімальний визначений прийнятний ризик). І навпаки, не можна отримувати якісну продукцію, якщо виробничі процеси містять значні невизначеності. Сучасна організація управління підприємством [10] будується на принципах ризик-орієнтованого підходу і визначає залежність ступеню регулювання процесів від ризиків (невизначеностей), які пов'язані з процесами.

Важливою складовою керування ризиком і менеджменту ризиком в цілому є впровадження моніторингу, в тому числі, оцінювання якості продукції методами неруйнівного контролю і технічної діагностики. Контроль, з точки зору ризик-орієнтованого підходу, має щодо ризику вирішальне значення. Контроль є діяльністю, яка визначає стан ризику конструкції. За результатами контролю розробляються дії з обробки ризику з метою зменшення його ступеню. Процес керування ризиком показаний на рис. 1.

Технічний регламент встановлює основні вимоги до безпеки, проектування, виготовлення, оцінки відповідності, маркування та введення в дію продукції, а також визначає порядок нагляду за дотриманням зазначених вимог.

Згідно Технічних регламентів встановлені наступні вимоги до технічної документації щодо проектування та розроблення продукції [2]: «Виробник розробляє технічну документацію, яка повинна давати можливість оцінити відповідність продукції відповідним вимогам і включати опис проведення і результати належного аналізу та оцінки ризику (ризиків). У технічній документації повинні зазначатися застосовані вимоги та пов'язані з проведенням оцінки відповідності питання проектування, виробництва і функціонування продукції. Технічна документація повинна



Рис. 1. Алгоритм керування ризиком

у відповідних випадках містити принаймні такі елементи:

- загальний опис продукції;
- ескізний проект, виробничі креслення та схеми компонентів, складальних вузлів, електричних кіл тощо;
- описи та пояснення, необхідні для розуміння зазначених креслень і схем та функціонування продукції;
- список застосованих повністю чи частково національних стандартів та/або інших відповідних технічних специфікацій, відповідність яким надає презумпцію відповідності продукції суттєвим вимогам, а в разі, коли зазначені стандарти не були застосовані, - описи рішень, прийнятих з метою забезпечення відповідності суттєвим вимогам технічного регламенту. У разі часткового застосування національних стандартів, відповідність яким надає презумпцію відповідності продукції суттєвим вимогам, у технічній документації повинні зазначатися їх частини, які були застосовані:

- результати виконаних проектних розрахунків, проведених досліджень тощо;
- протоколи випробувань.

Таким чином, однією з умов, які ставляться до проектування, виготовлення та розміщення товарів на ринку, є «належний аналіз та оцінка ризику (ризиків)».

В визначенні, яке застосовується Законом України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» [1], термін «ризик» означає можливість виникнення та імовірні масштаби наслідків негативного впливу протягом певного періоду часу.

Згідно закону України «Про загальну безпечність нехарчової продукції» [3]:

серйозний ризик – будь-яка загроза суспільним інтересам, що потребує оперативного втручання державних органів, у тому числі така, наслідки якої не виявляються негайно;

ступінь ризику – рівень небезпеки (загрози) суспільним інтересам, що становить або може становити продукція.

Ризик продукції виникає на всіх стадіях життєвого циклу зварювальної продукції. Кожний етап життєвого циклу «накладає» свій ризик, а найбільший ризик продукції утворюється при її експлуатації в реальних умовах.

В ході виконання науково-дослідної роботи встановлено, що ризик продукції протягом життєвого циклу пов'язаний з (рис. 2):

1. Призначенням конструкції;
2. Виробничими чинниками, а саме: невідповідностями процесів:

- 2.1. проектування;
- 2.2. виробництва;
- 2.3. монтажу;
- 2.4. експлуатаційного обслуговування;
- 2.5. недостовірностями та невизначеностями процесів випробувань протягом життєвого циклу п.п.1–4;
3. Фізичними впливами на конструкцію.

Поетапне виникнення ризику протягом життєвого циклу зварної конструкції схематично показано на рис. 2, як результат наступних основних груп складових: *a* – функціонування невідповідної системи менеджменту якості: проектування зварної конструкції, виробництва, технічного обслуговування; *b* – основних факторів зовнішніх загроз.

При підготовці технічного завдання, виконання проектування виконується аналіз призначення продукції [2, 11, 12].

Аналіз призначення конструкції містить:

- умови експлуатації (дії на конструкцію);

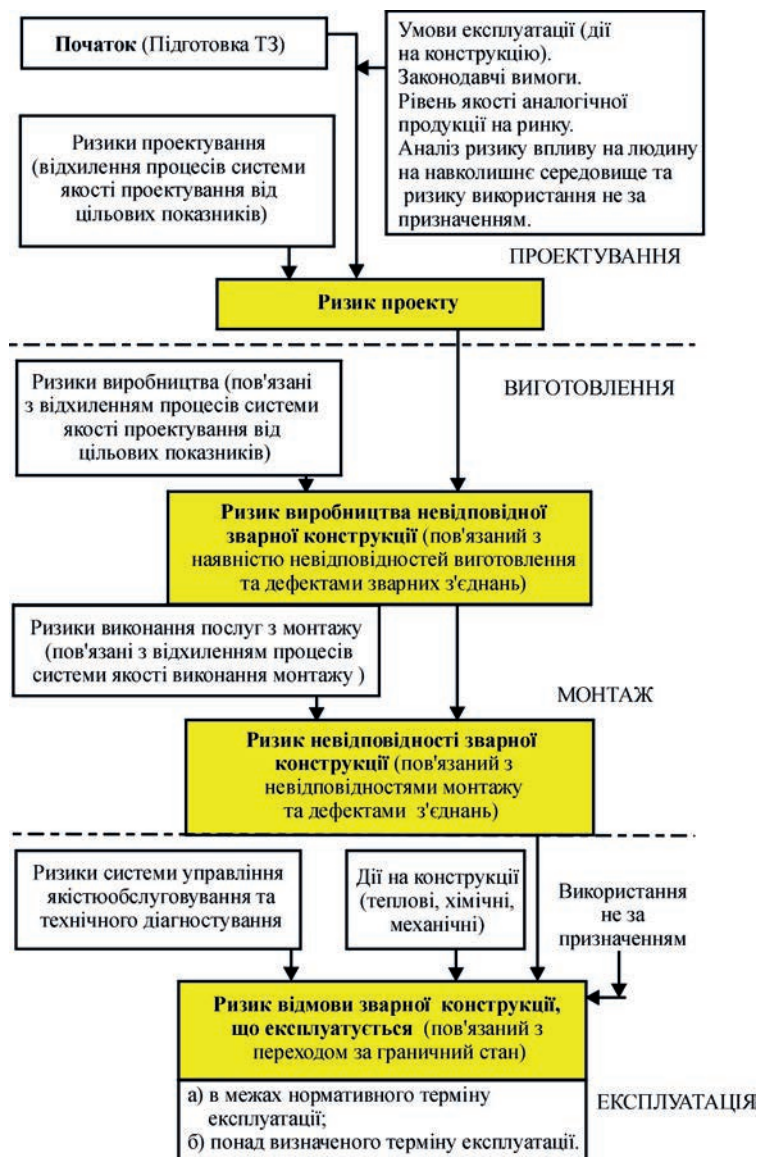


Рис. 2. Алгоритм виникнення ризику в зварних конструкціях

- законодавчі вимоги щодо конструкції та аналізування ризиків;
- рівень якості аналогічної продукції на ринку;
- аналіз ризиків впливів на людину при виробництві та експлуатації конструкції;
- аналіз ризику впливу на навколишнє середовище при виробництві та експлуатації;
- аналіз ризиків використання зварної конструкції не за призначенням;
- аналіз залишкових ризиків після дій персоналу при усуненні екстрених ситуацій.

Стандарти менеджменту якості розглядають ризики як імовірність відхилення кожного з процесів, який описує повну діяльність зварювального підприємства по управлінню, постачанню, виробництву конструкцій, моніторингу, застосовуючи методи НК і ТД.

Тому рекомендуємо визначити ризики, притаманні кожному з процесів. Детальна схема процесного підходу в зварювальному виробництві представлена авторами на рис 3. Процесний підхід дозволяє визначити як власника процесу, так і власника ризику, та відповідальних за процес, з яким пов'язано виникнення ризику. Це дозволяє також встановити процеси, які передують даному процесу і визначають причинно-наслідкові зв'язки при виникненні ризику при виготовленні конструкції. Аналогічний підхід застосовується і для системи управління якістю організацій, які відповідають за експлуатування (технічне обслуговування) конструкції.

Виробничий ризик, пов'язаний з відхиленням того чи іншого процесу, розраховується як добуток двох величин: а) імовірності відхилення процесу від цільового показника виконання та б) величини наслідку, який пов'язаний з даним процесом [6].

Документування виявлених ризиків доцільно проводити за формою табл. 2.

На зварну конструкцію, яка експлуатується, діють фізичні впливи, які мають механічну, теплову і хімічну природу, та їх комбінації.

При експлуатації будівельних конструкцій суттєвими впливами можуть вважатись механічні дії на конструкцію та корозійні впливи, що приводять до корозійного пошкодження металу.

Ризик експлуатації конструкції розглядається як імовірність відмови і пов'язані з цим втра-

ти. Відмовою може вважатися зміна властивостей конструкції понад граничний стан. Аналіз літературних джерел показав, що граничний стан від механічних дій на будівельну конструкцію поділяють на дві групи, які в свою чергу має підгрупи.

Перша група містить граничні стани, перехід через які призводить до повної непридатності об'єкта (основи конструкції, конструкції або елемента) до експлуатації і для яких позаграничними станами може бути: руйнування будь-якого характеру (в'язке, крихке, в результаті втомлюваності); втрата стійкості форми; втрата стійкості положення; перехід у змінну систему; якісна зміна конфігурації елементів зварної конструкції; інші явища, за яких виникає потреба в припиненні експлуатації (наприклад, виникнення перфорації стінки ємності з токсичними речовинами або надмірні переміщення основи при посадках сипучих ґрунтів).

Граничні стани першої групи можуть бути пов'язані з порушенням вимог збереження чи можливості існування конструкції або недотримання вимог безпеки для людей і довкілля. Досягнення граничного стану конструкції першої групи класифікується як відмова-зрив (відмова, яка одразу ж викликає збитки).

Друга група містить граничні стани, які ускладнюють нормальну експлуатацію об'єкта або зменшують його довговічність порівняно з встановленим терміном експлуатації і для яких позаграничними станами є: надмірне перевищення або повороти деяких точок конструкції; недопустимі коливання (надмірні значення амплітуди, частоти, швидкості, прискорення); утворення та розкриття внутрішніх дефектів, досягнення ними гранично-допустимих значень розкриття чи довжини (в відповідальних конструкціях тріщини не допускаються); втрата стійкості форми у вигляді локального деформування; пошкодження від корозії чи інших видів фізичного зношення, які призводять до необхідності обмеження експлуатації внаслідок зменшення терміну експлуатації об'єкта.

Граничні стани другої групи можуть бути пов'язані з порушенням вимог щодо використання зварної конструкції без обмежень, можливостей обслуговування персоналом, неналежне використання НК і ТД, зовнішнього вигляду, можливостей модернізації. Часто ці граничні стани класифікуються як «відмова – перешкода».

Таблиця 2. Формуляр карти реєстрації і обробки ризиків (рекомендована форма таблиці)

Відділ	Категорія ризику	Підкатегорія	Опис ризику	Наслідок ризику	В даний момент			Власник ризику	Наступні дії, що відносяться до пом'якшення	Власник пом'якшення	Нормований показник, пов'язаний з джерелом ризику	Терміни виконання	Цільові показники		
					Імовірність	Впливи	Ступені ризику						Імовірність	Впливи	Цільовий рівень ризику після пом'якшення

Умова забезпечення безвідмовності, тобто не виходу за граничний стан, записується нерівністю виду [13]:

$$g(G_d, f_d, a_d, C, \gamma_n, \gamma_d, T_{ef}) \geq 0,$$

де  $g(o)$  – така функція параметрів системи, за якої  $g(o) < 0$  означає досягнення позаграничного стану;  $G_d, f_d, a_d$  – розрахункові значення навантажень, характеристик міцності матеріалів або опору ґрунтів та геометричних характеристик конструкції відповідно;  $C$  – обмеження на параметр, що контролюється (наприклад, допустиме граничне розкриття дефекту);  $\gamma_n$  – коефіцієнт надійності за відповідальністю (коефіцієнт відповідальності), який враховує значущість конструкції і об'єкта в цілому, а також можливі наслідки відмови та враховується як множник до розрахункового значення навантаження;  $\gamma_d$  – коефіцієнт надійності моделі, який враховує невизначеність розрахункової схеми та інші аналогічні обставини (наприклад, чутливість конструкції до локальних руйнувань, початкові недосконалості, підвищену швидкість зношення), приймається як множник до розрахункового значення навантаження.

В стандарті [13] розглядається розрахунок імовірності досягнення металевої конструкції відмови за встановлений термін служби  $T_{ef}$ .

З метою визначення швидкості можливого досягнення конструкцією критичного стану від корозійних впливів (або імовірності досягнення граничного стану протягом часу експлуатації  $T_{ef}$ ), рекомендовано застосовувати наступні показники оцінки якості [14].

1. Масовий  $K_m^\pm$  характеризує зміну маси зразка матеріалу в результаті корозії ( $г/м^2 \times год$ ).

$$K_m^\pm = \frac{m_1 - m_2}{S\tau},$$

де  $m_1, m_2$  – маса матеріалу відповідно до та після корозії, г;  $S$  – площа поверхні матеріалу,  $м^2$ ;  $\tau$  – час тривання корозії, год.

