

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

А.Я. Недосека (заст. гол. ред.),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, С.А. Недосека,

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар)

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
м. Київ

В.Л. Венгринович

Інститут прикладної фізики НАН Білорусі, Мінськ

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща

М.Л. Казакевич

Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського

НАН України, м. Київ

О.М. Карпаш

Івано-Франківський нац. техн. університет нафти і газу

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський,

В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН

України, м. Львів

Г.І. Прокопенко

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова

НАН України, м. Київ

А.Г. Протасов, С.К. Фомічов

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

В.О. Стороженко

Харківський національний університет радіоелектроніки

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка

НАН України, м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і

природокористування України, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевица, 11

Тел./факс: +38 (044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2021

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

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

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

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

**УЧАНІН В.М., ОСТАШ О.П., БИЧКОВ С.А., СЕМЕНЕЦЬ О.І.,
ДЕРЕЧА В.Я.** Вихрострумний моніторинг деградації
алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіа-
ційної техніки 3

**НЕДОСЕКА А.Я., НЕДОСЕКА С.А., ЯРЕМЕНКО М.А.,
ОВСІЄНКО М.А., САВЧЕНКО О.К., ЕПОВ С.Г.** Інтегру-
вання методу АЕ в технологію ремонту і продовження
ресурсу металоконструкцій 11

**ГОПКАЛО О.П., ЗЕМЦОВ М.В., ГОПКАЛО О.Є.,
БОДУНОВ В.Є., БЕЗЛЮДЬКО Г.Я., СОЛОМАХА Р.М.**
Діагностування пошкодженості гусеничних траків при
механічному навантаженні за результатами вимірювання
коерцитивної сили 17

СТРИЖАЛО В.О., СТАСЮК С.З. Контроль технічного
стану технологічного обладнання нафтопереробних
виробництв за довготривалої експлуатації у водневовміс-
ному робочому середовищі 27

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

**СТОРОЖЕНКО В.О., МЕШКОВ С.М., ОРЕЛ Р.П.,
МЯГКИЙ О.В.** Досвід НТЦ «Термоконтроль» в області
теплового неруйнівного контролю 32

КІПІН М.М. Годографи взаємодії елементів конічної пере-
дачі в прокатній кліті. 43

РАЗЫГРАЕВ Н.П., РАЗЫГРАЕВ А.Н. Ультразвуковою
контроль головними волнами сварних соединений
трубопроводов Ду-300 на Чернобыльской АЭС 48

ІНФОРМАЦІЯ

В.О. Троїцькому – 85 59

Конференції, виставки, семінари – 2021. 60

Дати, події, факти з історії неруйнівного контролю 62

Видання журналу підтримують:

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

EDITORIAL BOARD

L.M. Lobanov (Editor-in-Chief),

A.Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),

V.O. Troitskiy (Deputy Editor-in-Chief),

Ie.O. Davydov, S.A. Nedoseka,

Yu.M. Posypaiko,

I.Yu. Romanova (execut. secretary)

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv

V.L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk

K. Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland

M.L. Kazakevich

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry
of NAS of Ukraine, Kyiv

O.M. Karpash

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk, V.R. Skalskiy, V.M. Uchanin
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv

G.I. Prokopenko

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

A.G. Protasov, S.K. Fomichov

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

V.O. Storozhenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

V.O. Stryzhalo

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

M.G. Chausov

National University of Life and Environmental Sciences
of Ukraine, Kyiv

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,

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

Address

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

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

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration
of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2021

Subscription index 74475.

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

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

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

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

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- UCHANIN V.M., OSTASH O.P., BYCHKOV S.A., SEMENETS O.I.,
DERECHA V.Ya.* Eddy current monitoring of aluminium alloy
degradation during long-term operation of aircraft 3
- NEDOSEKA A.Ya., NEDOSEKA S.A., YAREMENKO M.A.,
OVSIENKO M.A., SAVCHENKO O.K., EPOV S.G.* Iteration of
the AE method into the technology of repair and extension of
life of metal structures 11
- GOPKALO O.P., ZEMTSOV M.P., GOPKALO O.Ye.,
BODUNOV V.Ye., BEZLYUDKO G.Ya., SOLOMACHA P.M.*
Ddiagnosis of damage to caterpillar tracks under
mechanical loading based on the results of measurements of
the coercive force 17
- STRIZHALO V.O., STASYUK S.Z.* Control of technical
condition of technological equipment of petroleum-processing
productions in long-term service in hydrogen-containing
working environment 27

INDUSTRIAL

- STOROZHENKO V.O., MESHKOV S.M., OREL R.P.,
MIAHKYI O.V.* Experience of research and technical center
«Thermocontrol» in the area of thermal non-destructive testing 32
- KIPIN M.M.* Hodographs of iteration of the elements of bevel
drive in the rolling stand 43
- RAZYGRAEV N.P., RAZYGRAEV A.N.* Ultrasonichead
wave control of welded connections of Du-300 pipelines at
Chernobyl nuclear power plant 48

INFORMATION

- V.O. Troitskiy is 85 59
- Conferences, exhibitions, seminars – 2021 60
- Dates, events, facts in the history of non-destructive testing 62

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,
Technical Committee on standartization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78

ВИХРОСТРУМОВИЙ МОНІТОРИНГ ДЕГРАДАЦІЇ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПІД ЧАС ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

В.М. Учанін¹, О.П. Осташ¹, С.А. Бичков², О.І. Семенець², В.Я. Дереча²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: vuchanin@gmail.com

²ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Моніторинг деградації алюмінієвих сплавів є дуже важливою частиною стратегії підтримки льотної придатності старіючої авіаційної техніки. Наш підхід базується на можливості знайти кореляції між параметрами матеріалу, які можна визначити без руйнування, і характеристиками циклічної тріщиностійкості контрольованого матеріалу. Показано, що питома електропровідність як структурно-чутливий параметр алюмінієвих сплавів, виміряна вихрострумовим методом, може бути використана в якості ефективного інструменту такого дослідження. Головна перевага вихрострумового методу полягає в можливості проводити вимірювання без прямого контакту з контрольованою поверхнею. З точки зору вихрострумового методу авіаційна конструкція може бути представлена як тришаровий об'єкт, який складається з діелектричного захисного покриття, антикорозійного плакування чистого алюмінію товщиною 0,5 мм і обшивки з алюмінієвого сплаву, який підданий експлуатаційним навантаженням. Для вимірювання електропровідності в цьому третьому шарі з високим рівнем заглушення впливу зазору (до 0,5 мм) розроблений новий вимірювач електропровідності типу ВЕПР-31. Отримано кореляцію між видовженням і втомною границею міцності деградованих сплавів типу Д16Т і В95Т1 для різних еквівалентних напружень. Вихрострумові вимірювання питомої електропровідності, проведені на тривало-експлуатованих літаках АН-12 (виробництво 1966 р.) в умовах авіаремонтного заводу в різних зонах крила, підтвердили ефективність запропонованої методології. Бібліогр. 27, рис. 8.

Ключові слова: авіаційна техніка, алюмінієві сплави, деградація, вихрострумовий метод, електропровідність, циклічна тріщиностійкість

Неруйнівний контроль (НК) відповідальних конструкцій під час експлуатації здебільш виконують з метою виявлення дефектів втомного і корозійного походження [1–3]. Разом з цим все більшого значення набуває проблема своєчасного оцінювання механічних характеристик матеріалів конструкцій, які змінюються в процесі деградаційних змін структури під дією експлуатаційних чинників, до яких можна віднести вплив підвищеної температури, статичних і циклічних навантажень, корозійного середовища, радіації тощо [4, 5]. Отримані дані необхідні для оцінювання надійності конструкцій і прогнозування їх ресурсу.

Експлуатаційна деградація конструкційних алюмінієвих сплавів (АС) пов'язана з дією багатьох чинників, серед яких найвпливовішими є статичні і циклічні навантаження, температура, вплив агресивних середовищ тощо [6–9]. Зазначені чинники впливають на матеріал конструкцій у різний спосіб, що призводить до збільшення кількості дисперсних інтерметалідів і густини дислокацій, дифузії легувальних елементів і їх сегрегації вздовж меж зерен, мікророзтріскування включень вторинної фази тощо [7, 9]. Особливе значення має синергія експлуатаційних чинників, коли кожний з них окремо не призводить до суттєвої деградації матеріалів,

а вирішальне значення має їх сумісна дія. Без оцінювання деградаційної зміни механічних властивостей матеріалів неможливе достовірне оцінювання залишкового ресурсу конструкцій і, зокрема, експлуатація літаків за сучасним принципом допустимої пошкоджуваності. Деградацію властивостей АС можна оцінювати руйнівними і неруйнівними методами [9]. Руйнівні методи встановлення реальних ресурсних характеристик матеріалів базуються на механічних випробуваннях зразків-свідків чи зразків, вирізаних з експлуатованих конструкцій під час ремонту та заміни окремих частин конструкцій. Під час експлуатації такий підхід об'єктивно неможливий, що стимулює пошук інших підходів і актуалізує необхідність експлуатаційного моніторингу деградаційних змін структури матеріалів методами НК.

Наш підхід базується на пошуку і використанні кореляцій між фізичними структурно-чутливими параметрами матеріалу, які можна визначити методами НК, і механічними характеристиками матеріалу за статичного і циклічного навантаження, які, з одного боку, чутливі до змін структури і деградації матеріалу, а з іншого – необхідні для розрахунку залишкового ресурсу конструкцій [10, 11]. Схема



Рис. 1. Взаємозв'язки між умовами експлуатації, структурою та фізичними і механічними характеристиками алюмінієвих сплавів

взаємозв'язків, які призводять до формування таких кореляцій для АС, наведена на рис. 1.

Очевидно, що умови експлуатації, зокрема характер механічних напружень, температура, корозійне середовище, впливають на зміну властивостей матеріалу, серед яких мікроструктурний і фазовий склад, щільність дислокацій та залишкові напруження, які можна вважати найбільш визначальними (рис. 1). У свою чергу властивості матеріалу одночасно впливають на структурно-чутливі фізичні параметри матеріалу, які можна визначити засобами НК, і механічні характеристики матеріалу. Подібний підхід використано нами для контролю деградаційних змін феромагнітних сталей парогонів теплових електростанцій на основі вимірювання коерцитивної сили матеріалу [12]. Очевидно, що такий підхід вимагає поєднання сучасних підходів механіки руйнування з розвитком можливостей НК.

Для АС структурно-чутливими параметрами НК можуть бути питома електропровідність (ПЕП) і термоелектрорушійна сила (ТЕРС) [5, 6, 11]. Наші попередні дослідження показали, що вибір ПЕП в якості структурно-чутливого параметра має суттєві переваги через можливість її безконтактного вимірювання вихрострумовим методом через шар лакофарбового покриття [13]. Зазначена на рис. 1 анізотропія ПЕП також може бути перспективним напрямком розвитку методів моніторингу деградації АС за умови створення засобів її визначення, які поки що знаходяться на початковому етапі [14].

Новизною нашого підходу є пошук кореляцій між ПЕП і характеристиками циклічної тріщиностійкості (ХЦТ), які необхідні для розрахунку залишкового ресурсу конструкцій авіаційної техніки на відміну від попередніх робіт [15, 16], де досліджували кореляції ПЕП з такими характеристиками АС, як твердість, границя міцності, границя текучості, відносне видовження. На рис. 1 ХЦТ обведені пунктирною лінією.

Слід зазначити, що характеристики існуючих вихрострумових структуроскопів, побудованих на вимірюванні ПЕП, не дозволяють визначати зміни ПЕП під час контролю деградаційних змін матеріалу авіаційних конструкцій через обмежений діапазон відстроювання від змін товщини захисних діелектричних покриттів (ДП) і зазору, а також низьку глибину контролю [15, 18]. Відомі закордонні прилади, зокрема Sigmatest і Sigmachek, мають недостатню локальність контролю через великий (більше 7 мм) діаметр робочої площадки вихрострумового перетворювача (ВСП) і застосовуються здебільш на металургійних підприємствах для контролю якості термообробки. Тому виникла необхідність оптимізувати параметри вихрострумового контролю і розробити новий вихрострумовий структуроскоп з локальним ВСП і покращеними метрологічними характеристиками щодо глибини контролю і діапазону відстроювання від товщини ДП і зазору.

Розроблення засобів для безконтактного вимірювання питомої електропровідності алюмінієвих сплавів в умовах експлуатації авіаційної техніки. Для забезпечення НК авіаційних конструкцій під час експлуатації вихрострумовий структуроскоп має відповідати наступним загальним вимогам:

- забезпечити високу локальність контролю авіаційних конструкцій, які характеризуються кривизною поверхні з великою кількістю отворів під заклепку;
- забезпечити контроль через шар захисного ДП без його видалення;
- забезпечити контроль змін структури у внутрішніх шарах матеріалу конструкцій.

Перша вимога може бути вирішена вибором робочого діаметра ВСП, який не повинен перевищувати 1,2 мм. Друга вимога до структуроскопів потребує реалізації способів, які можуть розширити діапазон

відстроювання від впливу змін зазору між робочою поверхнею ВСП і поверхнею об'єкту контролю (ОК) або товщини ДП в діапазоні до 0,5 мм. Зазначимо, що на використаних робочих частотах зазор (повітряний проміжок) між ВСП і поверхнею ОК і шар ДП відповідної товщини впливають на сигнал ВСП однаково. Тому далі будемо використовувати термін «відстроювання від зазору», маючи на увазі і відстроювання від зміни товщини захисного ДП.

Для виконання третьої вимоги необхідно зменшити робочу частоту контролю, щоб на вихідний сигнал ВСП впливали зміни ПЕП в нижніх шарах ОК.

З точки зору вихрострумового методу кожний елемент поверхні авіаційної конструкції можна представити у вигляді тришарової структури (рис. 2) [19]. Верхній шар – це захисне ДП. Другий шар – антикорозійний плакований шар чистого алюмінію. І третій шар – основний алюмінієвий матеріал, який несе експлуатаційні навантаження і структурні деградаційні зміни матеріалу якого необхідно контролювати з відстроюванням від змінних параметрів, що можуть впливати на результати контролю.

Очевидно, що поставлена задача у повній постановці є достатньо складною і тому для її вирішення доцільно поряд з експериментальними засобами застосувати методи математичного моделювання. Зокрема в роботі [19] аналізували оптимальний вибір робочої частоти контролю залежно від товщини ДП. Досліджували залежність чутливості вихрострумового методу до зміни ПЕП від робочої частоти контролю для різних значень зазору (товщини ДП). Показано існування оптимальної робочої частоти залежно від товщини ДП, яка зменшується зі збільшенням товщини ДП. Щоб отримати максимальну чутливість до зміни ПЕП під час контролю через шар ДП товщиною 0,5 мм, оптимальна частота повинна мати значення 30 кГц, що втричі менше, ніж робочі частоти раніше розроблених приладів вимірювання ПЕП в АС.