Зв'язок між додатним та від'ємним масовим показником

$$K_m^- = K_m^+ \frac{n_o - A_m}{n_m A_o},$$

де  $n_o, n_m$  – валентності окиснювача та металу відповідно;  $A_o, A_m$  – атомні маси окиснювача та металу відповідно.

2. Глибинний  $K_p$  дає змогу оцінити глибину корозійного руйнування металу ( $мм/год$ ).

$$K_p = 8,76 \frac{m_1 - m_2}{\rho S \tau}.$$

Зв'язок між глибинним і масовим показником корозії:

$$K_p = 8,76 \frac{K_m^-}{\rho},$$

де  $\rho$  – густина металу  $г/см^3$ .

3. Об'ємний  $K_y$ . У разі корозії металу в кислотах швидкість корозії може бути визначена за кількістю виділеного водню ( $см^3/см^2 \cdot год$ )

$$K_y = \frac{V 273(P - P_{H_2O})}{S\tau(273 + t)760}$$

$P, P_{H_2O}$  – відповідно атмосферний тиск під час експериментів та тиск насиченої водяної пари при температурі вимірювання, мм рт. ст.;  $t$  – температура вимірювання,  $^{\circ}C$ ;  $V$  – об'єм виділеного водню,  $см^3$ .

4. Зміна електричного опору  $K_R$

$$K_R = \frac{R_k}{R_o},$$

де  $R_o$  та  $R_k$  – відповідно опір матеріалу до та після корозії.

Для врахування комбінації дій рекомендовано застосовувати метод аналізу ризику сіток Баєса [9]. Виникає певна проблема отримання статистичних даних про можливі відмови через високу вартість проведення випробувань як безпосередньо об'єктів, так і необхідності проведення випробувань контрольних зварних з'єднань, а також збору інформації протягом часу експлуатування конструкцій. Аналіз відмов здійснюється за результатами випробувань в випробувальних лабораторіях підприємств України.

Загальний вигляд теореми Байєса [9]:

$$P(A/B) = \{P(A)P(B/A)\} / \sum P(B/E_i)P(E_i) \quad (1)$$

де  $P(X)$  – імовірність події  $X$ ;  $P(X/Y)$  – імовірність події  $X$ ;  $E_i$  -і-та подія.

В самій простій формі теорему Байєса для двох видів впливу можна записати

$$P(A/B) = \{P(A)P(B/A)\} / \sum P(B) \quad (2)$$

Байєсовську статистику можна розглядати як ступінь довіри особи до виникнення певної події. Оскільки підхід Байєса базується на суб'єктивному тлумаченні імовірності, він забезпечує безпосередню основу для розглядання варіантів прийняття рішення і розроблення мереж Байєса.

Томас Байєс одним з перших зацікавився ймовірністю настання подій у майбутньому, ґрунтуючись на інформації про минулі випробування. Саме теорема Байєса пов'язує апіорні імовірності та апостеріорні ймовірності після спостереження за наслідками.

На відміну від інших методів інтелектуального аналізу даних, застосування байєсівських мереж до аналізу процесів різної природи, діяльності людини та функціонування технічних систем дозво-

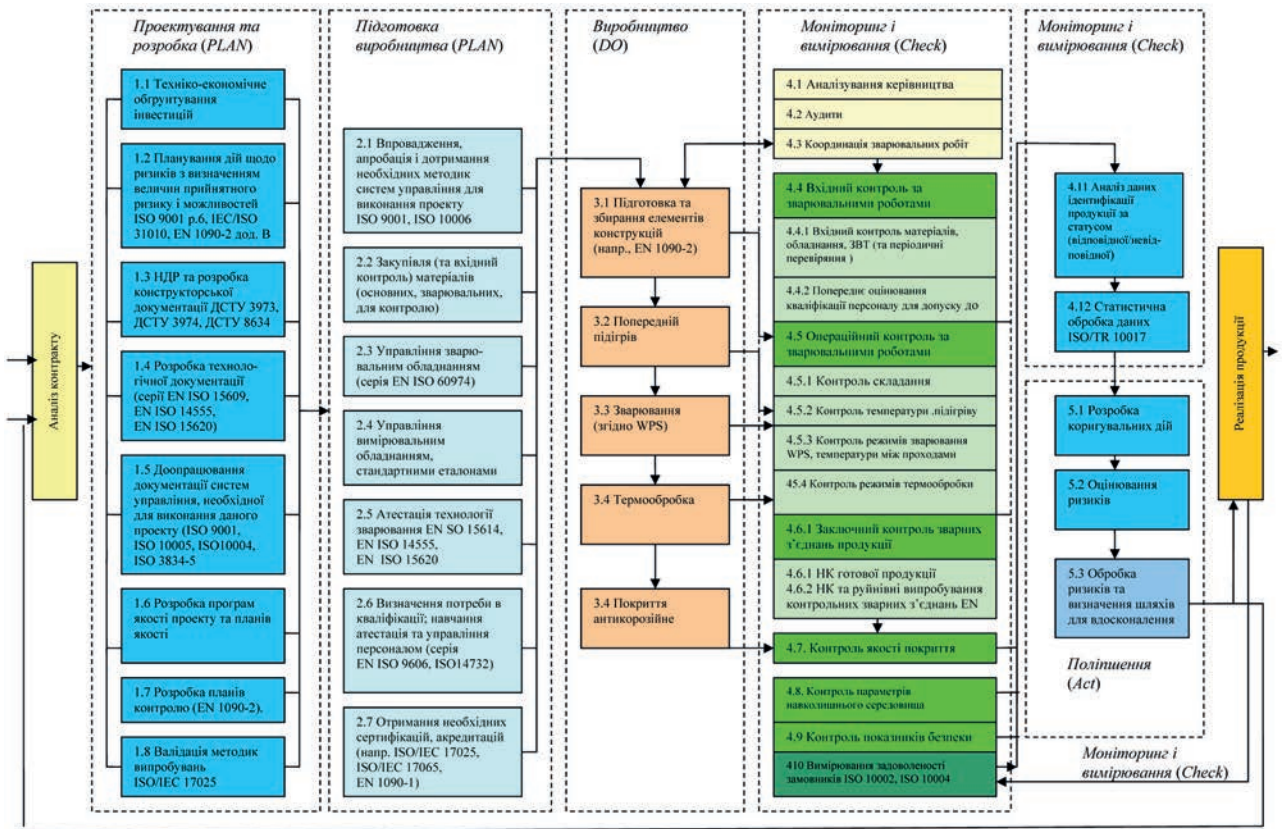


Рис. 3. Системний підхід до управління процесами зварювального виробництва

ляє враховувати та використовувати будь-які вхідні дані у вигляді експертних оцінок і статистичної інформації. У свою чергу, змінні можуть бути дискретними і безперервними, а характер їх надходження при аналізі та прийнятті рішення може бути в режимі реального часу і у вигляді статичних масивів інформації і баз даних [15].

Метод мереж Байєса передбачає використання графічної моделі для зображення низки змінних і їхніх імовірнісних зв'язків. Мережа складається з вузлів, які представляють випадкову змінну, і стрілок, які зв'язують родинний вузол з дочірнім вузлом (родинний вузол є змінною), яка безпосередньо впливає на іншу (дочірню змінну). Приклади етапів які необхідно виконати для побудови мережі Байєса такі:

- визначити змінні системи;
- визначити причинні зв'язки між змінними;
- установити умовні та апіорні імовірності (при цьому величина умовних ймовірностей може бути пов'язана з невизначеністю вимірювань методів НК і ТД, обмеженістю методів контролю, вибірковістю проведення контролю);

- додати доказове свідчення про мережі;
- актуалізувати довірчі рівні;
- виділити апостеріорні довірчі рівні.

У наведеному прикладі розглянуто побудову таблиці Байєса з метою визначення імовірності досягнення конструкцією граничного стану. Наприклад, згідно аналізу попередніх даних на вказаний тип конструкції імовірнісна довіра полягає в тому, що 99 % конструкцій не будуть мати відмову протягом часу експлуатації  $T_{ef}$ . В даному прикладі розглянемо граничний стан конструкції, який пов'язаний з утворенням недопустимих дефектів зварних з'єднань чи основного металу.

Застосовуючи правило Байєса добуток визначають множенням апіорних даних і імовірності. Апостеріорні дані визначають діленням значення окремого добутку на суму добутоків. Аналіз показує, що позитивний результат випробувань вказує на те, що апіорне значення зросло з 1 до 9 %. Аналізування значення  $(0,001 \times 0,98) / (0,01 \times 0,98) + (0,99 \times 0,1)$  показує, що немає перевищення граничного стану експлуатованого об'єкту, що в свою чергу має вагоме значення.

Таблиця 3. Таблиця апіорних і апостеріорних даних. Таблиця Байєса

	Апіорні дані	Імовірність	Добуток	Апостеріорні дані
Досягнув граничного стану протягом часу $T_{ef}$	0,01	0,98	0,0098	0,0901
Не досягнув граничного стану протягом часу $T_{ef}$ (відповідає вимогам)	0,99	0,10	0,0990	0,909
Підсумок	1		0,108	1

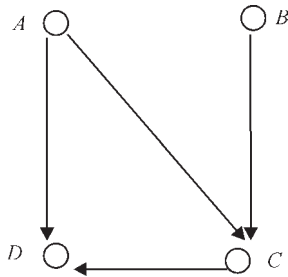


Рис. 4. Приклад сітки Байєса

Мережа Байєса, зображена на рис. 4.

Для умовних апіорних імовірностей, визначених в наведених нижче табл. 4–8 використано позначення: *Y* – позитивний та *N* – негативний. Позитивний елемент може бути визначено як «перевищив граничний стан» (*Y*), негативний – «як «не досягнув граничного стану» (*N*).

Для визначення апостеріорної імовірності  $P(A|D = N, C = Y)$  необхідно попередньо вирахувати  $P(A, B|D = N, C = Y)$ .

Використовуючи правило Байєса, значення імовірності  $P(D|A, C) \times P(C|A, B) \times P(A) \times P(B)$  необхідно визначити по формулі, як показано в таблиці 7, при цьому в останній графі показані нормалізовані імовірності, сума яких дорівнює 1, як отримано в попередньому прикладі (округлений результат).

Для отримання  $P(A|D = N, C = Y)$  потрібно підсумувати всі значення стовпця *B*.

Мережі Байєса використовують для отримання апостеріорних розподілів. Графічні попередні уявлення вихідних даних забезпечують розуміння моделі, при цьому дані можуть бути змінені для дослідження кореляції і чутливості параметрів.

Перевагами методу є наступні:

- для використання методу досить знання апіорної інформації;
- логічно виведені затвердження нескладні для розуміння;
- застосування методу ґрунтується на формулі Байєса;
- метод надає собою спосіб використання суб'єктивних імовірнісних оцінок.

Недоліками методу є наступні:

- визначення всіх взаємодій в мережах Байєса для складних систем не завжди здійсненне;
- підхід Байєса вимагає знання безлічі умовних ймовірностей, які зазвичай отримують експертними методами. Застосування програмного забезпечення засноване на експертних оцінках.

На даний час запропоновані і інші теорії. Так в роботі [16] запропонована методика аналізування ризику при експлуатації трубопроводів та резервуарів.

Впровадження менеджменту ризиків і забезпечення результативності потребує сильної і стійкої форми прихильності з боку керівництва підприєм-

ства, а також стратегічного і детального планування для досягнення стійкої на всіх рівнях політики управління ризиками.

Керівництву необхідно:

- визначати і підписувати політику менеджменту ризиків;
- забезпечувати узгодженість культури підприємства і політики менеджменту ризиків;
- забезпечувати показники діяльності в області менеджменту ризику на зварювальному виробництві, які узгоджуються з показниками діяльності організації (див. рис. 1);
- узгоджувати цілі менеджменту ризиків з цілями і стратегіями організації;
- забезпечувати відповідність законодавчим та іншим обов'язковим вимогам;
- встановити відповідальність за результат і виконання на відповідних рівнях підприємства на основі НК і ТД;
- забезпечити виділення необхідних ресурсів для менеджменту ризику та НК і ТД;
- передавати інформацію про вигоди менеджменту ризику всім зацікавленим сторонам;
- забезпечувати постійну відповідність структури для впровадження менеджменту ризику та НК і ТД.

Таблиця 4. Апіорні імовірності для вузла А та В

P (A = Y)	P (A = N)	P (B = Y)	P (A = N)
0,9	0,1	0,6	0,4

Таблиця 5. Умовні імовірності для вузла С з визначеними вузлами А та В

A	B	P (C = Y)	P (C = N)
Y	Y	0,5	0,5
Y	N	0,9	0,1
N	Y	0,2	0,8
N	N	0,7	0,3

Таблиця 6. Умовні імовірності для вузла D з визначеними вузлами А та С

A	B	P (D = Y)	P (D = N)
Y	Y	0,6	0,4
Y	N	1,0	0,0
N	Y	0,2	0,8
N	N	0,6	0,4

Таблиця 7. Апостеріорна імовірність для вузлів А та В з визначеними вузлами D та C

A	B	$P(D A, C) \cdot P(C A, B) \cdot P(A) \cdot P(B)$ або $P(D = Y)$	$P(A, B B = N, C = Y)$ $P(D = N)$
Y	Y	$0,4 \times 0,5 \times 0,9 \times 0,6 = 0,110$	0,4
Y	N	$0,4 \times 0,9 \times 0,9 \times 0,4 = 0,130$	0,48
N	Y	$0,8 \times 0,2 \times 0,1 \times 0,6 = 0,010$	0,04
N	N	$0,8 \times 0,7 \times 0,1 \times 0,4 = 0,022$	0,08

Таблиця 8. Апостеріорна імовірність для вузла А з вузлами D и C

$P(A = Y D = N, C = Y)$	$P(A = N D = N, C = Y)$
0,88	0,12

## Висновки

Побудовано алгоритм виникнення ризику при експлуатації будівельної конструкції. Запропоновано процесний підхід з метою аналізу відхилення процесів проектування, виробництва та обслуговування.