Для зменшення похибки вимірювання ПЕП, пов'язаної з можливою зміною зазору (або товщини ДП), перспективним є використання фазового способу обробки сигналу ВСП [20]. Фазовий структуроскоп (вимірювач ПЕП) складається з двох каналів – вимірювального і опорного. Для збільшення

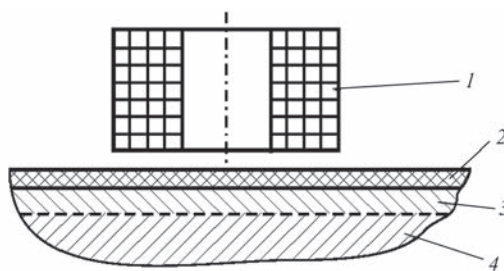


Рис. 2. ВСП над елементом авіаційної конструкції у вигляді 3-шарового електропровідного ОК: 1 – ВСП; 2 – ДП; 3 – плакувальний шар алюмінію; 4 – алюмінієвий сплав

діапазону відстроювання від впливу зміни зазору вихідний сигнал ВСП підсумовують з сигналом компенсації, що фактично призводить до зміщення початку координат в комплексній площині сигналу. Нами використано спосіб динамічної компенсації, коли сигнал компенсації змінюється тільки по одній компоненті залежно від значення ПЕП, що спрощує реалізацію фазового способу і розширює діапазон відстроювання від зміни зазору [21]. В опорному каналі з сигналу генератора формується опорний сигнал для роботи фазового детектора. Для встановлення нульового сигналу на виході фазового детектора при встановленні ВСП на зразок з ПЕП, що

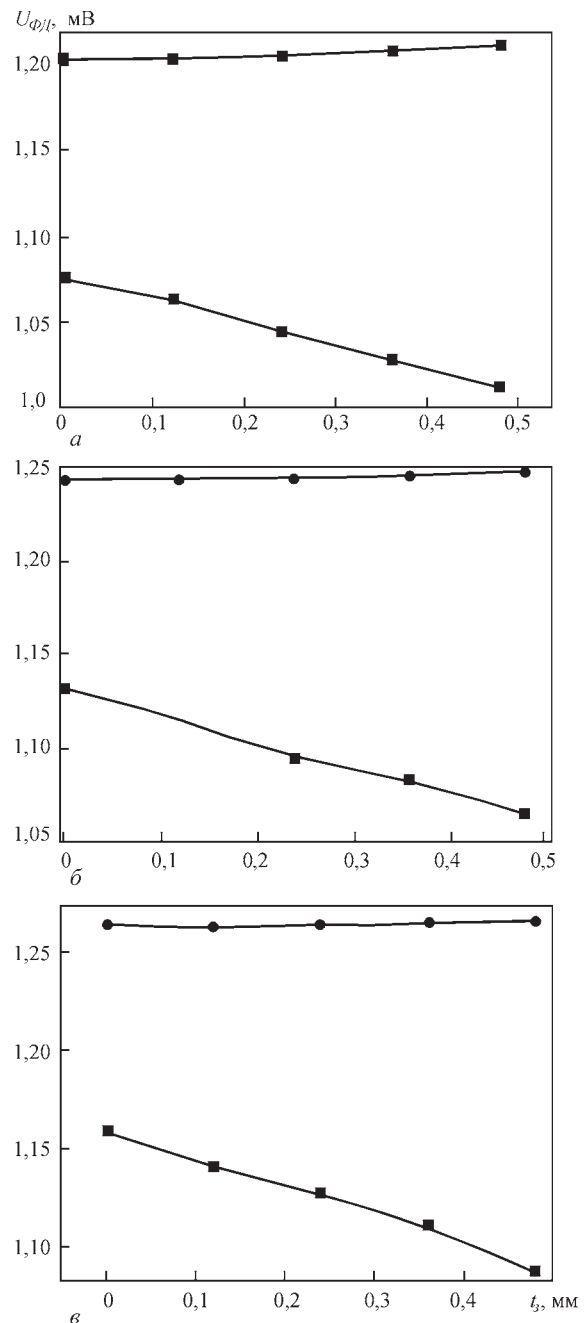


Рис. 3. Залежність напруги на виході фазового детектора $U_{ФД}$ від зазору t_3 без відстроювання (●) і з відстроюванням (■) для ВСП, розміщеного на зразках матеріалу з ПЕП 14,0 МСм/м (а), 24,7 (б) і 37,1 (в)

відповідає нижнім значенням вимірюваного діапазону, в схему введений фазообертач опорного каналу. Характеристики фазового детектора мають ключове значення для досягнення високої точності вимірювача ПЕП в цілому і його розробка вимагає особливої уваги. В приладі застосовано вдосконалену схему, що дозволило зменшити похибки, пов'язані з перетворенням фази сигналу у часовий інтервал, який використано в якості параметра індикації [22]. На виході фазового детектора виділяється сигнал, пропорційний фазовому зсуву між вимірювальним і опорним сигналами. Для цифрової індикації вимірюваного значення безпосередньо в одиницях ПЕП (МСм/м) у схему вимірювача ПЕП введено блок масштабування і лінеаризації відповідно до нашого винаходу [23]. На рис. 3 наведено залежності сигналу на виході фазового детектора від зазору, які отримано без відстроювання від нього і з реалізацією запропонованого способу вихрострумовевого контролю з відстроюванням від впливу зазору [21]. Результати наведено для початку, середини і кінця діапазону вимірювань ПЕП (14,0; 24,7 і 37,1 МСм/м відповідно). Дані залежності показують, що сигнал на виході фазового детектора не залежить від величини зазору в діапазоні до 0,5 мм, що забезпечує можливість проведення контролю через шар ДП відповідної товщини.

Представлену вище сукупність технічних рішень використано для створення вихрострумовевого структуроскопа-вимірювача ПЕП (рис. 4), який вирішує задачу локального вимірювання питомої ПЕП алюмінієвих сплавів у діапазоні 14,0...37 МСм/м з похибкою до 2 % з відстроюванням від впливу зміни зазору до 0,5 мм.

Вихрострумове структуроскоп типу ВЕПР-31 (рис. 4) на відміну від раніше створених приладів типу ВЕП-21 і ВЕП-22 [6, 9] має більший діапазон відстроювання від величини (зміни) зазору або товщини лакофарбового покриття і автономне живлення. Крім того, в приладі використано знижену робочу частоту 60 кГц, що дозволяє контролювати зміни структури АС через шар ДП і плакування.



Рис. 4. Вихрострумове структуроскоп типу ВЕПР-31

Зазначимо, що під час кінцевого вибору робочої частоти враховано також необхідність мати достатню чутливість вимірювання фази вихідного сигналу ВСП, яка зменшується зі зменшенням робочої частоти. В приладі використано локальний ВСП, обмотки якого встановлено на феритовому осердді діаметром 1,1 мм, що дозволяє контролювати авіаційні конструкції з великою кількістю отворів.

Основні технічні характеристики структуроскопа типу ВЕПР-31

1. Діапазон вимірювань ПЕП, МСм/м..... 14,0...37,1.
2. Основна похибка вимірювань в нормальних умовах,% не більше ± 2
3. Допустимий зазор між ВСП і контрольованою поверхнею, мм не більше 0,5
4. Живлення приладу:
 – від мережі 50...60 Гц, напругою 220 В;
 – від вмонтованої акумуляторної батареї
5. Потужність споживання, Вт не більше 1,0
6. Габаритні розміри, мм не більше 60×160×14
7. Маса приладу, кг не більше 1,5

Метрологічні і експлуатаційні характеристики структуроскопа типу ВЕПР-31 дозволяють проводити моніторинг деградаційних змін структури АС в умовах експлуатації, що підтверджено досвідом його використання на ДП «Антонов».

Кореляційні залежності між механічними характеристиками і ПЕП деградованих алюмінієвих сплавів. Показано [24], що процеси деградації АС залежать від навантаженості елементів конструкцій і відображаються у зміні значення ПЕП. Встановлено, що сумісна тривала дія механічних напружень і підвищених температур обумовлює зміни тонкої структури, значні локальні внутрішні напруження і визначає особливу механічну поведінку конструкційних АС типу Д16 і В95. При цьому зростає їх схильність до крихкого руйнування (падає пластичність Δ) і знижуються ХЦТ (ΔK_{th} , ΔK_{fc}), які визначають втомну довговічність (N_f) елементів конструкцій [9], а ПЕП σ зростає. Встановлено, що падінню порогу втоми ΔK_{th} і втомної довговічності N_f зразків деградованих сплавів типу Д16 і В95 у 1,5...2 рази відповідає ріст ПЕП σ на 20...30 % (3...4 МСм/м при похибці вимірювання 2 %) [10].

Результати досліджень на зразках, вирізаних із зон обшивки з різними робочими еквівалентними напруженнями, показали, що за значеннями ПЕП можна оцінювати зміну механічних властивостей матеріалу, ступінь його деградації, порівнюючи їх з даними, отриманими руйнівними методами досліджень (рис. 5). Очевидно, що підвищення значень ПЕП свідчить про деградацію матеріалу в локальних зонах обшивки, що проявляється у вичерпанні пластичності матеріалу (зниженні його відносного видовження) та падінні опору поширенню втомної тріщини (порогу втоми).

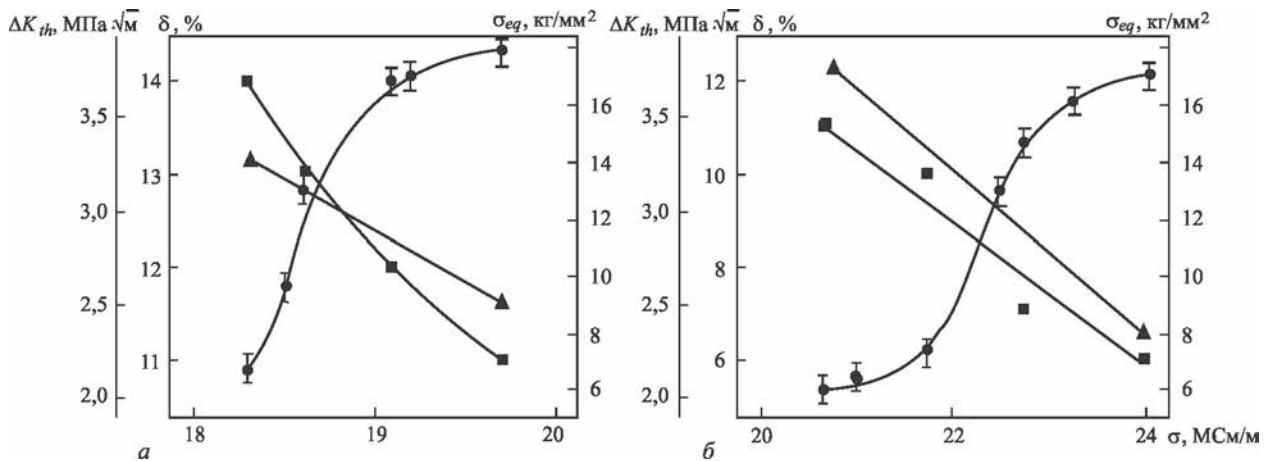


Рис. 5. Залежності між відносним видовженням δ (■), порогом втоми ΔK_{th} (▲), рівнем робочих еквівалентних напружень σ_{eq} (●) та ПЕП (σ) деградованих сплавів Д16АТНВ (а) і В95Т1 (б)

Отримані результати створюють основу для моніторингу деградації конструкційних алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації [25–27]. Важливо, що реалізація цих підходів засобами вихрострумової структуроскопії дозволяє проводити вимірювання ПЕП матеріалів авіаційних конструкцій без зняття лакофарбових покриттів.

Моніторинг деградації алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіаційної техніки. Розроблені підходи перевіряли під час вимірювання розподілу ПЕП у різних зонах верхньої (сплав В95Т1) і нижньої (сплав Д16АТНВ) обшивки крила літака АН-12, який знаходився в експлуатації з 1966 р. [10, 11]. Вимірювання проводили за допомогою вихрострумового структуроскопа типу ВЕПР-31 (рис. 4). Розподіл значень ПЕП (σ) матеріалу верхньої і нижньої обшивки крила літака типу АН-12 в зоні між 4 і 5 стрингером вздовж крила від кореня крила до його кінця за номерами нервюр наведено на рис. 6. Вка-

зано також значення σ_k (▲) на кінцевому елементі крила. Значення ПЕП поступово зменшуються від кореня крила із збільшенням номера нервюри, що пов'язано зі зменшенням рівня еквівалентних напружень [9, 10]. Видно, що ПЕП на кінцевому елементі крила має найменше значення, що легко пояснити відсутністю у цій зоні навантажень, необхідних для процесу деградації. АС у цій зоні можна умовно вважати таким, який не зазнав деградації. Це дозволяє використати значення ПЕП у кінцевих зонах у випадках, коли інформація про ПЕП матеріалу у стані постачання відсутня, що характерно для літаків тривалої експлуатації. Тому значення σ_k на кінцевому елементі крила запропоновано використовувати в якості порівняльного значення для визначення рівня деградації матеріалу [27].

В якості критерія локальної деградації матеріалу запропоновано використовувати три різні порівняльні параметри, що підтверджується їх розподілом за номерами нервюр на рис. 7 [27]. Можна використовувати різницю $\sigma - \sigma_k$ між ПЕП матеріалу в контрольованій зоні і ПЕП матеріалу кінцевого елемента крила відповідно (рис. 7, а). Значення цього параметра для недеградованого матеріалу відповідає $\sigma - \sigma_k = 0$. Або можна використовувати відношення σ/σ_k (рис. 7, б), яке для недеградованого матеріалу буде відповідати $\sigma/\sigma_k = 1$. Можна також використовувати відношення $(\sigma - \sigma_k)/\sigma_k$, яке для недеградованого матеріалу буде відповідати $(\sigma - \sigma_k)/\sigma_k = 0$ (рис. 7, в).

Запропоновану методологію використано для контролю технічного стану (в тому числі ступеня деградації матеріалу) алюмінієвих лонжеронів лопатей вертольотів. Дослідження лопатей після різного напруження (до 1100 год) у зібраному і розшитому станах проводилось на ВАТ «Мотор-Січ». Вимірювання ПЕП, проведені на «відкритих» лонжеронах, виявили критичні місця пошкоджуваності лонжеронів, які відповідають зонам максимального експлуатаційного навантаження.

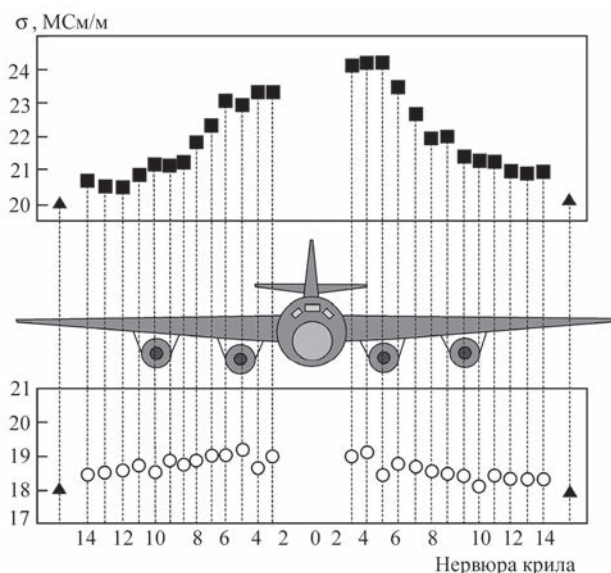


Рис. 6. Розподіл ПЕП (σ) верхньої (■) і нижньої (○) обшивки крила літака АН-12 після багаторічної експлуатації вздовж крила за номерами нервюр (▲ – значення ПЕП σ_k на кінцевому елементі крила)

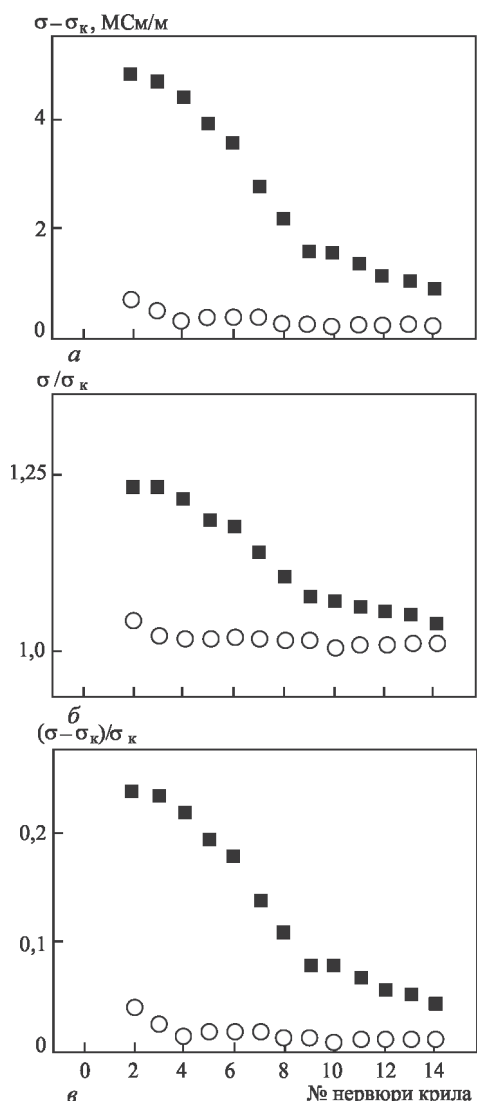


Рис. 7. Розподіл параметрів локальної деградації АС на верхній (■) і нижній (○) обшивках крила залежно від номера нервюри: а – для параметра $\sigma - \sigma_k$; б – для параметра σ/σ_k ; в – для параметра $(\sigma - \sigma_k)/\sigma_k$

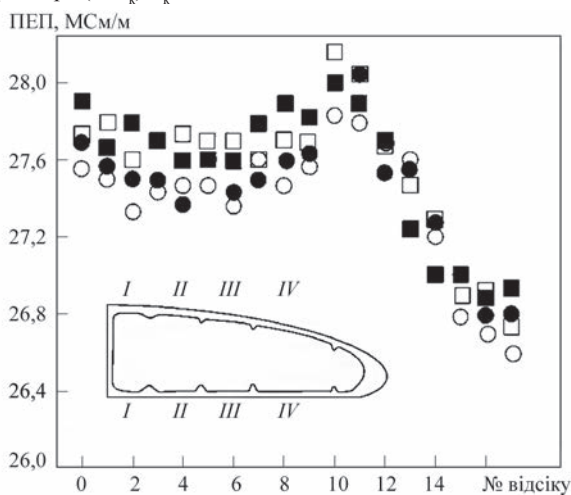


Рис. 8. Розподіл ПЕП на верхній (□ i ○) і нижній (■ i ●) сторонах лонжерона лопаті вертольоту в зонах I (□ i ■) і II (○ i ●)

На рис. 8 видно, що ПЕП має максимальне значення біля кореня лопаті, а мінімальне на її кінці, аналогічно, як у розподілі ПЕП вздовж крила літака

на рис. 6. В зоні відсіків №№ 10, 11 спостерігається ділянка зростання ПЕП, що відповідає зоні максимальної дії напружень розтягу, згину і кручення. Таким чином, за розподілом ПЕП можна знаходити критичні зони максимальної пошкоджуваності лонжеронів лопатей вертольоту.

Представлена методологія оцінки рівня локальної деградації матеріалів авіаційних конструкцій під час довготривалої експлуатації підвищить достовірність прогнозування їх залишкового ресурсу, а також може стати важливою складовою в реалізації концепції безпечної пошкоджуваності.

Висновки

1. Розглянуто проблему деградації алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіаційної техніки. Показано актуальність кореляційних залежностей між фізичними структуро-чутливими параметрами матеріалу, які можна визначити методами НК, і механічними характеристиками матеріалу за циклічного навантаження.

2. Проаналізовано особливості моніторингу деградації авіаційних сплавів на основі безконтактного вимірювання питомої електропровідності. Представлено вихрострумовий структуроскоп-вимірювач питомої електропровідності для контролю пошкоджуваності матеріалів авіаційної техніки в умовах експлуатації.

3. Показано, що підвищення значень питомої електропровідності свідчить про деградацію матеріалу в локальних зонах конструкції, що проявляється у вичерпанні пластичності матеріалу (зниженні його відносного видовження) та падінні опору поширенню втомної тріщини (порогу втоми).

4. Запропоновано методологію вихрострумового моніторингу деградації авіаційних алюмінієвих сплавів в умовах тривалої експлуатації авіаційних конструкцій. Наведено результати ефективного використання розроблених методів і засобів для визначення критичних зон в обшивках літака і лонжеронах лопатей вертольотів із алюмінієвих сплавів.

Список літератури

1. McMaster, R.C., McIntire, P. (1986) Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, flux leakage and Microwave Nondestructive Testing). USA, American Society for NDT.
2. Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение.
3. Учанін В.М. (2006) Вихрострумова дефектоскопія елементів конструкцій. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 4, 66–73.
4. Dobmann, G., Boller, Ch., Herrmann, H.-G. Altpeter, I. (2014) Micromagnetic and electromagnetic NDT for lifetime management by monitoring ageing of structural materials. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, 9(3–5), 348–359.
5. Estorff, U., Davies, L., Trampus, P. Eds. (1999) NDT methods for monitoring degradation. Proc. of the Joint EC–IAEA Meeting, Petten, European Commission, JRC Institute of Advanced Materials.
6. Осташ О.П., Федірко В.М., Учанін В.М. и др. (2007) *Механіка руйнування і міцність матеріалів. Т. 9: Міцність*

і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій. Львів, Вид-во «Сполом».

7. Осташ О.П., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В. (2006) Деградація матеріалів і втомна міцність тривало експлуатованих авіаконструкцій. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **4**, 5–16.
8. Нестеренко Г.И., Басов В.Н. Нестеренко Б.Г., Петрусенко В.Г. (2006) Влияние длительной эксплуатации самолетов на свойства материалов их конструкций. *Проблемы машиностроения и надежность машин*, **4**, 41–50.
9. Осташ О.П., Ківа Д.С., Учанін В.М. та ін. (2013) Діагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 15–22.
10. Ostash, O., Uchanin, V., Semenets, O. et al. (2018) Evaluation of aluminium alloys degradation in aging aircraft. *Research in Nondestructive Evaluation*, **29** (3), 156–166. <http://dx.doi.org/10/1080/09349847.2017.1302622>.
11. Uchanin, V., Ostash, O. (2019) Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment. *Procedia Structural Integrity*, **16**, 192–197.
12. Uchanin, V., Ostash, O., Nardoni, G., Solomakh, R. (2020) Coercive Force Measurements for Structural Health Monitoring. In «The Fundamentals of Structural Integrity and Failure» (Ed. Richard M. Wilcox), New York, Nova Science Publishers.
13. Учанін В.М. Осташ О.П. (2019) Оцінювання експлуатаційної деградації конструкційних матеріалів електромагнітними методами неруйнівного контролю. *Матеріали 9-ї Нац. наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»* (Київ, 19–21.11.2019), 35–40.
14. Учанін В.М., Рибачук В.Г., Кулинич Я.П. *Вихрострумний спосіб вимірювання параметрів анізотропії електричної провідності неферомагнітних матеріалів*. України Пат. 138680, МПК G01 N27/90. Опубл. 10.12.2019, Бюл. № 23.
15. Дорофеев А.Л., Ершов П.Е. (1985) *Физические основы электромагнитной структуроскопии*. Новосибирск, Наука.
16. Наумов Н.М., Микляев П.Г. (1974) *Резистометрический неразрушающий контроль алюминиевых деформируемых сплавов*. Москва, Металлургия.
17. Rummel, W.D. (1966) Characterization and evaluation of 2014 aluminum alloy by eddy current conductivity techniques. *Materials Evaluation*, **14**(6), 322–326.
18. Бакунов А.С. (2004) Эволюция аппаратуры для вихретоковой структуроскопии цветных металлов в России. *Контроль. Диагностика*, **4**, 63–64.
19. Назарчук З.Т., Учанін В.М., Кулинич Я.П. (2019) Оптимізація параметрів вихрострумного контролю деградаційних змін питомої електропровідності алюмінієвих сплавів старіючих літаків. *Відбір і обробка інформації*, **47**, 5–11. [doi.org/10.15407/vidbir2019.47.005](http://dx.doi.org/10.15407/vidbir2019.47.005)
20. Учанін В.Н., Макаров Г.Н. (1996) Подавление влияния зазора при бесконтактном измерении удельной электрической проводимости методом вихревых токов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 41–45.
21. Учанін В.М. (2012) *Способ вимірювання електропровідності немагнітних матеріалів*. України Пат. № 98206. Опубл. 25.04.2012, Бюл. № 28.
22. Учанін В.М., Черленевський В.В. (2011) *Пристрій вихрострумного контролю параметрів виробів*. України Пат. № 58670. Опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.
23. Учанін В.М., Макаров Г.М., Черленевський В.В. (2012) *Вихрострумний спосіб вимірювач питомої електропровідності неферомагнітних матеріалів*. України Пат. № 97304. Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 2.
24. Осташ О.П., Андрейко І.М., Маркашова Л.І. та ін. (2013) Вплив тривалої експлуатації на структуру і фізико-механічні властивості алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **49**(1), 18–27.
25. Осташ О.П., Учанін В.М., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В. (2013) *Вихрострумний спосіб визначення ступеня експлуатаційної деградації конструкційних матеріалів*. України Пат. № 101424, МПК G01N27/90. Опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.
26. Осташ О.П., Учанін В.М., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В., Ковальчук Л.Б. (2014) *Вихрострумний спосіб ви-*

значення ступеня локальної деградації конструкційних матеріалів під час довготривалої експлуатації. України Пат. 106168, МПК G01N27/90. Опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.

27. Осташ О.П., Учанін В.М., Семенець О.І., Головатюк Ю.В., Ковальчук Л.Б., Дереча В.Я. (2017) *Спосіб моніторингу ступеня локальної деградації матеріалів тривало експлуатованих авіаційних конструкцій*. України Пат. 113736, МПК G01N27/90. Опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

References

1. McMaster, R.C., McIntire, P. (1986) *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4: Electromagnetic testing (Eddy current, flux leakage and microwave nondestructive testing)*. USA, American Society for NDT.
2. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) Electromagnetic testing. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Uchanin, V.M. (2006) Eddy current testing of structure elements. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **4**, 66–73 [in Ukrainian].
4. Dobmann, G., Boller, Ch., Herrmann, H.-G. Altpeter, I. (2014) Micromagnetic and electromagnetic NDT for lifetime management by monitoring ageing of structural materials. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, **9**(3-5), 348–359.
5. Estorff, U., Davies, L., Trampus, P. Eds. (1999) In: *Proc. of the Joint EC-IAEA Meeting on NDT methods for monitoring degradation*, Petten, European Commission, JRC Institute of Advanced Materials.
6. Ostash, O.P., Fedirko, V.M., Uchanin, V.M. et al. (2007) Fracture mechanics and strength of materials. Vol.9: Strength and fatigue life of aircraft materials and structure elements. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
7. Ostash, O.P., Andrejko, I.M., Golovatyuk, Yu.V. (2006) Degradation of materials and fatigue strength of aircraft structures in long-term operation. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **4**, 5–16 [in Ukrainian].
8. Nesterenko, G.I., Basov, V.N., Nesterenko, B.G., Petrusenko, V.G. (2006) Influence of long-term service of aircraft on properties of materials of their structures. *Problemy Mashinostroeniya i Nadyozhnost Mashin*, **4**, 41–50 [in Russian].
9. Ostash, O.P., Kiva, D.S., Uchanin, V.M. et al. (2012) Diagnostics of technical condition of aircraft structures after long-term operation. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 15–22 [in Russian].
10. Ostash, O., Uchanin, V., Semenets, O., Holovatyuk, Y., Kovachuk, L., Derecha, V. (2018) Evaluation of aluminium alloys degradation in aging aircraft. *Research in Nondestructive Evaluation*, **29**(3), 156–166. <http://dx.doi.org/10/1080/09349847.2017.1302622>.
11. Uchanin, V., Ostash, O. (2019) Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment. *Procedia Structural Integrity*, **16**, 192–197.
12. Uchanin, V., Ostash, O., Nardoni, G., Solomakh, R. (2020) Coercive force measurements for structural health monitoring. In: *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*. Ed. by Richard M. Wilcox. New York, Nova Science Publishers.
13. Uchanin, V.M., Ostash, O.P. (2019) Evaluation of operational degradation of structural materials by electromagnetic methods of nondestructive testing. In: *Proc. of 9th Nat. Sci.-Techn. Conf. on Nondestructive Testing and Technical Diagnostics* (Kyiv, 21.11.2019), 35–40 [in Ukrainian].
14. Uchanin, V.M., Rybachuk, V.G., Kulynych, Ya.P. Eddy current method for measurement of parameters of electrical conductivity anisotropy of nonferromagnetic materials. Pat. 138680, Ukraine, Int. Cl. G01 N27/90. Publ. 10.12.2019
15. Dorofeev, A.L., Ershov, P.E. (1985) Physical fundamentals of electromagnetic structuroscopy. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
16. Naumov, N.M., Miklyaev, P.G. (1974) Resistometric non-destructive testing of aluminium wrought alloys. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

17. Rummel, W.D. (1966) Characterization and evaluation of 2014 aluminum alloy by eddy current conductivity techniques. *Materials Evaluation*, **14**(6), 322–326.
18. Bakunov, A.S. (2004) Evolution of equipment for eddy current structuroscopy of nonferrous metals in Russia. *Kontrol. Diagnostika*, **4**, 63–64 [in Russian].
19. Nazarchuk, Z.T., Uchanin, V.M., Kulynych, Ya.P. (2019) Optimization of eddy current testing parameters of degradation changes in specific conductivity of aluminium alloys of aging aircraft. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **47**, 5–11 [in Ukrainian]. doi.org/10.15407/vidbir2019.47.005
20. Uchanin, V.N., Makarov, G.N. (1996) Suppression of influence of gap in contactless measurement of specific conductivity by eddy current method. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 41–45 [in Russian].
21. Uchanin, V.M. (2012) Method for measurement of electrical conductivity of nonmagnetic materials. Pat. 98206, Ukraine. Publ. 25.04.2012 [in Ukrainian].
22. Uchanin, V.M., Cherlenevskiy, V.V. (2011) Device for eddy current testing of parameters of products. Pat. 58670, Ukraine. Publ. 26.04.2011 [in Ukrainian].
23. Uchanin, V.M., Makarov, G.M. Cherlenevskiy, V.V. (2012) Eddy current specific conductivity meter of nonferromagnetic materials. Pat. 97304, Ukraine. Publ. 10.01.2012 [in Ukrainian].
24. Ostash, O.P., Andrejko, I.M., Markashova, L.I. et al. (2013) Influence of long-term operation on structure and physico-mechanical properties of aluminium alloys of D16 and V95 type. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **49**(1), 18–27 [in Ukrainian].
25. Ostash, O.P., Uchanin, V.M., Andrejko, I.M., Golovatyuk, Yu.V. (2013) Eddy current method for determination of operation degradation degree of structural materials. Pat. 101424, Int. Cl. G01N27/90. Publ. 25.03.2013 [in Ukrainian].
26. Ostash, O.P., Uchanin, V.M., Andrejko, I.M., Golovatyuk, Yu.V., Kovalchuk, L.B. Eddy current method of determination of local degradation degree of structural materials during long-term operation. Pat. 106168, Ukraine, Int. Cl. G01N27/90. Publ. 12.05.2014 [in Ukrainian].
27. Ostash, O.P., Uchanin, V.M., Semenets, O.I., Golovatyuk, Yu.V., Kovalchuk, L.B., Derecha, V.Ya. (2017) Method of monitoring of local degradation degree of materials of aircraft structures in long-term operation. Pat. 113736, Ukraine, Int. Cl. G01N27/90. Publ. 10.02.2017 [in Ukrainian].