Визначено показники граничних станів зварної конструкції від механічних дій та показники якості корозійних впливів. Підібрано розрахункові формули швидкості (імовірності) досягнення граничних станів від механічних дій. Для аналізування комбінації дій рекомендовано застосовувати метод сіток Байєса.

Встановлено, що одним з основних завдань системи менеджменту якості зварювального виробництва згідно ДСТУ ISO 9001:2015 є забезпечення виявлення потенційних невідповідностей в системі зварювального виробництва і попередження їх виявлення за допомогою менеджменту ризику. Відхилення процесів системи менеджменту є причинами утворення браку продукції, що випускається та виникнення ризику аварійної ситуації на виробництві.

Наведено приклад застосування мережі Байєса для розрахунку апостеріорної імовірності переходу конструкції в позаграничний стан на підставі апріорної імовірності протягом встановленого часу експлуатації та умовної імовірності, яка встановлюється на підставі попередніх статистичних оцінок, отриманих в результаті випробувань даного виду конструкції.

Успіх менеджменту ризиків буде залежати від результативності структури менеджменту. Структура допомагає впровадженню результативного менеджменту ризиків через впровадження процесів управління ризиками та НК і ТД на різних рівнях підприємства. Структура гарантує, що інформація про ризик, отримана в процесі менеджменту ризику, відповідним чином надається та використовується як основа для прийняття рішень щодо подальших модифікацій ризиків.

## Список літератури

1. (2015) Закон України від 15.01.2015 № 124-VIII «Про технічні регламенти та оцінку відповідності».
2. (2016) Постанова Кабінету міністрів України № 95 від 13 січня 2016 р. «Про затвердження модулів оцінки відповідності, які використовуються для розроблення процедур оцінки відповідності, та правил використання модулів оцінки відповідності».
3. (2010) Закону України «Про загальну безпечність нехарчової продукції» від 02.12.2010, № 2736-VI.
4. Бондаренко Ю.К. Ковальчук О.В. (2017) Оцінка ризику експлуатації зварних конструкцій на підставі моніторингу процесів управління якістю і проведення випробувань методами НК і ТД. *Неруйнівний контроль та технічна діагностика*, **3**, 56–62.
5. Бондаренко Ю.К. Ковальчук О.В. (2018) Ідентифікація ризиків при виробництві зварних конструкцій для впровадження ризик-менеджменту на підприємстві. *Там само*, **3**, 47–57.

6. Бондаренко Ю.К. Ковальчук О.В. (2018) Анализ и исследование риск-менеджмента, влияющего на технологический процесс сварки на производстве с целью повышения живучести стальных конструкций по признакам опасности. *Сварщик*, **4**, 29–40.
7. ДСТУ ISO Guide 73:2013 (ISO Guide 73:2009) *Керування ризиком*. Словник термінів.
8. ДСТУ ISO 31000:2014 (ISO 31000:2009, IDT) Менеджмент ризиків. Принципи і керівні вказівки.
9. ДСТУ IEC/ISO 31010:2013 (IEC/ISO 31010:2009, IDT) Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику.
10. ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Основні положення та словник.
11. ДСТУ 3974-2000 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення.
12. ДСТУ 8634:2016 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Настанови щодо розроблення та поставлення на виробництво нехарчової продукції
13. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель та споруд. Надано чинності 01.01.2019.
14. Маньковська Е., Скоропад П., Семенистий А. (2010) Корозійна стійкість металевих аморфних стовпів та метрологічна надійність термоперетворювачів на їх основі. *Вимірювальна техніка та метрологія*, **71**, 98–102.
15. Інтернет-ресурс: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/6607/1/19.pdf>
16. Бідюк П.І., Терентьев О.М., Коновалюк М.М. (2010) Байєсівські мережі в технологіях інтелектуального аналізу даних. *Искусственный интеллект*, **2**, 104–113.
17. Тороп В.М. (2005) Імовірносний ризик-аналіз експлуатації трубопровідних систем резервуарів та посудин тиску. Повідомлення 2. Метод оцінки функціональної придатності елементів конструкції за обмеженими статистичними даними. *Проблеми прочності*, **3**, 96–103.

## References

1. (2015) Law of Ukraine of 15.01.2015, No. 124-VIII: On technical regulations and conformity assessment [in Ukrainian].
2. (2016) Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 95 of January 2016: About approval of the modules of conformity assessment used for development of the procedures for conformity assessment and rules for application of conformity assessment modules [in Ukrainian].
3. (2010) Law of Ukraine of 02.12.2010, No. 2736-VI: On general safety of non-food products [in Ukrainian].
4. Bondarenko, Yu.K., Kovalchuk, O.V. (2017) Evaluation of risk of welding structures service using monitoring of processes of the quality control system and testing using NT and TD methods. *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, **3**, 56–62 [in Ukrainian].
5. Bondarenko, Yu.K., Kovalchuk, O.V. (2018) Risk identification in fabrication of welded structures in order to introduce risk-management at the enterprise. *Ibid.*, **3**, 47–57 [in Ukrainian].
6. Bondarenko, Yu.K., Kovalchuk, O.V. (2018) Analysis and study of management of the risk affecting the technological process of welding in production, in order to increase the viability of steel structures by danger indicators. *Svarshchik*, **4**, 29–40 [in Russian].
7. DSTU ISO Guide 73:2013 (ISO Guide 73:2009): Risk management. Vocabulary.
8. DSTU ISO 31000:2014 (ISO 31000:2009, IDT): Risk management. Principles and guidelines.
9. DSTU IEC/ISO 31010:2013 (IEC/ISO 31010:2009, IDT): Risk management. Risk assessment techniques.
10. DSTU ISO 9001:2015: Quality management systems. Guidelines and vocabulary.
11. DSTU 3974-2000: System of product development and launching into manufacture. Procedures of experimental and design works. Basic principles [in Ukrainian].



12. DSTU 8634:2016: System of product development and launching into manufacture. Guidelines of inedible product development and launching into manufacture [in Ukrainian].
13. DBN V 1.2-14:2018: System of ensuring the reliability and safety of building objects. General principles for reliability and constructive safety ensuring of buildings and civil engineering works. Valid from 01.01.2019 [in Ukrainian].
14. Mankovska, E., Skoropad, P., Semenystyi, A. (2010) Corrosion resistance of metal amorphous columns and metrological reliability of temperature transducers on their base. *Vymiryvalna Tekhnika ta Metrologiya*, **71**, 98–102 [in Ukrainian].
15. <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/6607/1/19.pdf>
16. Bidyuk, P.I., Terentiev, O.M., Konovalyuk, M.M. (2010) Bayesian networks in the technologies of intelligent analysis of data. *Iskustvennyi Intellekt*, **2**, 104–113 [in Ukrainian].
17. Torop, V.M. (2005) Probabilistic risk-analysis of operation of pipeline systems of tanks and pressure vessels. Information 2: Method of assessment of serviceability of structural elements by limited statistical data. *Problemy Prochnosti*, **3**, 96–103 [in Ukrainian].

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF RISK SOURCES ON TECHNICAL SAFETY OF WELDED STRUCTURES IN OPERATION WITH APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE TESTING AND TECHNICAL DIAGNOSTICS

Yu.K. Bondarenko, O.V. Kovalchuk

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

In keeping with mandatory requirements of technical procedures to technical documents for critical products of welding fabrication, the technical documentation should allow assessment of product compliance with regulatory requirements and should include a description of performance and results of proper analysis and assessment of risk (risks). At present there is no reliable method for assessing the welded structure risk. The paper identifies the features of risk occurrence during the product life cycle. The algorithm of occurrence of components of risk in welded structure operation, which is the aggregate of both the risks connected with deviations of the processes of design, manufacture, and operation (in other words, those connected with the processes of product life cycle), and the risks associated with dangers, which arise from impacts on the structures and the probability of the structure operation outside its application limits. It is noted that the risk in operation is the probability that the structure will reach the limit state during the specified period of operation. The limit states are divided into two groups. The first group includes limit states, the transition through which leads to complete unsuitability of the object. The second group includes those that complicate the normal operation of the object or shorten its service life, compared to the specified term. During operation, the welded metal building structure is exposed, first of all, to mechanical and corrosion impacts. References to the theory and formulas are given that determine the probabilities of a metal structure failure. It is recommended to use the Bayesian formula to calculate the total value of operational risk. 17 Ref., 8 Tabl., 4 Fig.

*Keywords: risk, operational risk, risk management, probability of danger occurrence, welded structure, technical safety*

Надійшла до редакції 07.10. 2019

Національна академія наук України  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

# XXIII МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

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

Генеральний спонсор  
ПрАТ «УкрНДІНК»



ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150  
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50  
journal@paton.kiev.ua  
posypaiko.yurii@gmail.com  
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2020>

# ГОЛОВНЫЕ ВОЛНЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МЕТАЛЛОВ

**Н.П. Разыграев**

АО «НПО «ЦНИИТМАШ». 109088, РФ, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская 4. E-mail: NPRazygraev@cniitmash.com

Целью данной работы является исследование истории, физики и терминологии ультразвуковой дефектоскопии металлов головными волнами. Библиогр. 23, рис. 9.

*Ключевые слова:* акустическая волна, продольная волна, поперечная волна, головная волна, продольно-поверхностная волна, подповерхностная волна, боковая волна, ползучая волна, *creeping wave*, критический угол, ультразвуковой контроль металлов

В журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» опубликована статья [1], в которой авторы рассматривают имеющееся широкое многообразие терминов при отображении и применении головных волн (ГВ) в УЗ дефектоскопии металлов и в акустике двухслойных и многослойных сред. Эта публикация особенно интересна и важна в связи с тем, что в 2022 г. исполняется 50 лет со времени начала использования в ультразвуковой дефектоскопии металлов головных волн.

В 1972 г. в процессе экспериментальных исследований акустических характеристик сталей для оборудования и трубопроводов АЭС с ВВЭР-1000 впервые в ультразвуковой дефектоскопии металлов были зафиксированы на экране ультразвукового дефектоскопа USIP-10 фирмы «Крауткремер», имеющего динамический диапазон экрана 36 дБ, неизвестные ранее сигналы очень быстрой волны – они раньше всех других импульсов приходили на приёмник и были примерно на два порядка слабее объёмных продольной и поперечной волн [2]. Научные исследования головных (и боковых) волн, разработки новых способов и технологий УЗК были представлены в [3]. Для того, чтобы предметно обсуждать терминологию, используемую при УЗК металлов ГВ, ниже представлены результаты исследований АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и предложенные первичные термины.

Выполненные в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» в 1973–1975 гг. [4] оригинальные исследования возбуждения, распространения и приема ГВ показали возможность использования их для обнаружения дефектов в при- и подповерхностном слое глубиной 1...15 мм. На основе использования ГВ были разработаны новые способы ультразвукового контроля качества материалов, защищенные авторскими свидетельствами [5–7].

В процессе экспериментально-теоретических исследований 1972–1979 гг. акустических волн головного типа было установлено, что:

– оптимальным углом возбуждения и приема ГВ является первый критический угол  $\alpha_1$  (для границы оргстекло-сталь  $\alpha_1 \approx 27^\circ 30'$ ) [8];

– при использовании излучателей и приемников ГВ с пьезоэлементами диаметром 12 и 18 мм и частотой 1...5 МГц и промышленных дефектоскопов ГВ можно зарегистрировать на расстоянии 200...300 мм; ослабление амплитуды ГВ с расстоянием пропорционально квадрату расстояния при контроле в иммерсионном режиме ( $A \sim r^2$ ) и при контроле контактными искателями ( $A \sim r^{-1,75}$ ) [9];

– акустическое поле ГВ в контролируемой среде характеризуется наличием минимума (нуля) напряжений на контактной поверхности. Максимум амплитуды поля находится на определенном луче. При использовании излучателей и приемников головных волн с пьезоэлементами диаметром 12 и 18 мм и частотой 1...5 МГц этот луч образует с контактной поверхностью угол, примерно равный  $12^\circ$  [10];

– установлено, что для возбуждения и регистрации ГВ наиболее удобны призматические искатели с обязательным разделением функций излучателя и приемника [11]. Разработаны конструкции двух типов искателей ИЦ-61 и ИЦ-70 для контроля приповерхностного слоя. Искатели типа ИЦ-61 осуществляют схему «тандем» (излучатель и приемник расположены один за другим по отношению к отражателю), позволяют проводить ультразвуковой контроль на расстоянии 5...70 мм от искателя и обеспечивают обнаружение дефектов с отношением сигнал–шум не менее 10 дБ. Искатели типа ИЦ-70 работают по схеме «дуэт» (излучатель и приемник расположены рядом на одном расстоянии от отражателя), обеспечивают обнаружение дефектов на расстоянии 5...20 мм с соотношением сигнал–шум не менее 14 дБ;

– исследование выявляемости подповерхностных дефектов головными волнами показало, что амплитуда эхо-сигнала от дефекта пропорциональна площади отражающей поверхности; зави-

симость амплитуды эхо-сигнала от расстояния изменяется по сложному закону [12].

На основании проведенных исследований возбуждения, распространения и приема ГВ в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» было разработано следующее физическое представление о них.

При падении продольной волны на границу раздела сред под первым критическим углом  $\alpha_1$  в нижней среде образуется неоднородная продольная волна (продольно-поверхностная), которая скользит вдоль поверхности (рис. 1). При распространении этой волны вдоль границы обеспечивается выполнение граничных условий. При контроле иммерсионным способом эти условия – равенство нулю касательных напряжений и равенство нормальных напряжений. При контроле контактным способом граничные условия более сложны и различны для участка, где расположена призма преобразователя, и для свободной поверхности, где нормальные и касательные напряжения равны нулю.