EDDY CURRENT MONITORING OF ALUMINUM ALLOY DEGRADATION DURING LONG-TERM OPERATION OF AIRCRAFT

V.M. Uchanin¹, O.P. Ostash¹, S.A. Bychkov², O.I. Semenets², V.Ya. Derecha²

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: vuchanin@gmail.com

²Antonov Company. 1 Akademika Tupoleva str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@antonov.com

The monitoring of aluminum alloy degradation is a very important part in aging aircraft maintenance strategy. Our approach is based on the possibility to find the correlation between the material parameters measurable nondestructively and cyclic crack growth resistance characteristics of evaluated material. It was revealed that specific electric conductivity as a structure-sensitive parameter of aluminum alloys measured by eddy current method, can be applied as effective tool for such evaluation. The main advantage of the eddy current method is the possibility to carry out the measurements without direct contact with the inspected surface. From the eddy current method point of view, the aircraft component can be represented by 3 layer object which consists of dielectric protective coating, anticorrosive layer about 0,5 mm thick of pure aluminum cladding and aluminum alloy skin subjected to operational loading. To measure conductivity in this third layer with high lift-off suppression (up to 0.5 mm) a new eddy current conductivity meter of the VEPR-31 type was developed. The correlations between the elongation, fatigue limit and electrical conductivity of degraded D16T and B95T1 alloys for different equivalent stresses were obtained. The EC electrical conductivity measurements carried out in real aircraft repair plant conditions in Antonov-12B aircraft (produced in 1966) after long-term service confirmed the proposed methodology efficiency. Ref. 27, Fig. 8.

Keywords: aircraft, aluminum alloys, degradation, eddy current method, electrical conductivity, fatigue crack growth resistance

Надійшла до редакції 22.01.2021

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031

Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/twuj
Передплатний індекс 21791



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/tdnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України

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

ІНТЕГРУВАННЯ МЕТОДУ АЕ В ТЕХНОЛОГІЮ РЕМОНТУ І ПРОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

А. Я. Недосека¹, С. А. Недосека¹, М. А. Яременко¹, М. А. Овсієнко¹, О. К. Савченко², С. Г. Епов²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: inpat59@ukr.net

²АТ «Одеський припортовий завод». 65481, Одеська обл., м. Южне, вул. Заводська, 3. E-mail: office@opz.odessa.ua

Все більш актуальним стає питання оцінки поточного стану промислових об'єктів різного призначення і умов їх експлуатації, зокрема резервуарів – сховищ для зберігання нафти, зрідженого газу, рідкого аміаку та ін. Пропонується для діагностування об'єктів підвищеної небезпеки технологія АЕ моніторингу підвищеної акустичної активності в матеріалі конструкції з наступною оцінкою (класифікацією) стану об'єкту із застосуванням традиційних методів. Наведені результати аналізу даних систем АЕ моніторингу резервуарів та їх використання для визначення першочергових місць для додаткового контролю при проведенні технічних оглядів та ремонтних робіт. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: акустична емісія (АЕ), АЕ активність, АЕ моніторинг, навантаження, фактичний стан ОК

Проведення повного технічного обстеження промислових об'єктів неруйнівними методами – багатоетапний комплекс технологічних заходів: злив продукту зберігання, зачистка від залишків, зачистка всіх зварних швів і основного металу для проведення НК, зняття ізолюючого зовнішнього покриття, видалення газів і т. ін., що потребує чимало часових, людських та фінансових ресурсів. Для великогабаритних конструкцій необхідно також враховувати, що знадобиться значний час для зупинки об'єкту і виведення його з експлуатації.

Для діагностування об'єктів підвищеної небезпеки активно використовується технологія моніторингу підвищеної акустичної активності в матеріалі конструкції, що базується на методі акустичної емісії (АЕ) [1], з подальшою оцінкою стану об'єкта із застосуванням традиційних методів (підходів). Використання стаціонарних систем моніторингу надає можливість здійснювати експлуатацію виробничих об'єктів, виходячи з їх реального технічного стану. Результати враховуються при проведенні експертного обстеження та призначення допустимого терміну експлуатації до наступного експертного обстеження. Це дозволяє виключити технічно невиправдані зупинки виробництва і раціонально планувати проведення ремонтно-профілактичних робіт [2].

Розглянемо більш детально основні задачі, що вирішуються із застосуванням даної технології на промислових об'єктах, та отримані результати [3].

Обладнання для проведення АЕ моніторингу, а саме датчики АЕ; коаксіальні кабелі для забезпечення зв'язку датчиків з приладом; кабель зв'язку з керуючим комп'ютером встановлюються на об'єкті під час проведення поточного або капітального ремонту зі зняттям, при наявності,

захисних покриттів. На цьому ж етапі, після вивчення технічної документації, особливостей експлуатації об'єкту, результатів проведення попередніх обстежень і, можливо, проведення ремонтних робіт, виконуються і дослідно-експериментальні роботи на об'єкті з метою визначення його акустичних властивостей, місць і кількості датчиків для забезпечення можливості отримання повноцінної інформації з усього контрольованого об'єкту протягом тривалого періоду. Для об'єктів, що працюють в умовах високих температур, додаткового розраховуються параметри хвилеводів та технологія їх фіксації на поверхні об'єкту.

Система моніторингу ЕМА має в складі обладнання та спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ) виробництва ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Окрім програм, якими контролюється власне робота вимірювального обладнання, ПЗ включає додатковий комплекс аналітичних та сервісних програм. За період експлуатації ПЗ ЕМА неодноразово модернізувалося. Фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона мають цілодобовий доступ до даних АЕ моніторингу об'єктів з використанням мережі Інтернет як у режимі перегляду інформації АЕ, що надходить з резервуарів, так і в режимі управління для внесення і, за необхідності, коригування вихідних даних, перевірки працездатності різних режимів роботи ПЗ та обладнання або установки оновлених версій ПЗ з повідомленням фахівців підприємства.

Головні з розв'язуваних системою безперервного АЕ моніторингу ЕМА завдань [4]:

– обробка в режимі реального часу даних про сигнали АЕ та інших експлуатаційних технологічних даних, отриманих з об'єкта, наприклад, таких, як тиск, температура, рівень наливу, деформація конструктивних елементів об'єкту;

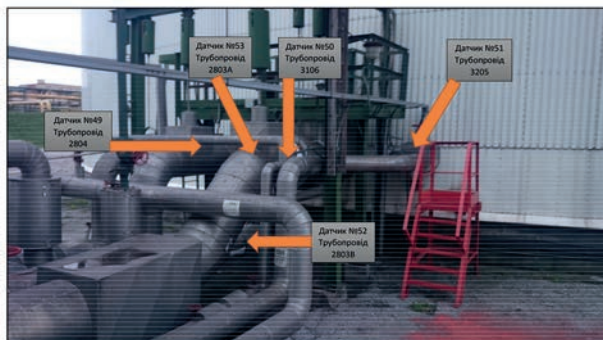
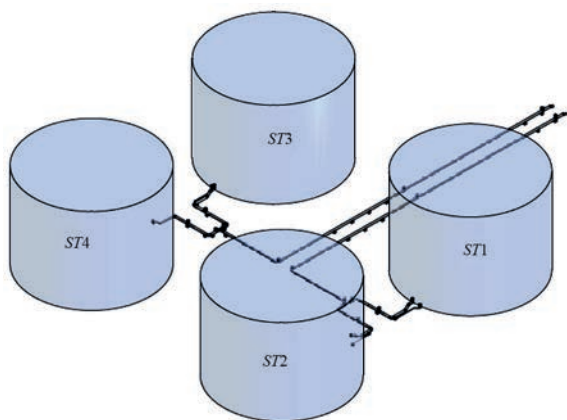


Рис. 1. Об'єкти безперервного АЕ моніторингу

- видача індикаторного попередження трьох рівнів при виникненні небезпечної акустичної активності;
- розрахунок при виникненні небезпечної акустичної активності рівня руйнівних навантажень;
- обробка та подання у графічному і табличному вигляді статистики виданих попереджень із зазначенням місць підвищеної АЕ активності;
- при застосуванні спеціального ПЗ надання, у разі виникнення небезпеки, колірного і звукового попередження, автоматична генерація нормованої інтелектуальної поради щодо дій оператора.

До основних переваг режиму безперервного моніторингу слід віднести те, що спостереження не вимагає зміни робочих параметрів і спеціального навантаження конструкції, спрощується процедура контролю. Робота без перевантажень, необхідних при звичайних випробуваннях, подовжує термін служби конструкції.

Розглянемо результати роботи систем безперервного АЕ моніторингу ЕМА на резервуарах (РВС) на одному з підприємств хімічної промисловості [5]. На 4-х резервуарах встановлені системи сімейства ЕМА – ЕМА-3 і ЕМА-4. Об'єкти контролю – циліндричні зварні резервуари з кришкою, що мають такі параметри: об'єм 34000 м³; робоче середовище – рідкий аміак; робоча температура – -34 °С; марка матеріалу – ASTM-A537.S1; A537.A; діаметр 52 м; висота 21 м; поверхня контролю 3,5 тис. м²; дата введення в експлуатацію – 1978 р. Системи отримують дані як з резервуарів, так і з трубопроводів наливу-зливу продукту (рис. 1).

На циліндричній поверхні резервуару встановлено 48 давачів АЕ (ДАЕ). ДАЕ розташовані у 3-х горизонтальних перетинах (рівнях) на відстані 7 м один від одного (по 16 ДАЕ у кожному перетині на відстані 10,23 м один від одного). Схема розміщення датчиків АЕ на поверхні об'єктів наведена на рис. 2. Додатково показані давачі 49-56, що

контролюють вхідні трубопроводи у режимі зонної локації.

В процесі проведення АЕ моніторингу персонал, відповідальний за даний об'єкт, отримує оперативну інформацію щодо стану матеріалу та найбільш небезпечні місця на поверхні об'єкту. Це показує спеціальний індикатор прогнозу руйнівного навантаження і попередження про небезпеку на робочому екрані програми (рис. 3). При нормальному стані металу стінки конструкції індикатор має зелений колір, прогноз руйнівного навантаження відсутній. Якщо в процесі вимірювання з'являється підвищена акустична активність, індикатор змінює колір відповідно до рівня попередження: 1 попередження – жовтий колір, 2 попередження – помаранчевий колір, 3 попередження – червоний колір. При прогнозуванні системою руйнівного навантаження на індикатор виводиться значення прогнозу (представлено нижнім і верхнім значеннями в діапазоні похиб-

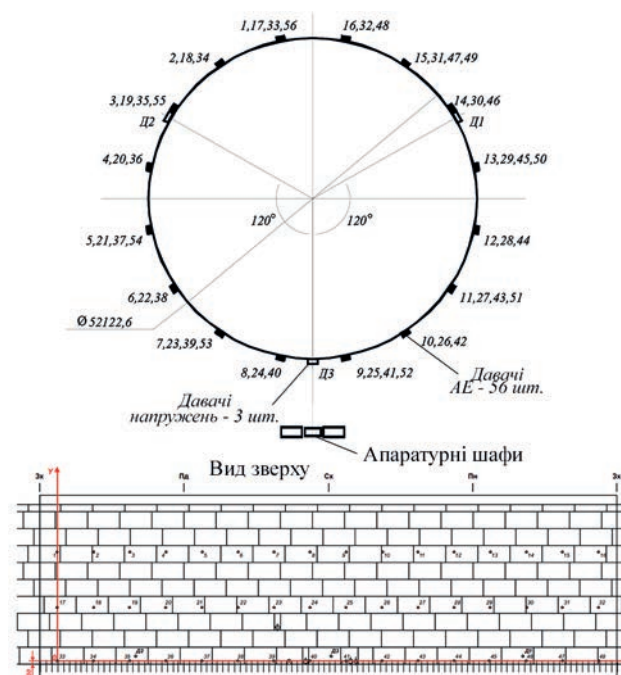


Рис. 2. Схема розміщення датчиків АЕ на об'єкті (приклад)

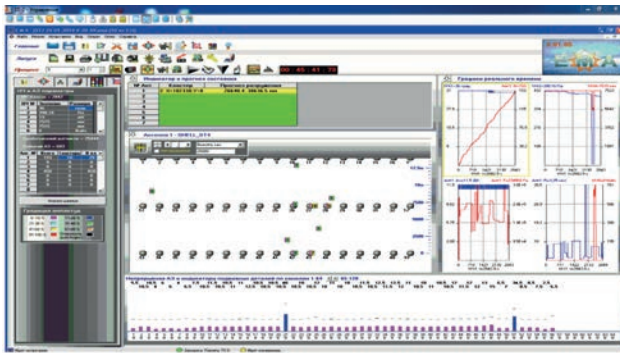


Рис. 3. Робочий екран програми моніторингу з наданням попередження 1 рівня (жовта полоса) та прогнозу рівня навантаження

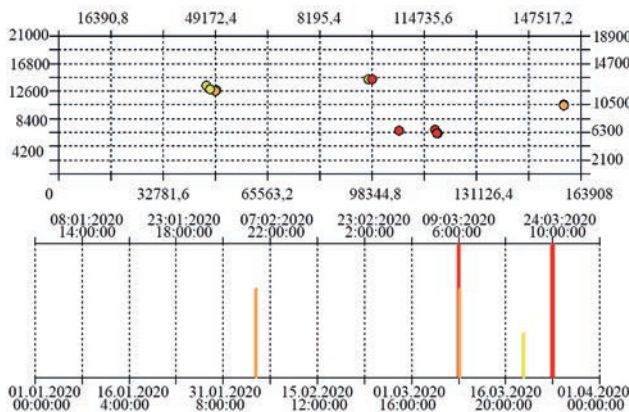


Рис. 4. Статистична інформація щодо розподілу кластерів подій АЕ, для яких видавались попередження про небезпеку, на бічній поверхні резервуару за 1 квартал 2020 р.

ки не більше $\pm 15\%$) і координати джерела сигналів АЕ. Наявність такої інформації дозволяє оперативно прийняти рішення щодо фактичного стану матеріалу об'єкту та можливих коригувань у режимі його експлуатації (наприклад, змінити рівень навантаження). В автоматичному режи-

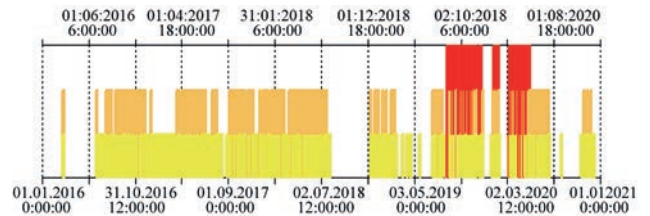


Рис. 5. Загальна картина розподілу у часі для попереджень 1–3 рівнів за період 2016–2020 рр.