Это однако не означает отсутствия волны, поскольку деформации на поверхности существуют. Выполнение граничных условий при распространении неоднородной продольной (продольно-поверхностной) волны обеспечивается за счет боковых волн (продольных и поперечных), образующихся как в нижней, так и в верхней средах.

Для сравнения можно вспомнить, что при распространении поверхностной волны вдоль свободной границы условие равенства нулю нормальных и касательных напряжений выполняется благодаря одновременному присутствию неоднородных продольных и поперечных волн. В случае с неоднородной продольной (продольно-поверхностной) волной распространение волны вдоль границы, как в верхней, так и в нижней средах, происходит со скоростью продольной волны в нижней среде. Это означает, что в верхней среде фронты боковой продольной волны в случае с жидкостью, или боковых продольной и поперечной волн в случае с оргстеклом, и боковой поперечной волны в нижней среде (в стали), также распространяются со скоростью продольной волны в нижней среде.

Наличие продольной боковой волны в верхней среде позволяет фиксировать неоднородную

продольно-поверхностную волну с помощью наклонного преобразователя – контактного или иммерсионного. В случае иммерсионного режима контроля боковая волна в жидкости возбуждается в каждой точке границы. При контроле контактным способом напряжения на границы воздух-сталь практически равны нулю. Когда же с этой границей соприкасается наклонный преобразователь через слой контактной жидкости, нормальные напряжения на границе уже не равны нулю, что приводит к образованию продольной боковой волны в призме приемника.

Оптимальным углом возбуждения и приема продольно-поверхностной волны является первый критический угол (рис. 2). Его значение определяется из закона Снеллиуса:

$$\sin \alpha_1 = C_{\text{лорэ}} / C_{\text{лсм}}$$

где  $C_{\text{лорэ}}$  – скорость продольной волны в оргстекле;  $C_{\text{лсм}}$  – скорость продольной волны в стали.

Для границы оргстекло-сталь первый критический угол примерно равен  $27^\circ 30'$ . Такой угол падения имеют призмы излучателя и приемника ГВ.

Кроме боковой продольной волны в верхней среде (если она твердая) образуется боковая поперечная волна. Угол между направлением боковой поперечной волны и нормалью к границе раздела определяется также законом Снеллиуса:

$$\sin \alpha_1 = C_{\text{торэ}} / C_{\text{лсм}}$$

где  $C_{\text{торэ}}$  – скорость поперечной волны в оргстекле.

В нижней среде (в стали) в каждой точке на границе раздела сред генерируется боковая поперечная волна. Фронт этой волны распространяется также со скоростью продольной волны в нижней среде. Угол между направлением фронта волны и нормалью к границе раздела также определяется законом Снеллиуса и называется третьим критическим углом:

$$\sin \alpha_3 = C_{\text{лсм}} / C_{\text{лсм}}$$

где  $C_{\text{лсм}}$  – скорость поперечной волны в стали.

При падении поперечной волны на границу сталь-воздух под третьим критическим углом ( $\alpha_3 \approx 33^\circ$ ) (на противоположную (донную) поверхность) на ней в строгом соответствии с законом Снеллиуса образуется неоднородная продольно-поверхностная волна (рис. 3) и сопутствующие

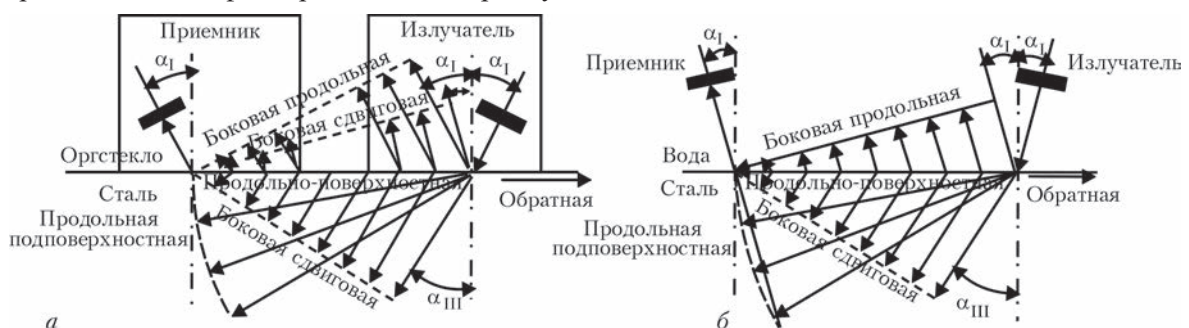


Рис. 1. Распространение головной волны вдоль границы раздела: а – оргстекло-сталь; б – вода-сталь

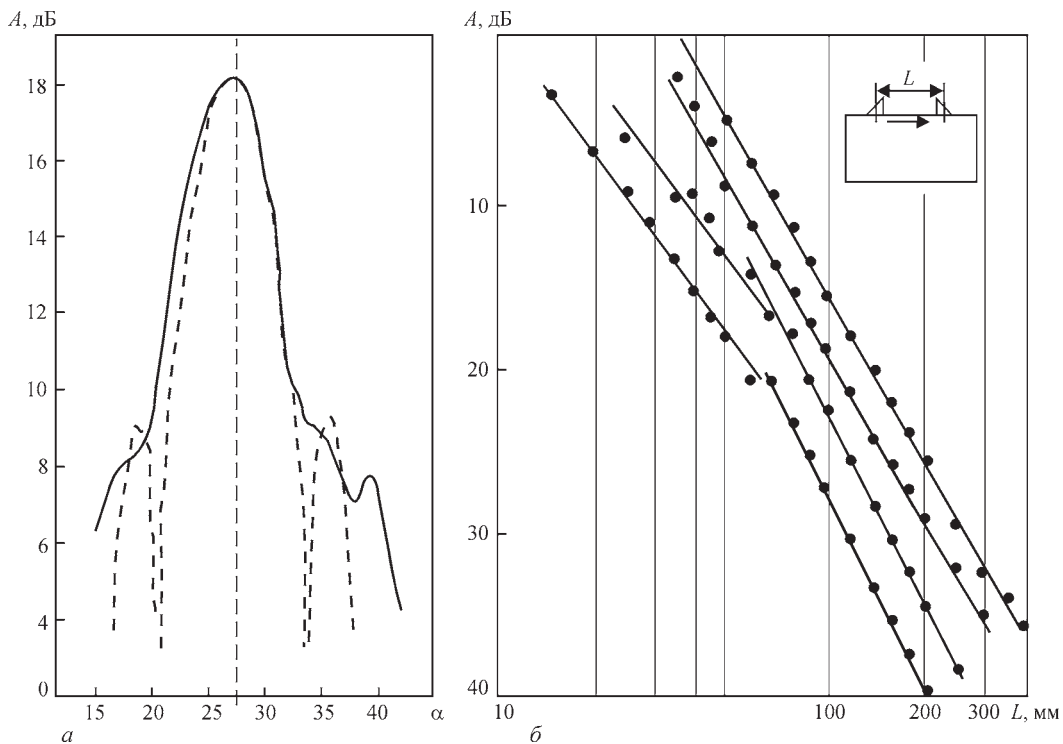


Рис. 2. Возбуждение (а) и распространение и ослабление (б) головной волны при различных углах падения  $A$ , дБ – амплитуда волны;  $\alpha$  – угол падения волны

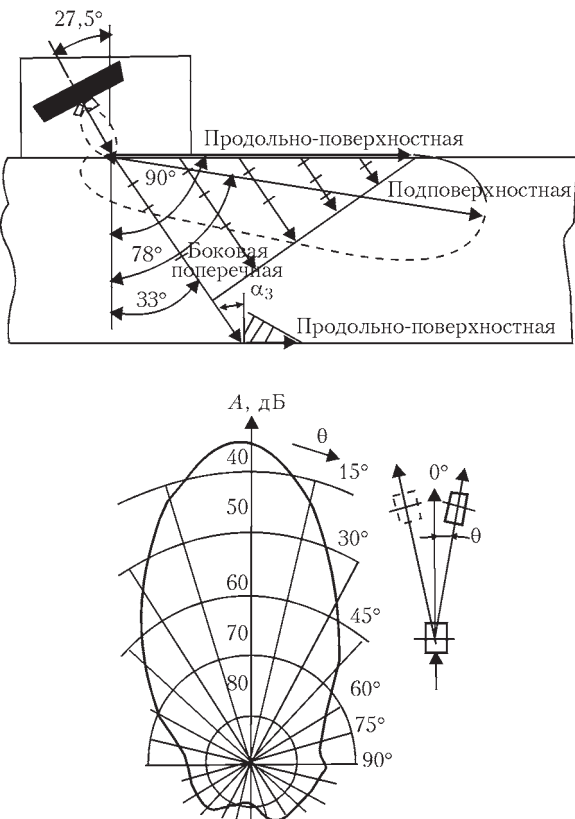


Рис. 3. Падение боковой поперечной волны на донную поверхность и образование волн на ней  $\theta$  – угол расхождения ей боковые (продольные и поперечные) волны по обеим сторонам от границы раздела сред.

Если контролю подвергается изделие с плоскопараллельными поверхностями, то на донную поверхность, благодаря образованию боковой по-

перечной волны в каждой точке контактной поверхности, начиная от точки выхода излучателя, под третьим критическим углом и ее распространению, падают поперечные волны (рис. 3). Т. е. на донную поверхность падает фронт боковых поперечных волн. В каждой из точек фронта на границе сталь-воздух возбуждается продольно-поверхностная волна и сопровождающая ее боковая волна. Этот процесс происходит как на нижней донной поверхности, так и на верхней контактной поверхности, но с запаздыванием во времени и с ослаблением волны. В сейсмоакустике каждому из импульсов, пришедших на приемник в результате образования этих или аналогичных вторичных продольно-поверхностных и боковых волн, присваивают наименование головной волны с очередным номером: головная волна 1, головная волна 2 и т. д. [13]. Параметры импульсов ГВ в сейсмоакустике используются для оценки состояния сред.

Одновременно с возбуждением продольно-поверхностной волны образуется и обратная продольно-поверхностная волна – распространение упругого возмущения в сторону, противоположную основному излучению. Оказалось, что обратную волну можно использовать в практике УЗК [3].

Образование боковых волн является причиной быстрого ослабления продольно-поверхностной волны. При распространении волны вдоль границы вода-сталь боковые волны образуются в обеих средах и ослабление амплитуды, как показали результаты исследований, пропорционально  $r^{-2}$ . В случае контактного способа контроля на свобод-

ной поверхности образуется лишь боковая поперечная волна в стали (боковая продольная волна в воздухе ничтожно мала), поэтому ослабление продольно-поверхностной волны пропорционально  $r^{-1,75}$ , то есть происходит медленнее, чем в иммерсионном режиме (рис. 2).

Рассмотренная на рис. 1 картина распространения ГВ дает лучевое представление обо всех видах волн, образующихся в этом процессе. Необходимо особо отметить, что фронты боковых волн являются плоскими, а данный способ возбуждения волн является единственным способом получения плоских волн.

В реальных условиях ультразвукового контроля наклонным преобразователем акустическое поле излучающего пьезоэлемента имеет не плоскую форму, а представляется в виде определенной диаграммы направленности. Это означает, что от излучателя, акустическая ось которого ориентирована под первым критическим углом к контактной поверхности, на границу также падают продольные волны с углами падения меньше и больше первого критического. Продольные волны с углами падения большими первого критического образуют в нижней среде неоднородные продольно-поверхностные волны. Энергия этих волн уменьшается с увеличением отклонения угла падения от первого критического угла.

Продольные волны, падающие под углами меньшими первого критического, преломляются на границе раздела и образуют в нижней среде

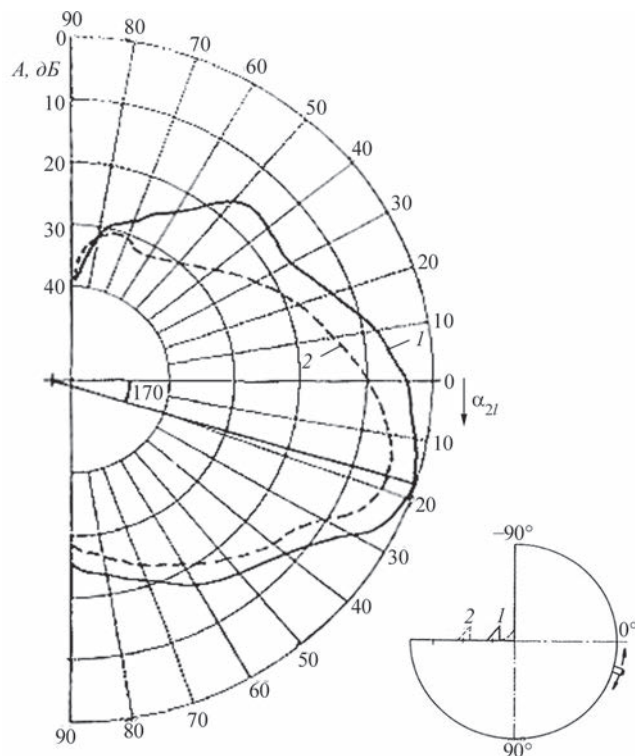


Рис. 4. Акустическое поле головной волны после прохождения зоны сопряжения R – радиус сопряжения; 1 – R = 7,5 мм; 2 – R = 0,02 мм; частота 1,8 МГц

поле продольной волны со сферическим фронтом, начало которого совпадает с фронтом продольно-поверхностной волны (рис. 3). Значения амплитуд по сферическому фронту продольной волны связаны с амплитудой волны в направлении преломленного луча, которая определяется произведением соответствующего значения из диаграммы направленности на коэффициент прохождения по амплитуде.