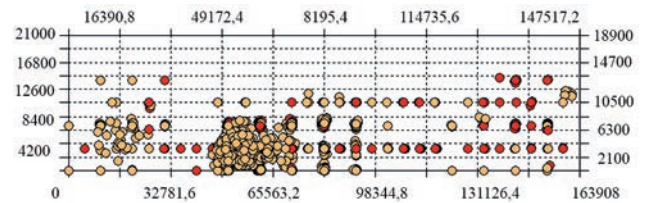


Рис. 6. Загальна картина розподілу джерел АЕ на поверхні РВС за період 2016–2020 рр.

мі оператора також видається порада щодо його можливих дій у цій ситуації [4].

Зібрана та оброблена статистична інформація дозволяє при проведенні планових ремонтів надати інформацію щодо координат джерел АЕ, для яких видавались попередження вище 1-го рівня небезпеки, для скорочення строків проведення відновлювальних робіт. Координати джерел АЕ виводяться як у табличному вигляді, так і з прив'язкою до поверхні об'єкту АЕ моніторингу.

При обробці результатів АЕ моніторингу резервуарів за будь-який період спостереження на розгортці бокової поверхні резервуарів наводяться координати місць підвищеної АЕ активності, для яких видавались системою попередження різних рівнів небезпеки (рис. 4). Цей період може бути довільним з часу встановлення відповідного ПЗ: роки, місяці, дні і години, тобто

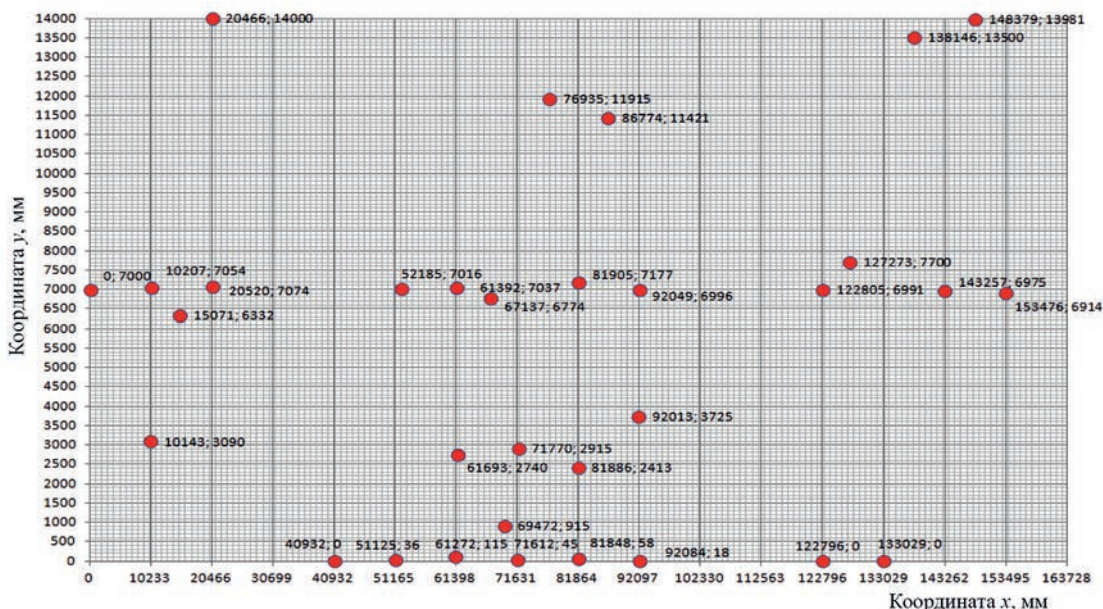


Рис. 7. Приклад представлення інформації щодо координат місць підвищеної АЕ активності

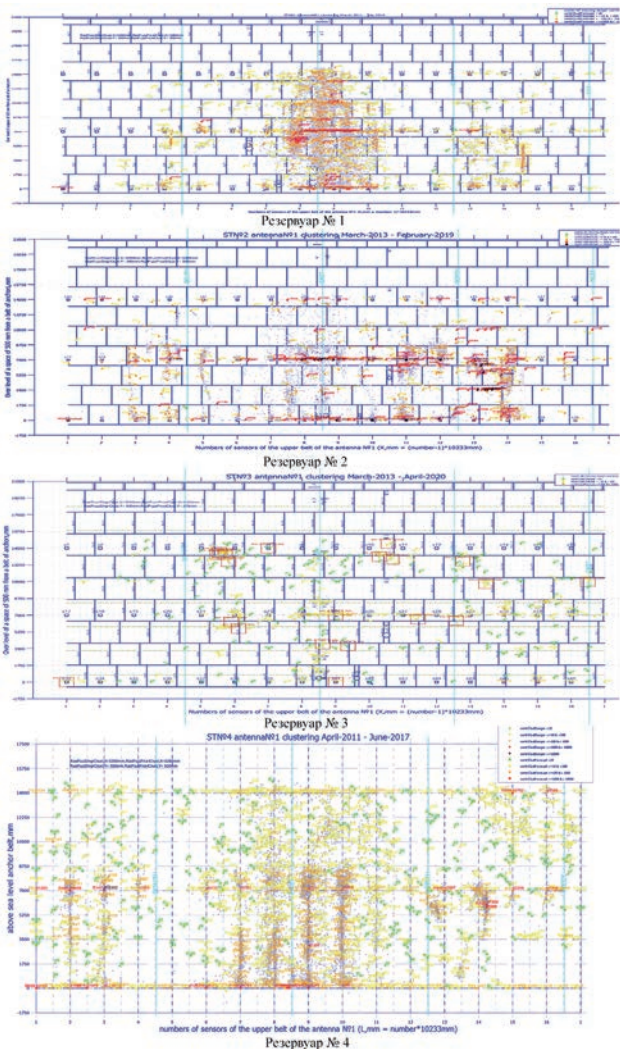


Рис. 8. Розподіл кластерів АЕ подій, для яких видавались попередження про небезпеку і прогнози руйнування, на розгортці обичайки резервуарів (сумарні дані за період 8 років спостереження)

будь-який період часу в процесі експлуатації. З урахуванням того, що крім акустичної інформації також записуються і технологічні параметри (рівень навантаження, вібраційні характеристики, напруження та ін.), це дає уявлення щодо процесів, що відбуваються у матеріалі конструкцій, і дозволяє контролювати режими експлуатації об'єктів. Результати АЕ моніторингу за ви-

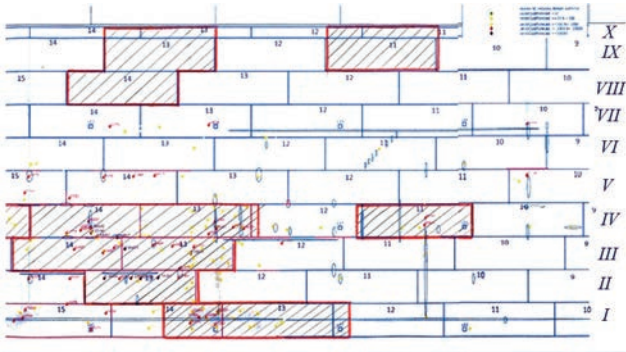


Рис. 9. Зони для проведення ДК при проведенні капітального ремонту

Таблиця 1. Координати місць підвищеної активності для проведення першочергового контролю об'єкту (радіус кластеризації – 1500 мм)

Номер з/п	X, мм	Y, мм
1	81937	7050
2	81776	91
3	61363	43
4	71610	40
5	20466	7057
6	92140	6970
7	51086	66
8	61362	7074
9	51134	7123
10	122796	7000
11	86774	11421
12	20466	14000
13	131750	8400

Таблиця 2. Місця для проведення додаткового контролю неруйнівними методами

Номер поясу	Номери листів
I	5, 6, 1, 13, 14
II	3, 4, 18, 13
III	5, 1, 2, 13, 14
IV	5, 18, 1, 13, 14, 15, 16, 11
V	4, 5
VI	3, 4, 5
VII	
VIII	4, 5, 14
IX	4, 5, 11, 13
X	4, 5, 11, 13

браний період часу автоматично оформлюються у вигляді протоколу згідно з вимогами нормативної документації (НД).

Для обробки даних, отриманих у режимі моніторингу, на основі XML технології створені спеціальні аналітичні програми, що дозволяють оцінити стан об'єкта контролю протягом тривалого часу. Вони дозволяють простежити зміну основних параметрів об'єкта в процесі тривалої експлуатації, оцінити найбільш небезпечні ділянки і сформувати довгостроковий прогноз на майбутнє. Збереження статистики у форматі XML дозволяє вести стандартизований обмін даними XML через Інтернет, переглядати та аналізувати їх.

Перед проведенням капітального ремонту резервуарів було проаналізовано результати АЕ моніторингу за декілька років спостереження, які вибірково представлені на рис. 5, 6.

З огляду на те, що системи безперервного моніторингу працюють тривалий час, періодично генеруючи попередження про небезпеку, актуальним є вивчення тенденцій виникнення небезпечних ситуацій [6]. Це дозволяє зіставити генерацію певного попередження або їх групи з технологічними процесами, параметрами навантаження, кліматичними умовами і т.п.

Зафіксована на поточний період АЕ активність є періодичною, що свідчить про повільний поступовий розвиток пошкодженості в різних частинах резервуарів, який відбувається періодично, відповідно до умов навантаження, що постійно змінюються. Узагальнений аналіз показників АЕ параметрів та індикаторів безпеки дозволяють стверджувати, що на даний момент накопичені пошкодження не досягли критичного характеру, який би становив суттєву загрозу для матеріалу корпусів резервуарів.

Тим не менш, слід відзначити періодичне виникнення ситуацій, коли генерувалися попередження 2-3 рівнів небезпеки. Оскільки дані попередження після їх генерації не мали продовження протягом наступного часу вимірів, їх виникнення не потребувало втручання у технологічний процес та зменшення рівня наливів.

Важливим є вивчення статистичної інформації щодо ділянок об'єктів контролю, на яких зареєстрована значна акустична активність (рис. 7).

Проведений аналіз отриманих даних АЕ моніторингу за тривалий період спостереження дозволив скласти детальні карти об'єктів АЕ моніторингу із зазначенням місць, що повинні бути перевірені іншими методами неруйнівного контролю при проведенні капітального ремонту (рис. 8). Координати цих місць також надаються у вигляді таблиць з прив'язкою до координатної сітки або, що є більш інформативним, прив'язуються до виробничих креслень об'єктів (табл. 1, 2). Слід зазначити, що ПЗ систем сімейства ЕМА дозволяє проводити обробку отриманої інформації як з використанням стандартних пакетів, так і створювати інші додаткові варіанти обробки і представлення інформації.

Нижче наведені узагальнені дані щодо місць виникнення підвищеної АЕ активності для чотирьох резервуарів за тривалий період спостереження (рис. 8).

На рис. 9 показані окремі рекомендовані для проведення додаткового контролю (ДК) місця.

На підставі виданих рекомендацій за даними АЕ моніторингу проведено ДК резервуару (вибіркові результати наведені на рис. 10).

Підвищення інформативності безперервного АЕ моніторингу досягається низкою органі-

заційних, апаратних і програмних засобів, до яких відносяться: поступовий перехід до використання приладів новішого покоління (наприклад, заміна систем ЕМА-3 системами ЕМА-4); удосконалення та розширення можливостей ПЗ безперервного АЕ моніторингу; принципова можливість розширення числа вимірюваних АЕ і технологічних каналів, що реалізується апаратним і програмним способами; розширення можливостей аналізу отриманих даних; розширення засобів візуального відображення об'єкта і результатів моніторингу; включення програмних засобів статистичного аналізу попереджень про небезпеку і місць виникнення підвищеної АЕ активності за обраний період.

Таким чином, системи АЕ моніторингу промислових об'єктів дозволяють оцінювати поточний технічний стан об'єктів в реальному часі з класифікацією зон підвищеної АЕ активності відповідно до вимог НД [7, 8] і вбудованого алгоритму оцінки з наданням та подальшою обробкою відповідного попередження про небезпеку, що, в свою чергу, дозволяє значно скоротити час і ресурси при проведенні ремонтних робіт. Результати АЕ моніторингу враховуються при оцінці терміну і режимів подальшої експлуатації промислових об'єктів, що підвищує надійність їх експлуатації і оптимізує режими експлуатації.

Висновки

Системи АЕ моніторингу резервуарів дозволяють оцінювати поточний технічний стан об'єктів в реальному часі з класифікацією зон підвищеної АЕ активності відповідно до вимог НД і вбудованого алгоритму оцінки з наданням відповідного попередження про небезпеку.

Проведення АЕ моніторингу небезпечних об'єктів дозволило скоротити час і ресурси при проведенні експертного обстеження і ремонтних робіт.

Результати АЕ моніторингу враховуються уповноваженою експертною організацією при оцінці терміну і режимів подальшої експлуатації об'єктів АЕ моніторингу.

Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: монография*. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
2. Шаталов А.А., Разуваев И.В., Костюков В.Н. (2003) Опыт реализации стратегии обеспечения безопасности нефтехимических производств при их эксплуатации по фактическому техническому состоянию. *Химическая техника*, 3, 11–13.
3. ASTM E 1139-07 *Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries*.
4. (2017) *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідковий посіб.* У 8 т. Назарчук З.Т. (ред.). Т.5: Акустичні методи контролю деградації матеріалів і дефектності елементів конструкцій. Львів, Простір-М.
5. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2014) Об управлении безопасностью эксплуатации оборудования, несущего рабочую нагрузку. *Непрерывный*

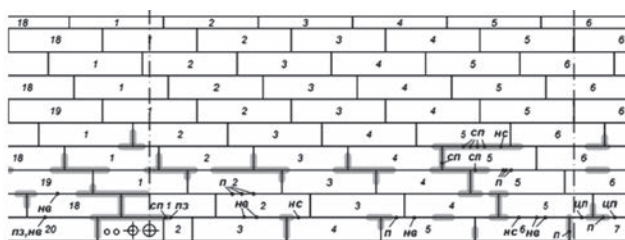


Рис. 10. Результати ДК РВС (фрагмент): п – пора; сп – скупчення пор; цп – ланцюжок пор; пз – підріз; нс – несплавленість; нв – наплив

- акустико-эмиссионный мониторинг. *Хімічна промисловість України*, **1**, 10–21.
6. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 3–18.
 7. (2003) ДСТУ 4227-2003 *Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки*. Держстандарт України.
 8. (2012) СОУ 50.10–2012 *Настанови щодо проектування та впровадження систем акустико-емісійного контролю, діагностування та моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки*. Київ, ТК-78 «ТДНК».
 - chemical productions in their operation by actual technical state. *Khimicheskaya Tekhnika*, **3**, 11–13 [in Russian].
 3. ASTM E 1139-07 Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries.
 4. (2017) *Technical diagnostics of materials and structures: Refer. book. In: 8 vol. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Vol.5: Acoustic methods of control of material degradation and defectiveness of structural elements*. Lviv, Prostir [in Ukrainian].
 5. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2014) On control of safe operation of equipment under working load. Continuous acoustic emission monitoring. *Khimichna Promyslovist Ukrainy*, **1**, 10–21 [in Russian].
 6. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Smart technologies for evaluation of structure state (AE technologies and new generation control equipment on its basis). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3–18 [in Russian].
 7. (2003) DSTU 4227-2003: *Guidelines on conducting acoustic emission diagnostics of higher hazard facilities*. Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
 8. (2012) SOU 50.10–2012: *Recommendations on design and implementation of acoustic emission systems of control, diagnostics and monitoring of higher risk facilities*. Kyiv, TK-78 TDNK [in Ukrainian].