Исследования подтвердили, что нулевое значение напряжений продольной волны достигается на свободной поверхности, а максимальное значение находится под поверхностью и достигается вдоль луча, образующего с поверхностью угол примерно равный 12° (угол ввода 78°) (рис. 3). Эта волна не чувствительна к неровностям поверхности и реагирует лишь на дефекты, отходящие от поверхности внутрь изделия и подповерхностные дефекты. По этой причине эту волну называют подповерхностной волной.

Ослабление амплитуды продольной подповерхностной волны вдоль луча любого направления происходит как в обычной продольной волне, т.е. пропорционально  $r^{-1}$ .

При контроле изделий с сопряжениями (рис. 4) условия распространения ГВ несколько изменяются. Когда фронт продольно-поверхностной и продольной подповерхностной волн достигает сопряжения детали, продольно-поверхностная волна частично перерождается в объемную продольную волну. Продольная подповерхностная волна огибает сопряжение и распространяется вдоль воображаемой линии контактной поверхности.

Акустическое поле, образуемое за началом сопряжения, представляет собой объемную продольную волну, с помощью которой можно обнаруживать дефекты за сопряжением и под ним (рис. 4). Важно, что ослабление продольной волны за сопряжением в связи с отсутствием боковых волн происходит по закону  $r^{-1}$ . Это позволяет обнаруживать с помощью ГВ дефекты на больших расстояниях, чем при расположении их под гладкой поверхностью. В данном случае можно говорить об эффекте усиления ГВ.

Такой же эффект усиления ГВ имеет место при распространении продольной подповерхностной

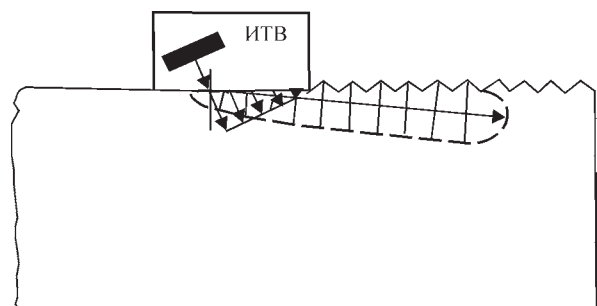


Рис. 5. Распространение головной волны под резьбой

волны под резьбой и или под поверхностью типа резьбы (рис. 5). Здесь на участке расположения периодических выступов и впадин (резьбы) нет продольно-поверхностной волны, не образуются боковые волны и не затрачивается энергия на их образование. В результате амплитуда эхо-сигналов от дефектов одних и тех же размеров, расположенных под резьбой, больше, чем от аналогичных отражателей (дефектов) под гладкой поверхностью.

Учитывая следующие особенности акустического поля излучателя с углом падения равным первому критическому углу:

- наличие неоднородной продольно-поверхностной и подповерхностной волн;
- образование боковых волн в контролируемой и прилегающей средах;
- быстрое ослабление неоднородной продольно-поверхностной волны с расстоянием;
- распространение продольных волн с максимальной скоростью звука и то, что они первыми приходят на приемник, всей совокупности этих волн присвоили специфический для ультразвуковой дефектоскопии материалов термин – головные волны, по аналогии с головными волнами в сейсмоакустике. Этот термин подчеркивает, что импульсы рассматриваемой ГВ распространяются с максимальной скоростью и первыми достигают приемника, что во многих случаях весьма благоприятно для интерпретации сигналов и расшифровки результатов контроля.

Применение физического представления о ГВ позволило найти объяснение, а затем и решение двум необъяснимым на начало 1970-х годов задачам акустического тракта.

Первая задача состояла в неоднозначной зависимости амплитуд эхо-сигналов от размеров (высоты и ширины) зарубок, сегментов и двугранных углов при контроле преобразователями с углом падения (призмы)  $28...30^\circ$  или углом ввода  $\alpha \approx 57^\circ$  ( $90...33^\circ$ ) (как правило, например, при угле падения  $45^\circ$ , амплитуда эхо-сигнала от углового отражателя увеличивается строго пропорционально размеру отражателя). Эту задачу мы называем задачей Райхмана А.З., который первым обнаружил и описал ее (рис. 6, а). Объяснение было найдено и предложено нами, когда во внимание было принято то, что амплитуда эхо-сигнала от зарубки складывается в результате интерференции (сложения в соответствующих фазах) импульсов от:

- лучей объемной поперечной волны с углами ввода от  $33^\circ$  и более;
- неоднородной продольно-поверхностной волны, образующейся при падении на донную поверхность части ультразвукового пучка под третьим критическим углом, равным  $33^\circ$ ;

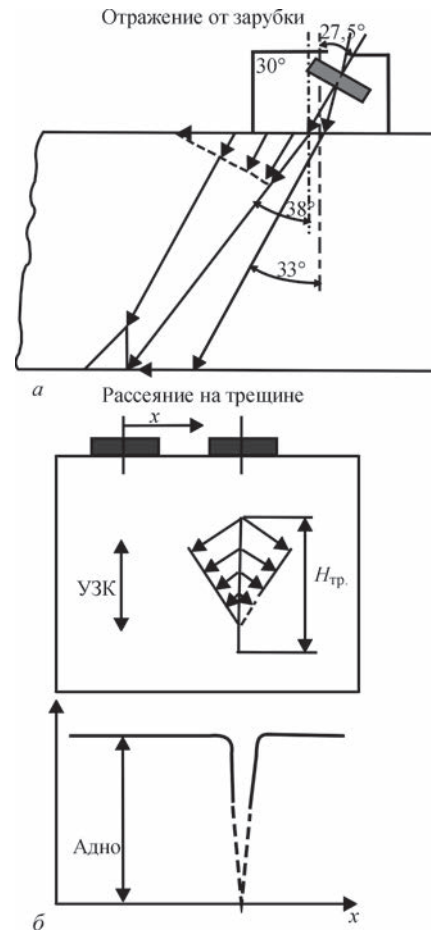


Рис. 6. Рассмотрение задач Райхмана и Гурвича с учетом физики головной волны: а – задача Райхмана; б – задача Гурвича;  $H_{тр}$  – высота трещины;  $A_{дно}$  – амплитуда донного сигнала

- боковой поперечной волны на донной поверхности и ее отражения от зарубки.

Математическое решение задачи выполнено Райхманом А.З. и его учеником Переваловым С.П.

Вторая задача акустического тракта, требовавшая решения, заключалась в уменьшении донного эхо-сигнала продольной волны при наличии на пути распространения ультразвука плоского, ориентированного вдоль направления распространения ультразвука, разрыва, несплавления, пропила, трещины (рис. 6, б). Эту задачу я назвал задачей Гурвича, так как впервые услышал ее от А.К. Гурвича в 1973 г. Объяснение и решение этой задачи было найдено, когда мы поняли, что при распространении продольной волны вдоль плоского разрыва сплошности на его берегах (двух плоских поверхностях) образуются неоднородные продольно-поверхностные волны и сопровождающие их боковые поперечные волны для одной поверхности, а здесь в зеркально-теневом способе сразу две поверхности-берега трещины), которые отводят в стороны значительное количество энергии волны и резко уменьшают амплитуду донного эхо-сигнала.

До наших исследований 1972-1976 гг. в ультразвуковой дефектоскопии металлов считалось, что при падении продольной волны под первым критическим углом волна полностью отражается от границы раздела. В нижней среде не образуется ни продольной, ни поперечной волн. Это называлось эффектом полного внутреннего отражения. Этот эффект четко просматривается на расчетной зависимости коэффициентов прохождения и отражения от угла падения на рис. 7 для границы оргстекло-сталь [14]. В точках первого критического угла коэффициенты отражения и прохождения продольной и поперечной волн равны нулю. Наши экспериментальные исследования показали, что при первом критическом угле в нижней среде образуются продольно-поверхностные волны и подповерхностные продольные волны, которые можно использовать в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Наши исследования в УЗД позволили понять процессы распространения продольных и поперечных волн вблизи первого и третьего критических углов. В связи с обнаружением новых закономерностей в образовании волн пришлось найти приемлемые для УЗД металлов названия и термины. В ультразвуковой дефектоскопии появились новые термины: головные, боковые, неоднородные продольно-поверхностные волны, подповерхностные волны. Все эти названия хорошо и в полной мере интерпретируют специфическую физическую картину возбуждения, распространения и приема ультразвуковых продольных, поперечных и неоднородных волн, имеющих место при падении продольной волны под первым критическим углом (и близких нему углах) и при третьем критическом угле падения. В этом на наш взгляд заключается «смысловое содержание терминов», о котором авторы анализируемой статьи высказываются в [1]. Именно такое изображение и представление о ГВ, как комплексе волн, и составля-

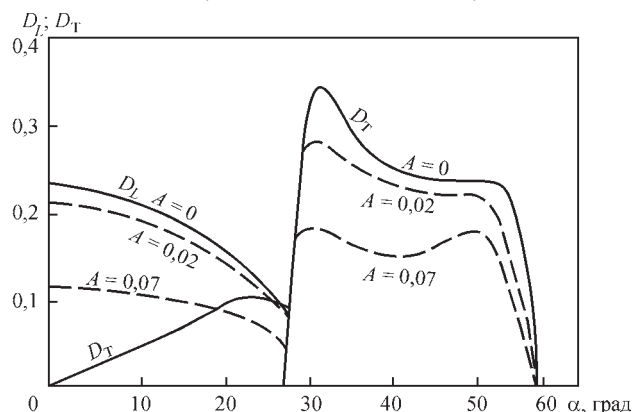


Рис. 7. Зависимость коэффициентов прохождения при падении продольной волны под углом на границу оргстекло-сталь  $\alpha$ -угол падения;  $D_L$  – коэффициент прохождения продольной волны;  $D_T$  – коэффициент прохождения поперечной волны;  $A$  – толщина контактного слоя, отнесенного к длине волны

ющих её волнах, позволило четко и однозначно рассмотреть и решить задачи Райхмана и Гурвича, объяснить численную и качественную разницу в ослаблении ГВ с расстоянием при распространении волны вдоль свободной границы (с воздухом) и в иммерсионном режиме, а также понять и уяснить усиление ГВ при распространении под поверхностью типа резьбы, на которой в УЗД не может распространяться продольно-поверхностная волна и не возбуждаются боковые (продольные и поперечные) волны.

Не все коллеги поддержали нашу терминологию, при этом и мы, авторы предложенных терминов, и наши оппоненты из прикладной и теоретической акустики ссылались на книгу академика Бреховских Л.М. [13]. В ней он описывает распространение упругих (акустических) волн в слоистых средах в горных породах и воде. Как правило, это звуковые волны с частотой 20...20000 Гц, которые слышит человеческое ухо, и гиперзвуковые волны с частотой менее 20 Гц, которые человек уже ощущает всем телом.

В нормативной и технологической документации на УЗК основного и наплавленного металла сварных соединений в энергетическом и тяжелом машиностроении, в которой, как правило, выступал АО «НПО «ЦНИИТМАШ», а также в трудах и документах по УЗД в других областях промышленности использовались термины, предложенные нами. Предложенная терминология не вполне удовлетворила специалистов в области акустических исследований и сейсмоакустики. Так, для обозначения предложенной нами одной из составляющих ГВ – продольно-поверхностной волны в [15] используется термин «поверхностно-продольная волна». Специалисты, пришедшие в УЗД из технической акустики, участвовавшие в обсуждении новых терминов, в целом приняли нашу терминологию, тем более, что она в основном касалась и использовалась в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Вместе с тем, авторы новых книг, учебников, справочников, статей и стандартов по УЗД, как правило, в полной мере не владели описываемыми явлениями, закономерностями и терминами, иногда были не согласны с нашими терминами, но обойтись без описания способов и технологии УЗК ГВ уже не могли. Отсюда появились, в частности, в 2003 г. собственные описания физики и технологии УЗК ГВ у Ланге и Воронкова [16] и собственные термины, например, «скользящая волна» в 1991 г., взятая из «сейсмоакустики» [17].

Иностранные ученые и специалисты (немецкие, сотрудничающие с фирмой «Крауткремер») по следам наших работ опубликовали свои статьи и патенты [18, 19], в которых для обозначения

ния продольно-поверхностной волны использовали термин «ползучая волна», который в данном случае исходит от эффекта ползучести металла: «kriechwellen» (немец.) и «creeping wave» (англ.). Головной же волной они называют боковую поперечную волну в металле. При этом они не ссылаются на наши исследования головных волн и на наши научные труды и технологии.

Но уже в 1986 г. в книге [20] авторы (в их числе соавторы указанного выше немецкого патента) приводят многочисленные ссылки на наши исследования и разработки в области УЗК металлов ГВ. На русском языке книга была издана под редакцией Волченко В.Н., «Металлургия», Москва, 1991 г. В этой книге наряду с термином «головная волна» в нашем понимании, как комплекса волн, используется термин «ползучая волна» для обозначения продольно-поверхностной волны. Дополнительно отметим, что термин «ползущая волна», на наш взгляд, неверно переведен и неправомерно используется во многих документах и трудах на русском языке, т. к. в данном случае волна не скользит (не ползет по поверхности) снаружи, а распространяется в нижней среде по поверхности контролируемого металла.

Некоторые соображения по «конкретным материалам из нормативно-технической и специальной литературы» из статьи по п. 1-11 (№ пунктов и литературные ссылки в статье [1]).

П.1. Я бы предложил разделить сейсмоакустику и ультразвуковую дефектоскопию металлов. Необходимо напомнить, что в УЗД применяются активные способы возбуждения и приема ультразвуковых волн с помощью направленных ультразвуковых пучков, а также то, что ультразвуковые волны с частотами 1...10 МГц не распространяются в воздухе. В сейсмоакустике, как правило, используются ненаправленные излучатели и приемники звуковых волн, которые превращаются в различные типы и виды волн при распространении в слоистых средах, и множество принятых сигналов идентифицируют и интерпретируют специальными сейсмоакустическими приборами, методами и приемниками. Также применительно к УЗД отметим, что в дифракционно-временном методе ультразвуковой дефектоскопии металлов (ТОFD), который украинские авторы широко используют для отображения и интерпретации своих терминологических предложений, на рисунке из [1] на участке между излучающим и приемным излучателями в воздушном пространстве не существует никакой боковой волны (Lateral wave). Боковая волна появляется только в призме приемного излучателя на участке его соприкосновения с границей контролируемого объекта вследствие распространения продольно-поверхностной волны (creeping wave – ползучая волна).

П.2. Авторы статьи [16] не смогли правильно описать рассматриваемый процесс и волны. В п.1 они приравнивали головную и ползучую волны. Указанные волны распространяются не только «вдоль свободной поверхности», но также вдоль границы с водой. В п. 2 они пишут, что «распространение ГВ не зависит от состояния поверхности», а в действительности зависят. В п. 3 у них «боковая волна» – это только поперечная волна в контролируемой среде, но это еще и боковая продольная волна в сопредельной среде (призма искателя, или жидкость (вода)). Она позволяет принять ГВ в УЗД и используется в дифракционно-временном методе УЗД (ТОFD), как часть ГВ.

П.3. ГОСТ Р ИСО 5577-2009. Термин (название) правильный, но не верно прописан. В настоящее время документ перерабатывается. Принимается новая редакция термина головная волна – комплекс волн.

П.4. Я не согласен с описанием ГВ в книге.

П.6. ГОСТ Р ИСО 5577-2017 (проект). Используется не правильный термин, не верно переведен и не верно прописан. В настоящее время проект документа перерабатывается.

П.7. ISO 22825:2012. В 2012 г. прошло сорок лет со времени обнаружения ГВ. У них в стандарте все по-своему и в данном случае с большими фактическими физическими и терминологическими ошибками. Авторы не учитывают следующих результатов исследований:

– представленное описание не соответствует полученным нами закономерностям. Термин «ползущие» неверен; волны «распространяются на глубину, равную приблизительно одной длине волны от поверхности» – источники вывода не известны и голословны, противоречат нашим исследованиям ГВ – до 15 мм. Как известно, на глубину равную одной длине волны, распространяются поверхностные волны (волны Рэлея);

– у них в описании и «головная волна», и боковая сдвиговая (поперечная) волна – одно и то же. В нашей терминологии термин «боковая сдвиговая волна» и волны характеризует одну из составляющих ГВ. Отметим, что использование авторами собственной терминологии создает большие несоответствия в стандарте и тем более в описании свойств ГВ;

– наши исследования показали, что некоторая часть энергии ГВ распространяется по и за криволинейной поверхностью, в виде продольно-поверхностной волны, а за галтелью основной поток энергии волны превращается в объемные продольные волны;

– «ползущие волны непрерывно генерируют сдвиговые волны (также называемые ГВ), что является следствием взаимодействия с поверхно-



стью». Это высказывание не корректно, т. к. образование продольно-поверхностной (ползучей) волны и генерация боковых волн в нижней и верхней средах тесно связано с условиями существования неоднородной продольно-поверхностной волны, которая в зависимости от наличия или отсутствия звукопроводящей верхней среды по-разному ослабляется с расстоянием. Боковая волна в верхней среде позволяет в условиях одностороннего доступа к контролируемому объекту зафиксировать продольно-поверхностную волну.

Авторы в [1] попытались систематизировать термины в УЗД головными волнами в РФ, Украине, в западных и международных документах и книгах. При этом они взяли за «основу определения волн» из стандарта ISO 22825:2012. Существует документ 2012 г. О его научном и техническом качестве я написал выше в «Некоторых соображениях по «конкретным материалам из нормативно-технической и специальной литературы» из статьи по п.1–11 [1], где были даны пояснения и замечания по рассмотренным источникам. Слабые призваны источники для предполагаемой революции в терминологии по УЗД головными волнами. Но других авторы не нашли и поэтому в меру сил будем работать и анализировать их.

Рассмотрим предложенную таблицу 1 [1]. Здесь впервые для себя я обнаружил, что классические продольные волны могут быть двух типов – названия расположены в двух крайних разных столбцах. Поперечные волны – тоже самое, но в среднем столбце. Не понятно, как может продольная или поперечная волны физически характеризоваться в зависимости от угла падения (пятый раздел).

Известные мне зарубежные коллеги и специалисты понимают под термином «ползучая волна» (creeping wave) неоднородную продольно-поверхностную волну, распространяющуюся (скользящую) по границе раздела в нижней среде – они так ее и рисуют на границе раздела сред. А падающая продольная волна под критическим углом – это классическая однородная продольная волна. По предложениям украинских авторов мы обсуждаем терминологию с упором на физическое соответствие, а в то же время используем термины «скользящая волна», «ползущая волна», «боковая волна», которые трудно притянуть к физике (акустике) упругих волн.

ГВ по п.8 оказались задвинуты в неопознанное пространство. Они, рожденные в УЗД в 1972 г., оказались «синонимами ползущих иностранных волн», а из других источников, которые проанализированы выше, следует, что это не ползущие волны [1]. Конечно описание этой чехарды в терминах можно, но трудно назвать анализом терминологии.

Авторы отмечают, что «нестыковки не носят принципиального характера. Физические свойства акустических волн хорошо изучены и рассматриваются в учебниках по акустике». Может быть, авторам и стоило опираться на эти учебники. Но в каком учебнике описаны в полной мере исследования акустических характеристик металлов при падении продольных (в лучевом приближении и объемном) волн под и вблизи первого и третьего критического углов? Таких авторы не нашли и решили создать и представить свою новую теорию и терминологию по УЗК металлов ГВ, ограничившись и заменив их на одну-две боковые волны, входящих в комплекс «головная волна».

Относительно п.8 [1], чтобы исключить «смысловую путаницу» и «недостаточное понимание различий в природе волн», позволю коллегам напомнить, что термин «головная волна» в УЗД – это комплекс волн, распространяющихся от излучателя через контролируемый металл до приемника. В этот комплекс последовательно входят этапы излучения и возбуждения волн от падающей волны (рис. 8):

Этап излучения:

1. падающая классическая продольная (растяжения-сжатия) волна, исходящая от направленного под первым критическим углом к границе сред излучателя.

Этап возбуждения волн от падающей волны:

2. отраженная классическая продольная (растяжения-сжатия) волна, исходящая от границы раздела под первым критическим углом (в верхней среде);

3. отраженная трансформированная под четвертым критическим углом (новый термин) классическая поперечная волна (в верхней среде);

4. неоднородная продольно-поверхностная волна с углом ввода  $90^\circ$ , распространяющаяся в нижней среде по границе раздела со скоростью продольной волны;

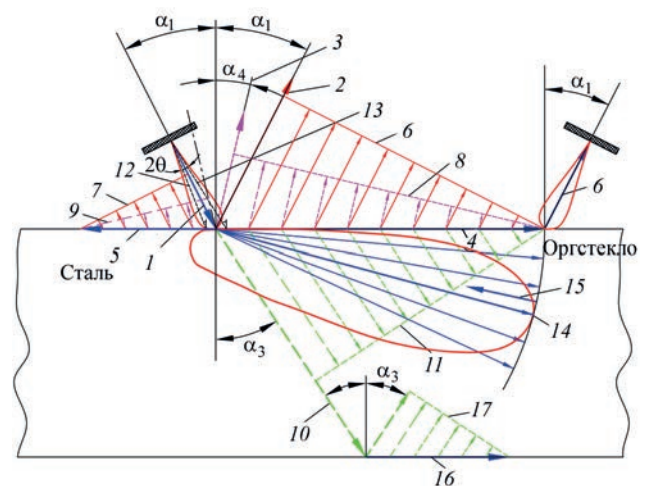


Рис. 8. Образование волн на границах раздела и вблизи них при критических и околоскритических углах

5. обратная неоднородная продольно-поверхностная волна с углом ввода  $-90^\circ$ , распространяющаяся в нижней среде по границе раздела со скоростью продольной волны;

6. боковая продольная волна, отходящая в верхней среде от границы под первым критическим углом, связанная с распространением волны 4 (фронт волны связан с фронтом волн 2 и 4);

7. обратная боковая продольная волна, отходящая в верхней среде от точки падения на границе под первым критическим углом, связанная с распространением волны 5;

8. боковая поперечная волна, отходящая в верхней среде от границы под четвертым критическим углом, связанная с распространением волны 4 (фронт волны связан с фронтом волн 3 и 4);

9. обратная трансформированная боковая поперечная волна, отходящая в верхней среде от точки падения на границе под четвертым критическим углом, связанная с распространением волны 5;

10. трансформированная поперечная волна в нижней среде с углом ввода, равным третьему критическому углу;

11. боковая поперечная волна, отходящая в нижней среде от границы под третьим критическим углом, связанная с распространением волны 4.

Выше описаны волны, изучаемые и возбуждаемые в лучевом приближении. В реальной УЗД используются искатели с пьезоэлементами, излучающими пучок продольных волн, акустическая ось которого ориентирована под первым критическим углом к границе раздела сред и имеет диаграмму направленности с углом раскрытия  $2\theta$ .

В связи с этим на этапе излучения на границу также падают:

12. продольные волны с углами падения меньше первого критического угла;

13. продольные волны с углами падения больше первого критического угла.

На этапе возбуждения:

– продольные волны 12 с углами падения меньше первого критического угла ( $\alpha_1 - \theta$ ) образуют в нижней среде поле продольной подповерхностной волны 14 (в обратном направлении при эхо-методе волна 15);

– продольные волны 13 с углами падения больше первого критического угла до  $(\alpha_1 + \theta)$  образуют неоднородные продольно-поверхностные волны, с которыми связан эффект незеркального отражения.

Этап приема.

Изученный и прошедший через контролируемую зону импульс продольной волны 1, неоднородной продольно-поверхностной волны 4, приходит в виде боковой продольной волны 6 на пьезоэлемент приемника (в призме, в воде), рас-

положенный под первым критическим углом к границе раздела (рис. 8), и фиксируется. Этот комплекс волн в лучевом приближении было предложено называть «головной волной». Если мы используем пучок ультразвуковых волн реального искателя, то головная волна складывается из волн  $(1+12) + (4+14) + (6+15)$  (рис. 8) соответственно на этапах излучения, возбуждения, прохождения и приема импульсов.

Эти ГВ используются в УЗД металлов эхо-, теневым, зеркально-теневым и дифракционно-временным (ДВМ) методами. Из [13] известно множество головных волн. Большинство их них на конечном этапе принимаются и фиксируются по боковой волне. Для УЗД металлов мы в 1970-е годы предложили использовать только ГВ, фиксируемые по боковой продольной волне в верхней среде. Понятно, что и в дефектоскопии возможна фиксация множества других ГВ, связанных с распространением других сопутствующих и распространяющихся в верхней и нижней среде волн. Методы их распознавания и идентификации разработаны в сейсмоакустике и используются в сейсморазведке. Описание некоторых из этих ГВ представлено в [13] и [3].

В УЗД металлов мы предложили и исследовали применение ГВ именно того типа, что описан выше. В том числе, он реализуется в ДВМ (TOFD). Его важнейшим физическим и технологическим фактором является минимальное время, затрачиваемое волной на прохождение от излучателя до приемника. Импульс приходит и фиксируется первым, является главным в технологии УЗД и его предложено, как и в другой близкой к нам науке – сейсмоакустике, называть головным, а волны – головными волнами.

В связи с изложенным, будет полезно рассмотреть несколько существенных физических моментов.

Выше показана исходящая от границы раздела боковая поперечная волна в верхней среде, также связанная с условием существования неоднородной продольно-поверхностной волны на границе раздела и распространяющаяся (и несущая упругое сдвиговое возмущение в верхней среде) под соответствующим (определяемым по уравнению Снеллиуса) углом. В связи с нашими нынешними научными изысканиями этот угол, по-видимому, следует назвать четвертым критическим углом. Все критические углы связаны с возбуждением и распространением неоднородных волн: 1-й, 3-й и 4-й – с продольно-поверхностной волной, 2-й – с неоднородной поперечной волной – поверхностной волной (волной Рэлея.)

Ещё раз обратим особое внимание на процессы возбуждения и распространения волн при кри-

тических углах (рис. 7). На графиках в первом критическом угле мы имели «полное внутренне отражение» и нулевой коэффициенты прохождения и отражения. Но падающая энергия не может исчезнуть. Эта энергия идет на образование продольно-поверхностной волны и боковых волн, которые излучаются в приграничные среды. Эксперименты показали малую интенсивность этих волн. Они распространяются вдоль границы двух сред на незначительные расстояния, но они существуют.

Через несколько углов имеет место мощнейший скачок в коэффициенте прохождения трансформированной поперечной волны на углах падения  $29...30^\circ$ . Особенно интересен этот феномен при ультразвуковом контроле пучком волн с диаграммой направленности, включающий эти углы и первый критический.

Несомненно, значения этих коэффициентов связаны с условиями трансформации продольных волн в поперечные. Решения и результаты на первом и втором критических углах качественно существенно разные. При первом критическом угле падения продольной волны (в лучевом приближении) в нижней среде исчезает продольная волна, но существует неоднородная продольно-поверхностная и подповерхностная волны. При этом вторая как бы подпитывает первую, которая быстрее ослабляется, вследствие возбуждения боковых волн в верхней и нижней средах. Продольно-поверхностная волна не демпфируется (не прощупываются пальцем) на границе раздела сред (на контактной поверхности). Но зато прекрасно прощупывается пальцем на торцевой поверхности, перпендикулярной к контактной и к направлению распространения ультразвука, на небольшом расстоянии ( $3...7$  мм) от контактной поверхности. Этот эффект используется во всех методах УЗК ГВ при обучении контролеров и для идентификации ГВ.