References

INTEGRATION OF AE METHOD INTO THE TECHNOLOGY OF REPAIR AND EXTENSION OF LIFE OF METAL STRUCTURES

A.Ya. Nedoseka¹, S.A. Nedoseka¹, M.A. Yaremenko¹, M.A. Ovsienko¹, O.K. Savchenko², S.G. Epov²

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

²PJSC «Odessa Port Plant». 3 Zavodskaya str., 65481, Yuzhne, Odessa reg. E-mail: office@opz.odessa.ua

The issue of evaluation of the current state of various-purpose industrial facilities and operating conditions, in particular tanks – storages for oil, liquefied gas, liquid ammonia, etc., is becoming ever more urgent. It is proposed to apply for diagnostics of critical facilities the AE technology of monitoring higher acoustic activity in the structure material with subsequent assessment (classification) of the state of the facility using the traditional methods. The paper gives the results of analysis of the data of AE systems for monitoring the tanks and their application for determination of priority areas for additional control during performance of engineering inspection and repair operations. Ref. 8. Tabl. 2, Fig. 10.

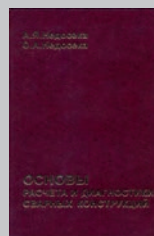
Key words: *acoustic emission (AE), AE activity, AE monitoring, loading, actual state of tested facility*

Надійшла до редакції 03.02.2021

Нові книги

Недосека А.Я., Недосека С.А. **Основы расчета и диагностики сварных конструкций**. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, – 2020. – 886 с.

Изложены основные проблемы, связанные с обеспечением безопасности эксплуатации конструкций и сооружений, возникающие при расчете их прочности, при испытаниях и в процессе эксплуатации. Большое внимание уделено теории, методам и средствам диагностики и оценки состояния материала конструкций, его остаточному ресурсу. Изложены основные вопросы теории прогнозирования и принятия решений при оценке состояния конструкций. Освещены современные методы расчета и измерения температурных полей, напряжений и деформаций, показаны способы борьбы с вредными последствиями сварочных напряжений и деформаций, рассмотрены основы классической и квантовой механики разрушения. Предназначена для студентов, аспирантов и преподавателей машиностроительных специальностей вузов, для специалистов, проходящих переподготовку на курсах повышения квалификации по направлению «Техническая диагностика», а также для инженеров предприятий и организаций, занимающихся контролем и диагностикой конструкций.



Мордюк Б.М., Прокопенко Г.І., Волошко С.М., Соловей С.О., Клочков І.М., Линник Г.О., Красовський Т.А., Високолян М.В. / Под ред. Г.І. Прокопенка. **Ультрозвукова ударна обробка конструкцій і споруд транспортного машинобудування**. Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, – 2020. – 310 с. У монографії узагальнено результати багаторічних експериментальних досліджень фізичних основ ультразвукової ударної обробки (УЗУО) поверхні конструкційних матеріалів переважно на основі заліза та алюмінію, а також практичного використання цієї технології для зміцнення зварних з'єднань різноманітних конструкцій і споруд на підприємствах вагонобудівної та інших галузей промисловості України. Досліджено структурно-фазові перетворення у поверхневих шарах сталей та алюмінієвих сплавів під час УЗУО; обґрунтовано ефективність застосування УЗУО для підвищення циклічної довговічності зварних з'єднань конструкцій і споруд, які експлуатуються в умовах циклічного навантаження і дії навколишнього середовища. Для наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються дослідженнями, проектуванням, виготовленням і експлуатацією виробів, конструкцій і споруд, які піддаються дії періодичних або випадкових динамічних навантажень та призводять до деградації матеріалу і втомного руйнування. Може бути корисною для аспірантів і студентів ЗВО будівного та машинобудівного профілю.



ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ ГУСЕНИЧНИХ ТРАКІВ ПРИ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАННЯ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

О.П. Гопкало¹, М.П. Земцов¹, О.Є. Гопкало¹, В.Є. Бодунов¹, Г.Я. Безлюдько², Р.М. Соломаха²

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимирязєвська, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

²ТОВ «Спеціальні наукові розробки». 61184, м. Харків, а/с 12036

Отримані експериментальні результати випробувань гусеничних траків із аустенітної сталі типу Гадфільда на 4-х точковий згин підтвердили можливість застосування неруйнівного коерцитиметричного контролю для оцінки рівня навантаженості металу, який характеризує ступінь отриманих при цьому пошкоджень, за результатами вимірювання коерцитивної сили (H_c). Завдяки ефекту різкої зміни значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності, яким відповідають порогові значення H_c переходу від пружного до пластичного деформування, зникає необхідність у визначенні механічних характеристик міцності та пластичності металу, оскільки діагностування відносної навантаженості проводиться відносно умовної межі плинності. Проведено орієнтовну оцінку рівня навантаженості металу траків з використанням відомої залежності значень коерцитивної сили від напружень для аустенітної сталі AISI 304 та аналогічної гіпотетичної залежності для дослідженої сталі. Встановлено, що кожному етапу навантаження на 4-х точковий згин відповідає визначений рівень відносних напружень, які характеризують ступінь пошкодження металу. Максимальний рівень отриманих пошкоджень приблизно відповідає напруженням межі міцності металу. Отримані результати добре узгоджуються з даними металографічних досліджень. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: гусеничні траки, структуроскоп, коерцитивна сила, пошкодження, напруження

У опублікованих статтях [1–6] були розглянуті особливості діагностування рівня отриманих пошкоджень за результатами вимірювання коерцитивної сили при механічному навантаженні у парамагнітній аустенітній сталі AISI 304 та у декількох феромагнітних сталях, які відрізняються фізичною природою реагування H_c на дані навантаження. Проведеними раніше експериментальними дослідженнями [6] були встановлені суттєві відмінності реагування коерцитивної сили на механічні навантаження феромагнітних та парамагнітних сталей. Так для феромагнітних сталей зміни значень коерцитивної сили при статичному та циклічному деформуванні пов'язані з упорядкуванням орієнтації доменної структури металу (від хаотичної до направленої). Для аустенітних парамагнітних сталей поява та зміни значень коерцитивної сили при статичному та циклічному деформуванні пов'язані з іншим фізичним явищем, а саме незворотними структурними перетвореннями вихідного аустеніту в деформаційний мартенсит, що викликає зміну магнітних властивостей металу від парамагнітного до феромагнітного. Внаслідок незворотних структурних перетворень, викликаних деформуванням, значення коерцитивної сили зберігаються у розвантаженому стані.

У даній роботі розглянуті питання діагностування рівня отриманих пошкоджень у конструктивних елементах (гусеничних траках) із аустеніт-

ної сталі типу Гадфільда (за ГОСТ 21357-87 вони маркуються як 110Г13Л) при їх навантаженні на 4-х точковий згин. Оскільки сталі даного типу є унікальними за механічними властивостями і суттєво відрізняються від інших, застосування коерцитиметричного контролю для оцінки отриманих пошкоджень при механічному навантаженні виробів є достатньо актуальним. Ця високопластична сталь з високим вмістом марганцю винайдена металургом Робертом Гадфільдом у 1882 р. Масава доля елементів цієї високомарганцевої сталі наступна, %: Fe – 82, Mn – 11,5...15, C – 0,9...1,6, Si – 0,3...1, інші складові – до 5. Такий хімічний склад та аустенітна структура сталі обумовлюють як підвищену схильність до зміцнення, так і високу пластичність при деформуванні. Механічні властивості сталі: $\sigma_{0,2} = 400$ МПа, $\sigma_b = 800$ МПа, $\delta_5 = 25$ %, $\Psi = 35$ %.

Головна властивість сталі була виявлена при холодній ковці – твердість значно зростала у місцях нанесення удару молотом. Причому, чим більша при ковці деформація, тим твердішим ставав метал. Так була отримана сталь з унікальною здатністю нагартування, значно вищою, ніж для звичайних сталей з такою ж твердістю. Нагартування сталі Гадфільда пов'язане з миттєвим переходом аустеніту у мартенсит, який створює при ударі значні зусилля та обумовлює значне підвищення температури. Оскільки застосування обробки механічним різанням для отримання ви-

Гопкало О.П. – <https://orcid.org/0000-0001-7799-3870>

О.П. Гопкало, М.П. Земцов, О.Є. Гопкало, В.Є. Бодунов, Г.Я. Безлюдько, Р.М. Соломаха

робів із сталі типу Гадфільда неможливе, деталі з цієї сталі виготовляють виключно методом лиття або електроерозійною обробкою. Щоб підвищити механічні властивості та покращити структуру сталі, її піддають спеціальній термічній обробці – «аустенізації», яка полягає в нагріві до температури 1050...1100 °С для того, щоб в аустеніті розчинити карбіди, сульфіді, нітриди заліза та марганцю. Потім цю структуру фіксують, охолоджуючи у холодній проточній воді, температура якої не перевищує 30 °С в процесі усієї термічної обробки.

Через свої незвичайні властивості зі сталі типу Гадфільда виготовляють частини механізмів, рейкові хрестовини, стрілочні переводи, сердечники для прокатки труб, гусеничні траки, броньові листи, деталі дробарок, козирки землечерпальних машин та всі пристрої, де потрібна особлива стійкість до зношування при високому тиску, ударних навантажень та стирання. У 20-х р. 20 ст. з неї почали виготовляти траки для танків, які піддаються найбільшому впливу стирання при пересуванні важких машин. Виготовлення з цієї сталі траків дозволило збільшити пробіг техніки без ремонту гусениць або їх заміни майже в 10 разів (з 500 км до 4800 км).

У зв'язку з відсутністю даних про реагування коерцитивної сили на механічні навантаження конструктивних елементів, виготовлених зі сталі типу Гадфільда із унікальними механічними властивостями, були проведені відповідні експериментальні дослідження.

Мета роботи полягає в експериментальній перевірці можливості діагностування отриманих пошкоджень в металі гусеничних траків, виготовлених із сталі типу Гадфільда (на далі типу Г13ЛА), в процесі випробувань на 4-х точковий згин шляхом використання одного із методів неруйнівного контролю – інструментального вимірювання змін значень коерцитивної сили при навантаженні. Дослідженню підлягали експериментальні зразки траків.

Методика експериментальних досліджень. Випробування траків у вихідному стані на 4-х точковий статичний згин проводили на розривній машині ZD-40 згідно стандарту 613.TY3 «Технические условия на изготовление отливок из стали марки Г13ЛА». Навантаження проводили як у площині траку, так і по дотичній до неї

згідно схем на рис. 1. Перше навантаження зусиллям $P_1 = 300$ кН проводили у площині траку (рис. 1, а). Якщо після такого навантаження ознак втрати суцільності металу (появи тріщин) не виявлено, незважаючи на наявність залишкових деформацій, то трак навантажували зусиллям $P_2 = -300$ кН (у протилежному напрямку прикладання зусиль відносно першого навантаження (рис. 1, б)). Наступне навантаження на зріз при 4-х точковому прикладанні зусиль після попередніх навантажень проводили по дотичній до площини траку зусиллям $P_3 = 240$ кН (рис. 1, в).

В умовах експлуатації на трак діють зусилля від катків, які урівноважуються тиском ґрунту. У даному випадку схема навантаження траку відповідає 4-х точковому згину. При експлуатації відбувається деформування та нагартування поверхневих шарів металу, у тому числі від контактних напружень, включаючи тяговий гребінь траку, на який передаються зусилля провідної шестерні приводу та бокові зусилля від катків підвіски. При випробуваннях на згин має місце неоднорідний напружено-деформований стан виробу і найбільш деформованими є поверхневі шари металу.

Вимірювання значень коерцитивної сили на поверхні траків у характерних точках проводили структуроскопом КРМ-Ц-К2М (розробник ТОВ «Спеціальні наукові розробки», м. Харків). Оскільки для зменшення ваги траки мають внутрішню порожнину (при товщині металу 4-5 мм), складну геометрію поверхні та можливість нагартування поверхневих шарів металу в умовах експлуатації, то для вимірювання значень коерцитивної сили використовували малогабаритний датчик (D12), який має базу вимірювання 12×12 мм та глибину намагнічування до 1 мм. Використання такого датчика дозволяє проводити вимірювання значень коерцитивної сили в дуже обмежених локальних ділянках траку, який має достатньо складну геометрію поверхні. Вимірювання значень коерцитивної сили полягає в попередньому намагнічуванні металу до насичення з наступним повним розмагнічуванням і подальшим намагнічуванням магнітним полем протилежної полярності для нейтралізації залишкового магнетизму та вимірювання значень H_c . Тривалість циклу визначення значень коерцитивної сили складає 10 с. Слід зазначити, що при наявності анізотропії структури металу, у тому числі після пластичного



Рис. 1. Загальний вигляд траку та схема його навантаження

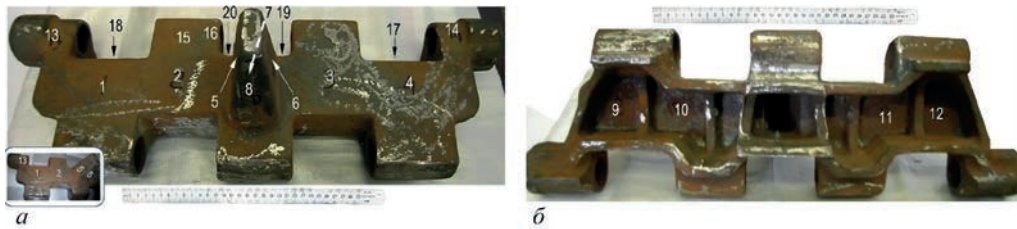


Рис. 2. Загальний вигляд тракту, де зазначені номери точок для вимірювання значень коерцитивної сили: *а* – площа тракту зі сторони гребня; *б* – площа тракту з протилежної сторони від гребня

деформування, зміна орієнтації полюсів магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні впливає на вимірювану величину коерцитивної сили. Оскільки величина коерцитивної сили залежить від напрямку орієнтації полюсів магнітів датчика відносно поверхні металу, вимірювання значень H_c проводили у двох взаємно перпендикулярних напрямках: $H_{c\parallel}$ – поперек тракту (вздовж гусениці) та $H_{c\perp}$ – вздовж тракту (поперек гусениці).

Вимірювання значень коерцитивної сили структуроскопом не потребує будь-якої підготовки досліджуваної поверхні. Наприклад, при використанні датчика D65 (база вимірювання 65 мм та глибина намагнічування до 30 мм) допускається загальна товщина лакофарбових та захисних покриттів до 6 мм.

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз. Випробуванню на 4-х точковий згин підлягали два траки № 7 та № 8 однієї плавки. На рис. 2 приведено загальний вигляд тракту до випробувань та зазначені номери точок для вимірювання значень коерцитивної сили.

На відміну від аустенітної сталі AISI 304, яка у вихідному стані не проявляє магнітних властивостей ($H_c = 0$), проведені дослідження траків зі сталі типу Г13ЛІА показали, що метал проявляє магнітні властивості у вихідному стані (без навантаження) і достатньо високі значення коерцитивної сили у різних точках поверхні. На рис. 3 приведені епюри в абсолютних значеннях коерцитивної сили в різних точках вимірювання H_c траків № 7 та № 8 у вихідному стані (у стані поставки, $P = 0$) та після випробувань (P_1 , P_2 та P_3) на 4-х точковий згин.

Суттєві відмінності розподілу значень коерцитивної сили по поверхні литого тракту у вихідному стані у межах 16...60 та 14...40 А/см для траків № 7 та № 8 відповідно вказують на неоднорідність його структурного стану. Слід зазначити, що на розкид значень коерцитивної сили по поверхні литого тракту при такому неоднорідному структурному стані впливає, в першу чергу, точність позиціонування датчика при кожному вимірюванні H_c , вплив геометрії поверхні литої структури металу, при даних габаритах датчика 12×12 мм з глибиною намагнічування до 1 мм. Для виробів, отриманих шляхом лиття, характерна суттєва неоднорід-

ність його структурного стану, який покращують наступною термомеханічною обробкою. Найбільш гомогенними вважаються ковани вироби.

Для литої структури металу траків у вихідному стані максимальні відмінності значень коерцитивної сили в двох взаємно перпендикулярних напрямках складають 28 %. Значення коерцитивної сили в різних точках вимірювання на поверхні траків відрізняються у 3,75 рази. Дана обставина вказує на суттєві відмінності структурного стану металу як на різних ділянках траків, так і в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Наприклад, для металу прокату максимальні відмінності значень коерцитивної сили в двох взаємно перпендикулярних напрямках можуть складати до 10 %. Деякі відмінності характеру розподілу значень коерцитивної сили по ширині порожнистого тракту ймовірно пов'язані зі складною геометрією форми тракту (можливо, різною товщиною стінки). При глибині намагнічування металу тракту датчиком D12 в 1 мм наявність пошкоджень металу у вигляді слідів від наждачного каменю зачистки поверхні тракту та нерівності литої структури металу теж впливають на значення коерцитивної сили. Отримані результати дають підстави застосовувати для подібних досліджень більш потужний датчик D27 з базою вимірювання 22×27 мм та глибиною намагнічування до 4 мм, що дозволить отримувати інтегральні значення коерцитивної сили із значно більшого об'єму деформованого металу, тим самим зменшуючи розкид значень вимірів коерцитивної сили та підвищуючи достовірність отриманих результатів. Слід зазначити, що використання для повторного вимірювання значень коерцитивної сили на поверхні тракту № 8 структуроскопу з датчиком D27, який має базу 27 мм з глибиною намагнічування до 4-х мм, зменшує розкид даних при багаторазових вимірах, причому ці дані мало відрізняються від тих, що отримані при використанні датчика D12 з базою 12 мм та глибиною намагнічування до 1 мм.

На рис. 4 приведені відносні значення коерцитивної сили в досліджених зонах після навантаження зусиллями P_1 , P_2 та P_3 на 4-х точковий згин траків № 7 (*а*, *в*, *д*) та № 8 (*б*, *г*, *е*). Характер розподілу відносних значень коерцитивної сили по ширині тракту нагадує епюру моментів при навантаженні на 4-х точковий («чистий») згин.

На рис. 5 приведені епюри у відносних значеннях коерцитивної сили по поверхні траків № 7 (а) та № 8 (б) при навантаженні на 4-х точковий згин зусиллям P1, P2 та P3. Розподіл відносних значень коерцитивної сили по довжині траку знаходиться у повній відповідності з навантаженням на 4-х точковий згин (див. рис. 4). Точкам прикладання зусиль відповідають великі значення коерцитивної сили.

Окремо слід відзначити участь конструктивного елемента тягового гребня в точках вимірювання 5, 6, 7, 8 траків у сприйманні зусиль P1, P2 та P3. На рис. 6 приведені епюри в абсолютних значеннях коерцитивної сили по поверхні тягового гребня в точках вимірювання траків № 7 (а, в, д, ж) та № 8 (б, г, е, з) у вихідному стані (а, б) та після навантаження зусиллями P1 (в, г), P2 (д, е) та P3 (ж, з) на 4-х точковий згин.

На рис. 7 приведені закономірності реагування коерцитивної сили на навантаження зусиллями P1, P2, P3 металу тягового гребня в точках вимірювання траків № 7 (а) та № 8 (б). Аналіз даних свідчить про те, що кожне наступне навантаження змінює значення H_c , яке відображає відносне навантаження металу в найбільш навантажених точках тягового гребня траків.

Аналіз результатів вимірювання значень коерцитивної сили в досліджених точках траків при розглянутих навантаженнях показав, що тяговий гребінь теж сприймає вагому частину навантажень. Про це свідчать високі значення коерцитивної сили, особливо в зоні точки 7, які сумірні з аналогічними величинами в інших розглянутих точках як у площині траку, так і в дотичній до неї. Так для траку № 7 в точці 7 тягового гребня максимальні значення коерцитивної сили на 17 % перевищують аналогічні величини у інших найбільш навантажених точках траку. А для траку № 8 у точці 7 тягового гребня максимальні значення коерцитивної сили складають тільки 85 % від аналогічних величин в інших точках траку.

Як зазначалось раніше [1, 2], для аустенітних сталей при будь-якому (статичному чи циклічному, у тому числі знакозмінному «м'якому», «жорсткому» та контактному) механічному навантаженні зростання значень коерцитивної сили пов'язане з перерозподілом співвідношення долі аустеніту та мартенситу в процесі деформування. Експериментально було встановлено, що трансформація аустеніту в деформаційний мартенсит при навантаженні починає відбуватися при перевищенні напружень межі витривалості і подальше підвищення яких викликає досить суттєве зростання значень коерцитивної сили аж до настання руйнування. На рис. 8, а приведена залежність значень коерцитивної сили від рівня діючих відносних напружень у зразку із сталі AISI 304 при

циклічному розтязі. Найбільш інтенсивне зростання значень коерцитивної сили відбувається при напруженнях, які перевищують умовну межу плинності. З отриманих даних випливає, що напруженням умовної межі плинності відповідають значення коерцитивної сили приблизно в 1 А/см. Тобто пружне деформування аустенітних сталей відбувається у діапазоні зміни значень коерцитивної сили 0...1 А/см. Подальше інтенсивне зростання значень коерцитивної сили пов'язане з суттєвим зростанням долі мартенситу в аустенітній сталі при пластичному деформуванні. Таким чином, при моніторингу коерцитиметричним контролем поверхні виробів із аустенітних сталей перевищення значень коерцитивної сили в 1 А/см відносно попередніх вимірів вказує на наявність ознак пластичного деформування. Слід звернути увагу, що для аустенітної сталі AISI 304 на ділянці зміцнення ($\sigma_b = 1,44\sigma_{0,2}$) відповідає певна траєкторія змін значень коерцитивної сили. Для сталі типу Г13ЛА на ділянці зміцнення ($\sigma_b = 2,0\sigma_{0,2}$) буде відповідати інша траєкторія змін значень коерцитивної сили, але порогові значення H_c переходу від пружного до пластичного деформування можуть відрізнитись не суттєво. Але оскільки співвідношення значень коерцитивної сили при пружному та пластичному деформуванні досить значні, то для приблизної оцінки технічного стану металу конструкцій із аустенітних сталей можна з певною похибкою приймати за порогові значення переходу від пружного до пластичного деформування значення $H_c = 1$ А/см. При оцінці технічного стану конструкцій із аустенітних сталей з використанням коерцитиметричного контролю завдяки ефекту різкої зміни значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності, яким відповідають порогові значення H_c , зникає необхідність у визначенні механічних характеристик міцності та пластичності металу, оскільки діагностування відносної навантаженості проводиться відносно умовної межі плинності.

Для діапазону малоциклової втоми, включаючи розтяг, для оцінки напружено-деформованого стану в розглянутих точках на поверхні траку необхідно мати діаграму розтягу із визначеними залежностями H_c від діючих напружень та отриманих при цьому деформацій. Оскільки для сталі типу Г13ЛА, з якої були виготовлені досліджувані траки, відсутні діаграми розтягу з залежностями H_c від напружень та відповідних деформацій, для прикладу в даній роботі для оцінки напружено-деформованого стану були використані діаграми розтягу для аустенітної сталі AISI 304 (див. рис. 8, а). Згідно з таким підходом для траку № 7 максимальні значення коерцитивної сили, наприклад, в точці 3 складали 14 А/см (див. рис. 4, а),

що відповідає згідно з діаграмою на рис. 8, а відносним напруженням $1,18 \sigma_i / \sigma_{0,2}$. Для трак № 8 максимальні значення коерцитивної сили в точці 20 складала 23,5 А/см (див. рис. 4, б), що від-

повідає згідно з діаграмою на рис. 8, а відносним напруженням $1,25 \sigma_i / \sigma_{0,2}$.

Якщо для сталі типу Г13ЛА побудувати гіпотетичну діаграму розтягу, базуючись на даних щодо

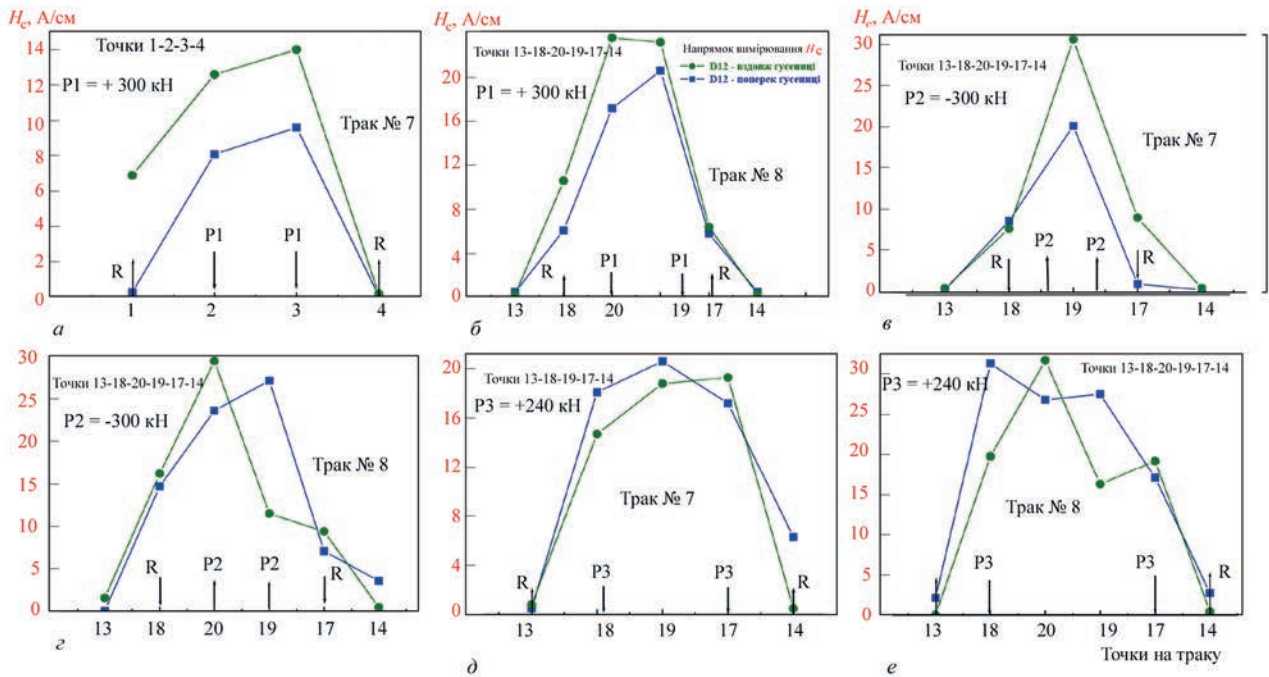


Рис. 4. Відносні значення коерцитивної сили у досліджених зонах після навантаження зусиллями P1, P2 та P3 на 4-х точковий згин траків № 7 (а, в, д) та № 8 (б, г, е)

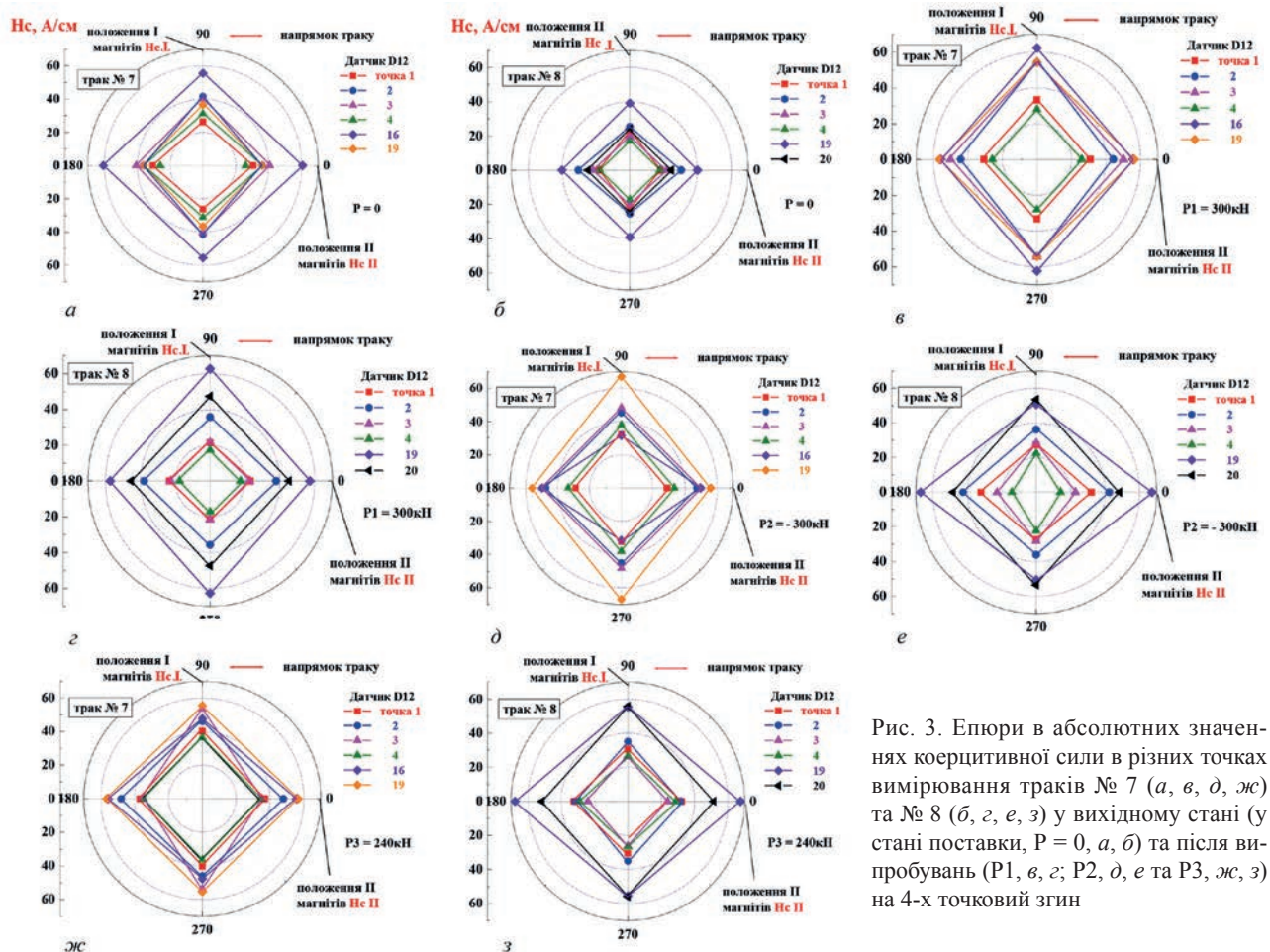


Рис. 3. Епюри в абсолютних значеннях коерцитивної сили в різних точках вимірювання траків № 7 (а, в, д, ж) та № 8 (б, г, е, з) у вихідному стані (у стані поставки, P = 0, а, б) та після випробувань (P1, в, г; P2, д, е та P3, ж, з) на 4-х точковий згин