Волна растяжения-сжатия (колебания частиц металла в ней происходит вдоль контактной поверхности) входит в палец (как в воду), что приводит к уменьшению амплитуды сигнала. Прикосновение к контактной поверхности при распространении продольно-поверхностной волны, когда частицы металла колеблются вдоль границы, не приводит к изменению амплитуды эхо-сигнала. Это также подтверждает факт отсутствия нормальной составляющей колебаний к контактной поверхности в продольно-поверхностной волне.

При втором критическом угле падения продольной волны (в лучевом приближении) в нижней среде исчезает поперечная волна, но образуется неоднородная поперечная волна в виде

поверхностной волны. Считается [20], что частицы в волне колеблются по эллипсу, а волна является суперпозицией продольной и поперечной волн. В поверхностной волне имеется мощная составляющая колебаний частиц металла, которые происходят также, как в поперечной волне – перпендикулярно направлению распространения волны. И они демпфируются при прикосновении пальцев к поверхности – амплитуда сигнала заметно уменьшается. Это эффект используется в УЗД поверхностными волнами для идентификации волны и для определения координат отражателей.

О волнах на донной поверхности. Исходящая от границы раздела боковая поперечная волна в нижней среде, связанная с неоднородной продольно-поверхностной волной на границе раздела сред, и распространяющаяся (и несущая сдвиговое упругое возмущение в нижней среде) под третьим критическим углом при падении на донную поверхность возбуждает (рис. 8):

16. неоднородную продольно-поверхностную волну на границе, аналогичную волне 4;

17. волна 16 в каждой точке границы возбуждает боковую поперечную волну, распространяющуюся в металле под третьим критическим углом к границе.

Именно волны 16 и 17 объясняют причины наличия несоответствия между амплитудами фиксируемых сигналов и размерами зарубок в задаче Райхмана. Они же являются причиной возникновения множества сопутствующих импульсов с большим временем распространения, в сравнении с головной волной. Эти импульсы можно использовать для обеспечения более надежного обнаружения дефектов в сварных соединениях малых (до  $6...8$  мм) и средних толщин ( $8...20$  мм). В сейсмоакустике они используются и называются головными волнами 2, 3 и т. д.

Все эти волны представлены на рис. 3. Соответственно, в воде отсутствует боковая поперечная волна, а в воздухе отсутствуют боковые продольная и поперечная волны. Считаю, что представленные здесь определения (названия) волн, составляющих понятие «головная волна», полностью соответствует физическим характеристикам волн: направления колебаний в волне, направления распространения волн и скорость распространения волн. На мой взгляд, если мы рассматриваем физические процессы распространения волн, в данном случае вблизи границы двух сред, то должны охарактеризовать каждую составляющую волну или волны в каждой среде. Это дает более полное понимание физики процесса и позволяет более точно интерпретиро-

вать имеющиеся первичные и вторичные принятые импульсы.

Смысловое содержание термина «головная волна» в ультразвуковой дефектоскопии металлов, в том числе в ДВМ, в наилучшей степени характеризует её, поскольку именно ГВ (комплекс волн) первой фиксируется приемником, а принятый импульс затрачивает минимальное время на прохождение от излучателя через изделие до приемника и поэтому его называют главным или головным. Из этого смыслового содержания и пошло название головной волны сначала в сейсмоакустике, а затем и в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Интерпретация импульсов ГВ в УЗД металла по минимальному времени распространения оказалась важнейшей технологической (методической) характеристикой, как при обнаружении и интерпретации ГВ в 1972 г. при исследовании акустических характеристик металлов для оборудования и трубопроводов первого контура АЭС с ВВЭР-1000 зеркально-теневым методом наклонными искателями, так и при контроле эхо-методом сварных соединений, аустенитных наплавов и основного металла.

Сейчас некоторые исследователи пытаются доказать, что какой-то западный разработчик ДВМ (TOFD) первым предложил использовать головную (боковую продольную волну) для слежения за акустическими характеристиками в процессе контроля. Посмотрим еще раз на способ УЗК по А.С. № 502311 [6]. Он состоит в том, что в призме искателя возбуждают УЗ колебания, вводят их в контролируемую зону, принимают прошедшие через неё колебания и по их параметрам, с учетом состояния акустического контакта искателя с материалом, определяют дефектность материала, отличающийся тем, что с целью повышения качества дефектоскопии об акустическом контакте судят по параметрам продольно-поверхностной волны возбужденной в материале искателем (рис. 9, а).

Здесь представлено описание и говорится об использовании нами продольно-поверхностных, объемных и боковых волн, возбуждаемых одним пьезоэлементом с широкой диаграммой направленности, при УЗК зеркально-теневым методом. Непредвзятый исследователь может убедиться в идентичности методов контроля и использовании в нем головных и/или боковых волн. В настоящее время технология ДВМ базируется на сигнале головной (боковой) волны – первом импульсе, пришедшем от излучателя к приемнику через контролируемый объект

Но все же, в п. 4 [1] авторы признают и указывают, что иностранные термины головной, ползучей и боковой волн не могут быть признаны соответствующими термину «головная волна» в УЗК металлов. Но также все эти термины не соответствуют стан-

дарту на «Сейсморазведку», который они напрямую притягивают вновь и вновь к УЗД металлов.

Можно согласиться с ними, что при гармонизации международных стандартов с новыми украинскими, а в РФ с российскими, возникает много трудностей. Но посмотрим назад и увидим, как наши зарубежные коллеги, часто к сожалению низкой квалификации (что показано выше), вводили новую терминологию в свои стандарты по УЗД и не стеснялись в выборе своих терминов волн, без оглядки на наши исследования, прове-

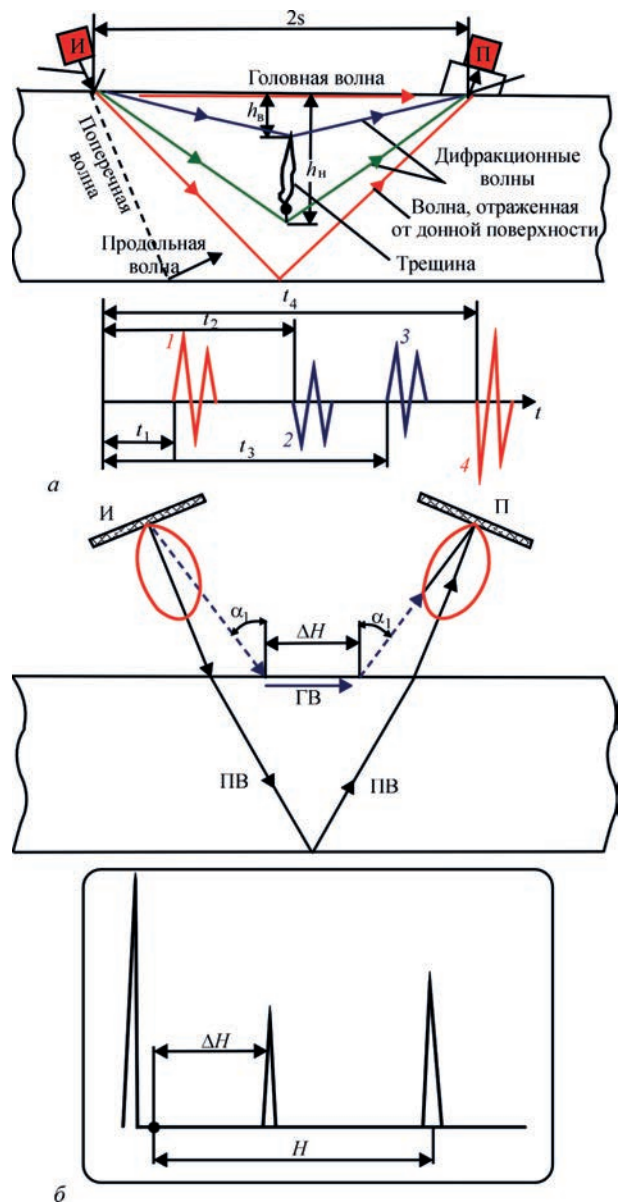


Рис. 9. Сравнение дифракционно-временного метода (ДВМ = TOFD) (а) и безгалванного способа (б) УЗ толщинометрии а:  $h_0$  – глубина залегания верхней кромки трещины;  $h_1$  – глубина залегания нижней кромки трещины;  $2S$  – расстояние между излучателем и приемником;  $A$  – амплитуда волны;  $t_1$  – время прихода ГВ;  $t_2$  – время прихода волны, дифрагированной на верхней кромке трещины;  $t_3$  – время прихода волны, дифрагированной на нижней кромке трещины;  $t_4$  – время прихода волны, отраженной от внутренней поверхности б:  $\Delta H$  – расстояние, проходимое ГВ в изделии;  $H$  – расстояние, проходимое продольной волной (ПВ) в изделии

денные раньше, на предложенную и используемую терминологию.

Сейчас идет гармонизация стандартов. В Украине и в РФ озаботились используемой терминологией, предлагаемой нам стандартами ISO и EN и вопросом, до какой степени мы должны или можем подняться или опуститься в уже разработанных стандартах.

О тексте и терминах стандартов на ультразвуковой контроль, где в методическом плане СССР был всегда на переднем плане, а в части ГВ в 1970–1980 гг. был далеко впереди, мы можем много дискутировать и спорить. Но пойти на упрощенное описание физических особенностей и закономерностей, когда исчезает полная картина используемых и рассматриваемых волн, в тесной связи с используемой и уже сложившейся терминологией в СССР, в РФ и в Украине, будет безусловно неправильно.

В разделе 5 [1] авторы при обсуждении характеристики головной волны – минимального времени распространения импульса, вновь предлагают использовать термин «боковая волна», а не «головная». При этом они весьма некорректно упоминают об ультразвуковой толщинометрии металлов прямыми преобразователями контактными искателями и сравнивают первый донный импульс («продольные волны... всегда вызывают первый сигнал на А-скане») на толщиномере и первый импульс ГВ при УЗД ГВ. Опыт УЗК и ультразвуковой толщинометрии на заводах и при эксплуатации различного оборудования, трубопроводов, элементов показал следующее.

Во-первых, первый импульс на толщиномере не обязательно бывает донным. В контролируемом изделии бывают расслоения и тогда отраженный от него импульс будет первым на А-скане или экране дефектоскопа (на толщиномере может не быть экрана). Но это не ГВ, и этот импульс с информацией о глубине залегания расслоения приходит на экран цифрового толщиномера, что может привести к неверным результатам контроля толщины и неправильной оценке качества.

Во-вторых, еще в 1970-е годы для проведения безэталонной ультразвуковой толщинометрии раздельно-совмещенными контактными преобразователями сначала в СССР в МНПО «Спектр» В. Королевым был разработан и запатентован специализированный толщиномер (рис. 9, б), который использовал дополнительную схему прозвучивания головной волной по [6] для эталонирования скорости распространения продольной волны непосредственно на контролируемом объекте. Затем патент у них приобрела фирма «Крауткремер», разработала и выпустила аналогичный толщиномер. Но приборы не нашли широкого применения.

Практика показала, что стандартная технология толщинометрии с настройкой толщиномера на образце из того же материала, что и контролируемое изделие, более проста, надежна и дешевле.

У нас в УЗД металлов никакой путаницы на сегодняшний день не имеется. Пока путаница имеется только в наших статьях и в разрабатываемых или редактируемых стандартах, пришедших из ISO или EN. Есть предложение украинских коллег отодвинуть термин «головные волны» на задворки УЗД, так как им он не нравится из-за наличия стандарта «Сейсморазведка» 1991 г., а также стандартов ISO или EN, в которых им нравятся слова «ползущие» («ползучие»), «скользящие» и «вытекающие» волны.

Я считаю, что позиция «нравиться – не нравиться» может иметь место, но так как мы работаем в УЗД металлов и в большинстве случаев, в отличие от сейсморазведки, на однородных по структуре металлах, нужно также иметь понятия и учитывать физические и технологические закономерности и особенности ультразвуковой дефектоскопии металлов. Для того, чтобы специалисты уверенно и грамотно могли использовать терминологию, представленную в статьях, в стандартах и книгах и одинаково трактовать ее, с полным пониманием физических процессов решать задачи подобные задачам Райхмана и Гурвича, а они систематически встречаются в практическом контроле объемными и головными волнами, поддерживаю предложение авторов статьи не искать «... легких путей и не ограничиваться примитивными моделями» в особенности «...при работе с методом головных волн».

Будет совсем неплохо, если мы и про приоритет не будем забывать. Ведь многие методики УЗК головными волнами я имел честь разрабатывать, испытывать и использовать вместе с моими украинскими коллегами: Запорожская АЭС – В.Л. Санжаровский и Е.Е. Гефсиманский, Южно-Украинская АЭС – И.В. Малахов и А.Н. Паллий, Хмельницкая АЭС – Ю.М. Копылов и Н.П. Марокко, Чернобыльская АЭС – О.Я. Зинченко и В.Л. Зинченко, Ровенская АЭС – В.П. Кравец и Г.М. Ямпольский и другими уважаемыми коллегами, которых прошу не обижаться, если они здесь не упомянуты. Наш опыт и знания должны быть основой при использовании старых терминов, выработке и принятии новых терминов в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

И это уже происходит. Достаточно посмотреть в труды ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ «Основные направления работ Отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений» под редакцией проф. В.А. Троицкого, Киев, 2019 г. [22]. В них на стр. 19, а также на стр. 89-100 в [23]

используются предложенные АО «НПО «ЦНИИТ-МАШ» и ранее принятые к использованию в обществе неразрушающего контроля в СССР, РФ, Украины, Болгарии и др. стран термины по УЗК металлов головными волнами.

**Список литературы**

1. Е.А. Давыдов, Дядин В.П., Шекеро А.Л. (2018) О терминологических особенностях в обозначении ультразвуковых волн, образующихся при первом критическом угле. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 1–12.
2. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1974) О выявлении подповерхностных дефектов ультразвуковым методом. *Труды VII Всесоюзной конференции «Неразрушающий контроль материалов изделий...»*, Киев.
3. Разыграев Н.П. (1979) *Экспериментальные исследования продольных подповерхностных волн и применение их для обнаружения подповерхностных дефектов в деталях энергетических установок*. Дис. ... канд. тех. наук. Москва, ЦНИИТМАШ.
4. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. (1975) *Отчет НИР «Исследование боковых ультразвуковых волн, с целью определения возможности контроля подповерхностного слоя деталей энергетических машин (поисковая)»* Т-76. Москва, ЦНИИТМАШ.
5. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1975) *Способ ультразвукового контроля качества материалов*. А. с. № 491092 от 01.06.73. Бюл. изобр. № 41.
6. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. (1976) *Способ ультразвуковой дефектоскопии материалов*. А. с. № 502311 от 28.12.73. Бюл. изобр. № 5.
7. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. (1977) *Способ ультразвукового контроля качества материалов*. А. с. № 565249 от 20.05.74. Бюл. изобр. № 26.
8. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1978) *Использование волн головного типа для ультразвукового контроля*. *Дефектоскопия*. изд. АН СССР, 1.
9. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1979) *Исследование ослабления ультразвуковых головных волн с расстоянием*. *Там же*, 1.
10. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1978) *Исследование процесса формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде*. *Там же*, 11.
11. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н. (1981) *Искатели для контроля приповерхностного слоя головными волнами*. *Там же*, 1, 53–62.
12. Разыграев Н.П. (1981) *О выявлении подповерхностных дефектов искателями головных волн ИЦ-61, ИЦ-70*. *Там же*, 3, 97–105.
13. Бреховских Л.М. (1957) *Волны в слоистых средах*. Москва, Наука.
14. Ермолов И.Н. (1966) *Методы ультразвуковой дефектоскопии*. Курс лекций. Ч.1. Москва, Горный институт.
15. Юозонене Л.В. (1980) *Упругие поверхностно-продольные волны и их применение для неразрушающего контроля*. *Дефектоскопия*, 8, 29–38.
16. Ланге Ю.В., Воронков В.А. (2003) *Контроль неразрушающей акустической. Термины и определения*. Справочник. Москва.
17. ГОСТ 16821-91. *Сейсмозащита. Термины и определения*.
18. Вюстенберг Х., Эрхард А., Мёхрле В. (1981) *Способ и устройство для неразрушающего контроля приповерхностного слоя*. Патент ФРГ № 2802278 от 15.01.81.
19. Erhard, A., Kroning, V. (1984) *Erzeugung, Ausbreitung und Anwendung von Ultraschall-Kriechwellen. Materialprüfung 26/1984 № 9*, September. VDI-Verlag GmbH, 323–326.
20. (1986) Крауткремер «*Ультразвуковая дефектоскопия материалов*» Берлин, Хейдельберг, Нью-Йорк, Лондон, Париж, Токио (нем. и англ.).
21. Викторов И.А. (1966) *Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике*. Москва, Наука.
22. (2019) «*Основные направления работ Отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений*» под ред. проф. В.А. Троицкого. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 19, 89–100.
23. Троицкий В.А., Шекеро А.Л., Давыдов Е. и др. (2019) *Технология оценки размеров несплошностей в сварных соединениях с применением дифрагированных волн*. Киев, ИЭС им. Патона НАНУ, 89–100.

Поступила в редакцию 24.03.2020

**НОВАЯ КНИГА**

**Эпизоды жизни и творчества, перспективы развития сварочной техники и дефектоскопии: монография / Троицкий В.А.; Киев: Интерсервис, 2020 – 252 с.**

Мемуарное произведение, посвященное становлению и развитию в Украине дефектоскопии, регулируемых источников питания для различных технологических процессов. Описаны креативные электротехнические и дефектоскопические идеи, разработка и реализация которых повысит качество сварных соединений, обеспечит объективность мониторинга ответственных промышленных объектов. Освещена деятельность Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД), становление Международной Академии неразрушающего контроля (ANDTI), деятельность Европейской Федерации неразрушающего контроля (EFNDT), Международного комитета неразрушающего контроля (ICNDT) и Международного комитета по стандартизации (ISO TC-135), ответственных за развитие в области неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния ответственных объектов.

Показан приоритет Украины в решении многих проблем в дефектоскопии, в создании автоматизированных систем неразрушающего контроля качества в трубосварочном производстве, средств для мониторинга технического состояния различных металлоконструкций.

Книга будет интересна дефектоскопистам и электротехникам, занимающимся сварочной техникой, аспирантам и преподавателям, специалистам по историографии сварочной и дефектоскопической техники.

*Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала.*



Підписано до друку 14.07.2020. Формат 60×84/8.  
 Офсетний друк. Ум. друк. арк. 8.37.  
 Друк ТОВ «ДІА».  
 03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

## В.М. УЧАНІН – ЗАСЛУЖЕНИЙ ВІНАХІДНИК УКРАЇНИ!



Колектив Інституту електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, редколегія та редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» щиро вітають доктора технічних наук, завідувача лабораторії Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка

НАН України, Учанина Валентина Миколайовича з присвоєнням почесного звання «Заслужений винахідник України» як визнання його заслуг перед українською та світовою наукою та бажають нових здобутків в його творчій діяльності.

### З УКАЗУ ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ

«Про відзначення державними нагородами України з нагоди Дня науки»

Указом Президента України №186/2020 від 15 травня 2020 р. за вагомий особистий внесок у розвиток вітчизняної науки, зміцнення науково-технічного потенціалу України, багаторічну сумлінну працю та високий професіоналізм з нагоди Дня науки Учанину Валентину Миколайовичу, завідувачу лабораторії Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, доктору технічних наук, було присвоєно почесне звання «Заслужений винахідник України».

В.М. Учанин – відомий науковець і експерт в галузі неруйнівного контролю і діагностики матеріалів електромагнітними методами. У Фізико-механічному інституті працює з 1971 р. по даний час, де пройшов шлях від інженера до завідувача лабораторії. У 1992-2000 рр. працював начальником відділу у науково-дослідному і проектному інституті приладів автоматичного регулювання і систем управління «Промприлад». У 1983 р. успішно захистив кандидатську, у 2017 р. – докторську дисертації. У 1992 р. йому було присвоєно вчене звання старшого наукового співробітника.

В.М. Учаниним розроблено наукові основи створення нових засобів і технологій вихрострумової дефектоскопії і структуроскопії матеріалів і об'єктів, що характеризуються високим рівнем завад. Ним запропоновано принципи побудови вихрострумових перетворювачів подвійного ди-

ференціювання, вихрострумових дефектоскопів та структуроскопів для контролю відповідальних конструкцій в умовах виробництва та експлуатації, які також стали основою низки автоматизованих систем контролю деталей залізничного транспорту (НВФ «Ультракон-сервіс», НВФ «Промприлад»). Нові технічні рішення використано для створення дефектоскопів типу ДУЕТ, ПОЛІТ, ЛЕОТЕСТ (ВД 3.01, ВД 3.02, ВД 3.03, ВД 4.01), ОКО-01, ВДЗ-71, ВДЗ-81 і ЕДДІКОН. Прилади впроваджено в космічній та авіаційній галузі (КБ «Туполєв», ДП «Антонов», ПАТ «Мотор-Січ», ДП «Івченко-Прогрес», ДКБ «Південне», Авіакомпанія «МАУ», Миколаївський, Конотопський, Львівський, Одеський і Севастопольський авіаремонтні заводи) та інших галузях (завод ім. В. Малишева, ПАТ ДТЕК «Західенерго», ГПУ «Львівгазвидобування», НВФ «Зонд», Карпатському та Полтавському експертно-технічних центрах, Нововолинському ливарному заводі тощо). Створено структуроскопи типу Альфа та Дельта для виявлення газонасичених шарів титанових сплавів в інтересах авіаційного двигунобудування. Запропоновано принципи побудови приладів для безконтактного вимірювання електропровідності алюмінієвих сплавів, на базі яких створено нову методологію визначення технічного стану об'єктів довготривалої експлуатації за параметрами циклічної тріщиностійкості. Це використано для оцінювання деградації алюмінієвих сплавів літаків довготривалої експлуатації та оптимізації режимів зварювання конструкцій із алюмінієвих сплавів (ДП «Антонов»). Запропоновано нові способи і засоби для визначення напруженого стану конструкцій із феромагнітних сталей за змінами магнітної анізотропії (НВФ «Спеціальні наукові розробки»).

В.М. Учанин є автором 119 патентів і авторських свідоцтв, понад 320 публікацій і 5 монографій. Він є членом Міжнародної Академії неруйнівного контролю (Брешія, Італія), членом Правління Українського Товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, членом редакційних колегій журналів «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» та «Відбір і обробка інформації», членом Ради по присудженню вчених ступенів в Івано-Франківському університеті нафти і газу. За роботи, пов'язані з розв'язанням проблем діагностики авіаційної техніки, у 2017 р. йому присуджено Державну Премію України в галузі науки і техніки.

## С.І. КУЧУКУ-ЯЦЕНКУ – 90



2 серпня 2020 р. виповниться 90 років з дня народження першого заступника директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, академіка НАН України Сергія Івановича Кучука-Яценка.

Сергій Іванович після закінчення Київського політехнічного інституту за розподілом був направлений на роботу в Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, де пройшов славний трудовий шлях від молодого фахівця-інженера до професора, доктора технічних наук, завідувача одного з провідних відділів, першого заступника директора Інституту з наукової роботи, академіка Національної академії наук України. У 1960 р. С.І. Кучук-Яценко захистив кандидатську, а у 1972 р. – докторську дисертації. У 1978 р. він був обраний членом-кореспондентом, а у 1987 р. – дійсним членом Національної академії наук України.

Понад п'ятдесят років С.І. Кучук-Яценко займається роботами по зварюванню рейок. Розроблені за його активної участі і керівництві технології та обладнання для зварювання рейок дозволили вперше в світовій практиці застосувати високопродуктивне контактне зварювання в польових умовах, що значною мірою сприяло переходу залізниць на безстиківі шляхи. За активної участі С.І. Кучука-Яценка серійний випуск такого устаткування по документації ІЕЗ був організований на Каховському заводі електрозварювального обладнання, який з 1970-х років став світовим експортером такого обладнання.

Розробки С.І. Кучука-Яценка та його співробітників успішно використані також на машинобудівних заводах при виготовленні кільцевих заготовок, валів і заготовок з різномірних матеріалів. Особливо ефективним виявилось застосування багатопозиційного контактного зварювання, що дозволяє зварювати великогабаритні деталі одночасно в декількох місцях (корпуси двигунів, радіатори потужних трансформаторів).

Значний внесок С.І. Кучук-Яценко вніс у створення технології та обладнання для контактного стикового зварювання трубопроводів різного призначення. За його активної участі розроблені технології, системи керування й устаткування для контактного стикового зварювання труб діаметром від 60 до 1400 мм і виконано його широкомасштабне впровадження при будівництві трубопроводів на території колишнього СРСР. З використанням КСЗ зварено понад 70 тис. км різних трубопроводів, в тому числі 4 тис. км найпотужніших трубопроводів

в районах Крайньої Півночі. Застосування КСЗ дозволило підвищити продуктивність праці і забезпечити надійність трубопроводів. Ця робота була також відзначена Ленінською премією у 1989 р.

Під керівництвом С.І. Кучука-Яценка та за його безпосередньої участі безперервно тривають роботи зі створення технологій зварювання тиском неповоротних стиків труб різного призначення. Вперше у світовій практиці розроблені технології та обладнання для пресового зварювання з нагрівом дугою, керованою магнітним полем, труб діаметром до 300 мм з товщиною стінки 5...15 мм, що відрізняються високою продуктивністю при мінімальній енергоємності процесу.

С.І. Кучук-Яценко бере активну участь на всіх етапах виконання перерахованих робіт. У 1998 р. йому присвоєно звання «Заслужений діяч науки і техніки України», у 2000 р. – Премія ім. Є.О. Патона за наукову роботу «Зварювання в твердій фазі».

С.І. Кучук-Яценко автор більше 700 наукових публікацій, в тому числі 10 монографій, 350 авторських свідоцтв. Їм отримано понад 300 українських і зарубіжних патентів, багато з яких придбані за ліцензійними угодами зарубіжними фірмами.

В даний час академік С.І. Кучук-Яценко продовжує займатися актуальними проблемами в галузі зварювання, створенням прогресивних технологій з'єднання важкозварювальних матеріалів. Він очолює один з провідних наукових відділів Інституту електрозварювання. С.І. Кучук-Яценко тривалий час плідно співпрацює з Каховським заводом електрозварювального устаткування – одним з провідних підприємств-виробників зварювального обладнання в Україні. Він бере активну участь в організації серійного виробництва контактних стикових машин для зварювання залізничних рейок і труб.

С.І. Кучук-Яценко є заступником голови Вченої ради ІЕЗ, заступником головного редактора журналу «Автоматичне зварювання». Ним підготовлено більше десяти кандидатів і докторів технічних наук. Він був обраний першим президентом Товариства зварників України, входить до складу його правління, є членом Товариства зварників США та Великобританії.

Заслуги вченого відзначені двома орденами Трудового Червоного Прапора, орденом Знак Пошани, орденами Князя Ярослава Мудрого, медалями.

*Колектив Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, редколегія та редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»*