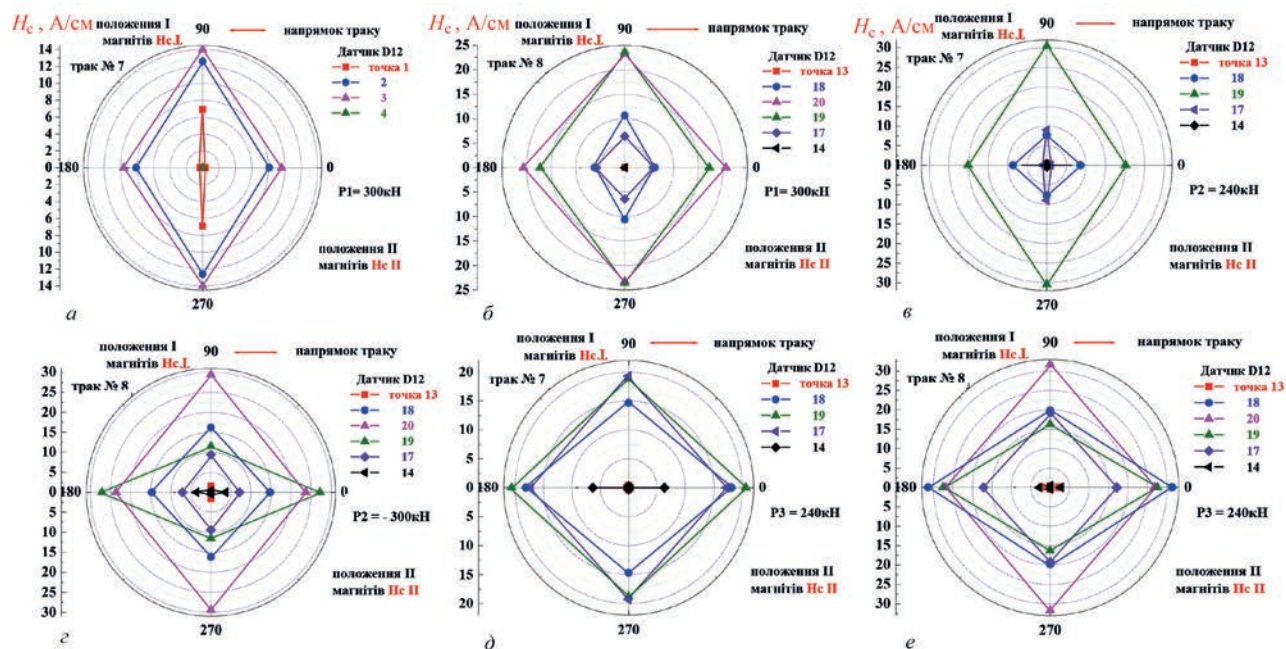


Рис. 5. Епюри у відносних значеннях коерцитивної сили по поверхні траків № 7 (а, в, д) та № 8 (б, г, е) після навантаження зусиллями P_1 , P_2 та P_3 на 4-х точковий згин

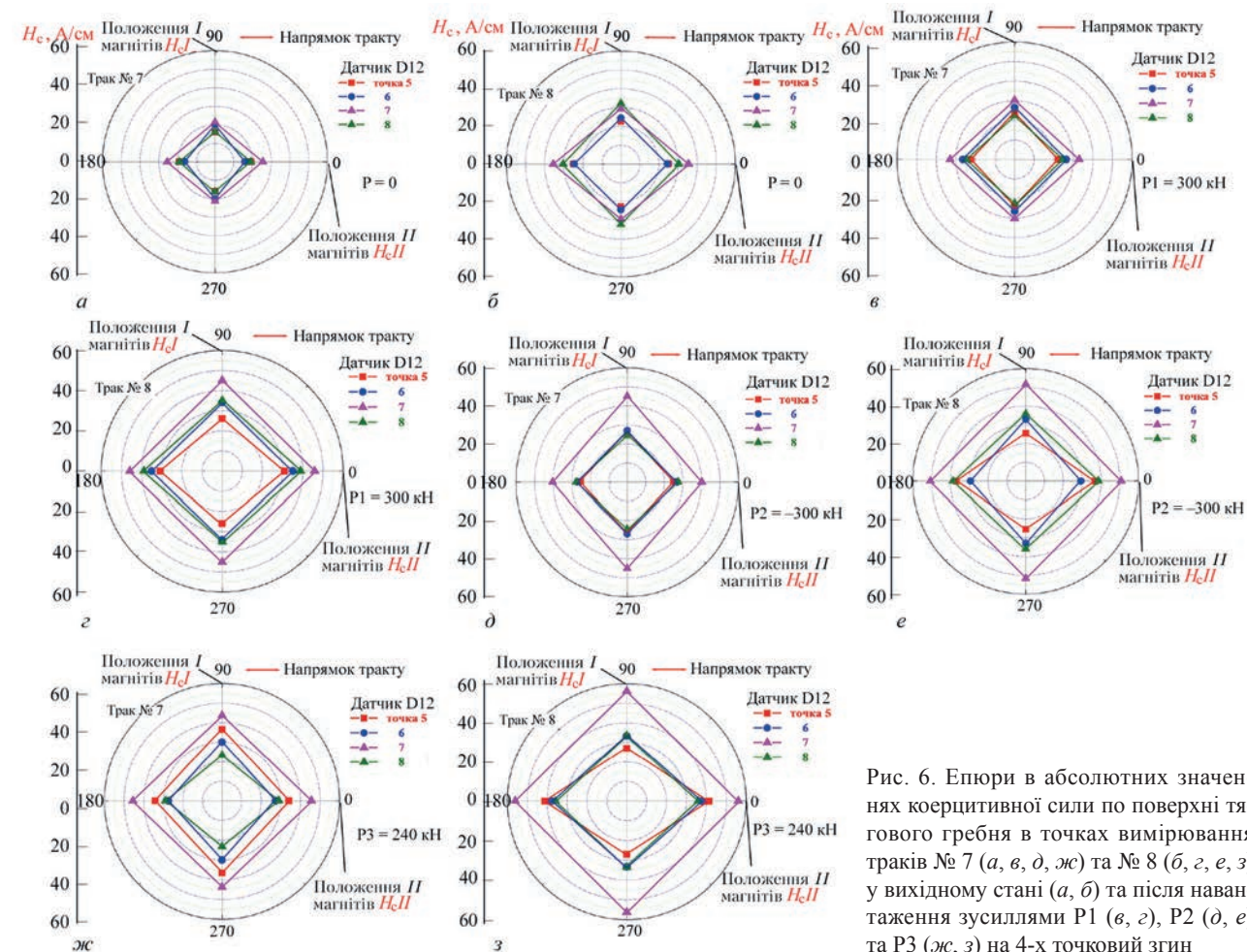


Рис. 6. Епюри в абсолютних значеннях коерцитивної сили по поверхні тягового гребня в точках вимірювання траків № 7 (а, в, д, ж) та № 8 (б, г, е, з) у вихідному стані (а, б) та після навантаження зусиллями P_1 (в, г), P_2 (д, е) та P_3 (ж, з) на 4-х точковий згин

механічних властивостей цієї сталі, відомих з літературних джерел, та при припущенні, що закономірності реагування коерцитивної сили на механічне навантаження аналогічні для аустенітної

сталі AISI 304, то діаграма матиме вигляд, представлений на рис. 8, б. Тоді, при використанні цієї гіпотетичної залежності, максимальним значенням коерцитивної сили 14 А/см в точці 3 траку №

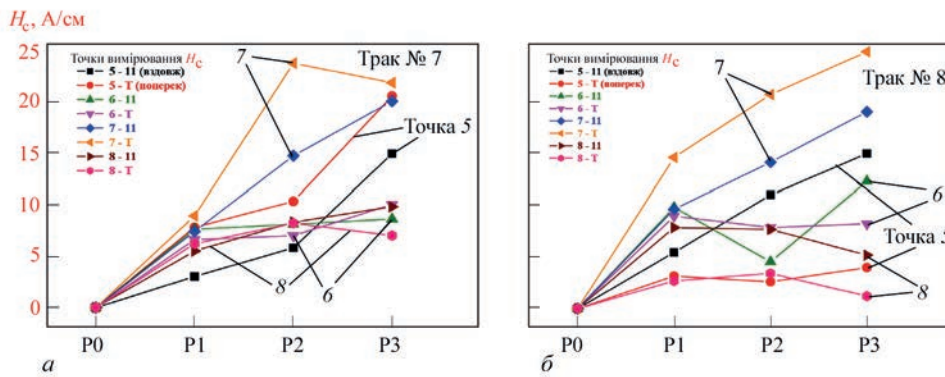


Рис. 7. Закономірності реагування коерцитивної сили на навантаження зусиллям P1, P2, P3 в точках вимірювання тягового гребня траків № 7 (а) та № 8 (б)

7 відповідатиме відносно напруження $1,45 \sigma_i / \sigma_{0,2}$. Для траку № 8 максимальні значення коерцитивної сили в точці 19 складали 23,5 A/cm, що відповідає відносним напруженням $1,71 \sigma_i / \sigma_{0,2}$. Але для більш точного визначення рівня діючих відносних напружень та величини накопиченої при цьому деформації необхідно провести випробування на розтяг та отримати відповідні залежності коерцитивної сили від даного навантаження.

Для оцінки отриманих в процесі експлуатації пошкоджень металу в найбільш навантажених ділянках виробів із аустенітних сталей можна скористатись розробленим раніше підходом [1, 2], згідно з яким при моніторингу структурного стану металу виробів для оцінки ступеня їх пошкодження слід звертати увагу не на максимальні значення коерцитивної сили, а на кінетику процесу. По мірі статичного або циклічного напручування залежність коерцитивної сили від накопичених пошкоджень має висхідні і низхідні ділянки. Ділянці зростання значень коерцитивної сили відповідає стадія зародження тріщин, а ділянці зниження їх значень – стадія розвитку тріщин внаслідок втрати суцільності металу при утворенні несучільностей (пор та тріщин). Таким чином, при моніторингу коерцитиметричним контролем кінетики процесу змін значень коерцитивної сили у найбільш навантажених ділянках конструкцій в умовах експлуатації можна визначати стадії накопичення пошкоджень з визначенням залишкового ресурсу.

Використання запропонованого підходу для умов малоциклового навантаження, включаючи статичний розтяг, дозволяє проводити оцінку рівня навантаженості та отриманих пошкоджень в будь-якій точці виробів шляхом вимірювання значень коерцитивної сили.

Для оцінки структурного стану металу двох гусеничних траків № 7 та № 8 після випробувань було проведено вирізку ідентичних фрагментів металу в найменш навантаженої зоні 13 (див. рис. 2, а) з подальшим металографічним дослідженням шліфів (надалі зразки № 7 та № 8).

Макро- та мікроструктурний аналіз поверхні досліджуваних зразків траків виявив як спільні, так і відмінні риси структури металу.

Для обох зразків навіть на макрорівні були виявлені різні за травимістю зони (зони А і Д на рис. 9), кожна з яких характеризується відповідною мікроструктурою з різним рівнем неоднорідності. Слід відмітити, що зональна неоднорідність зразків була виявлена спочатку травленням зразків в ніталі (4%-й розчин HNO_3 в етиловому спирті), коли протравилась тільки зона Д (на відміну від зони А), а після переполіровки зразків і травлення на структуру травником для аустенітних сталей («царська горілка» (HNO_3 (25 мл) : HCl (75 мл))) виявили структуру в обох зонах, але при цьому ступінь травимості зон значно відрізнялася (рис. 9).

Найбільш типові фрагменти мікроструктури зразків № 7 та № 8 представлені на рис. 10.

За результатами макро- та мікроструктурного аналізу можна відмітити головне – спільним для структури обох зразків є:

- наявність зональної неоднорідності, що виявляється хімічним травленням (зони А і Д) та характеризується різними мікроструктурами в відмічених зонах (рис. 9);

- наявність в приповерхневій зоні Д ознак мікропластичної деформації (рис. 10, в) та присутність (в початково аустенітних зернах) мартенситної фази (рис. 10, з-е), яка обумовлює виникнення феромагнітних властивостей в матеріалі траків;

- в цілому мікроструктура зразків представляє аустеніт, якщо не брати до уваги присутність в окремих аустенітних зернах мартенситу (в зоні Д).

Мікроструктура зразка №8 істотно відрізняється від мікроструктури зразка № 7 за такими параметрами:

- в зразку № 8, на відміну від зразка № 7, виявлено ділянки з мікропорами різної щільності (рис. 10, а, б) ливарного походження;

- макро- та мікроструктура зразка № 8, як в зоні Д, так і в зоні А більш гомогенна, за виключенням локальних ділянок з підвищеною пори-

стістю, яка ідентифікувалась на полірованій поверхні шліфа навіть без хімічного травлення (рис. 10, а);

– структура зразка № 8 характеризується, на відміну від зразка № 7, загально меншими розмірами аустенітних зерен (2-3 бал);

– в зразку № 8 лінії ковзання присутні і в окремих аустенітних зернах зони А на відміну від зразка № 7;

– в зразку № 8, як і в зразку № 7, присутні неметалеві включення, але, на відміну від зразка № 7, вони більші за розмірами і пріоритетно розміщені на границях аустенітних зерен;

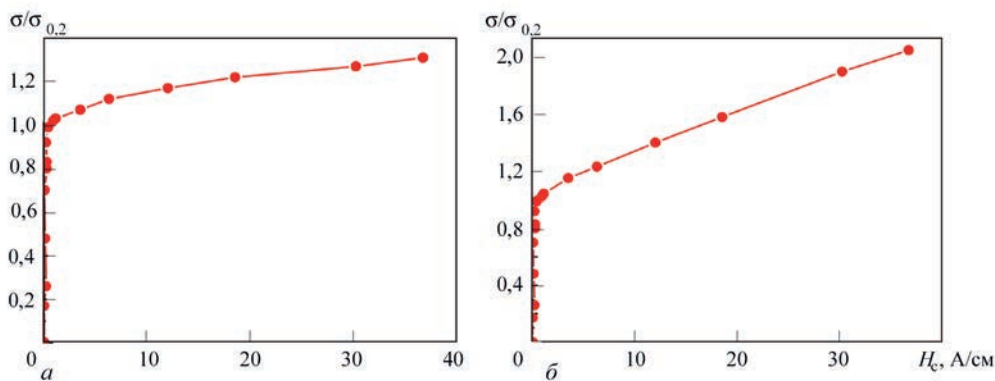


Рис. 8. Залежність значень коерцитивної сили від рівня діючих відносних напружень у зразку зі сталі AISI 304 (а) та гіпотетична діаграма розтягу для сталі типу Г13ЛА (б)

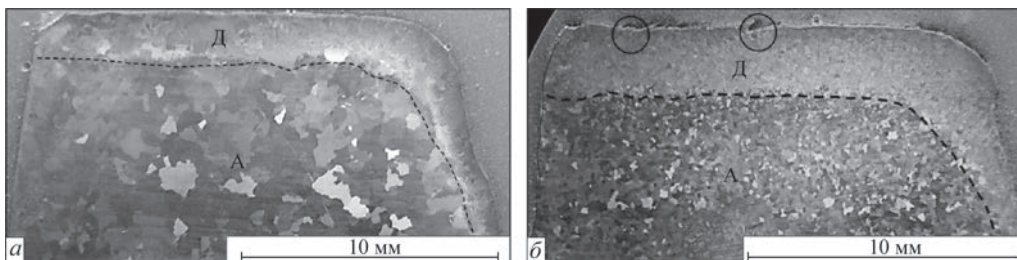


Рис. 9. Макроструктура зразків (в зоні 13) траків № 7 (а) та № 8 (б) після травлення у травнику «царська горілка»

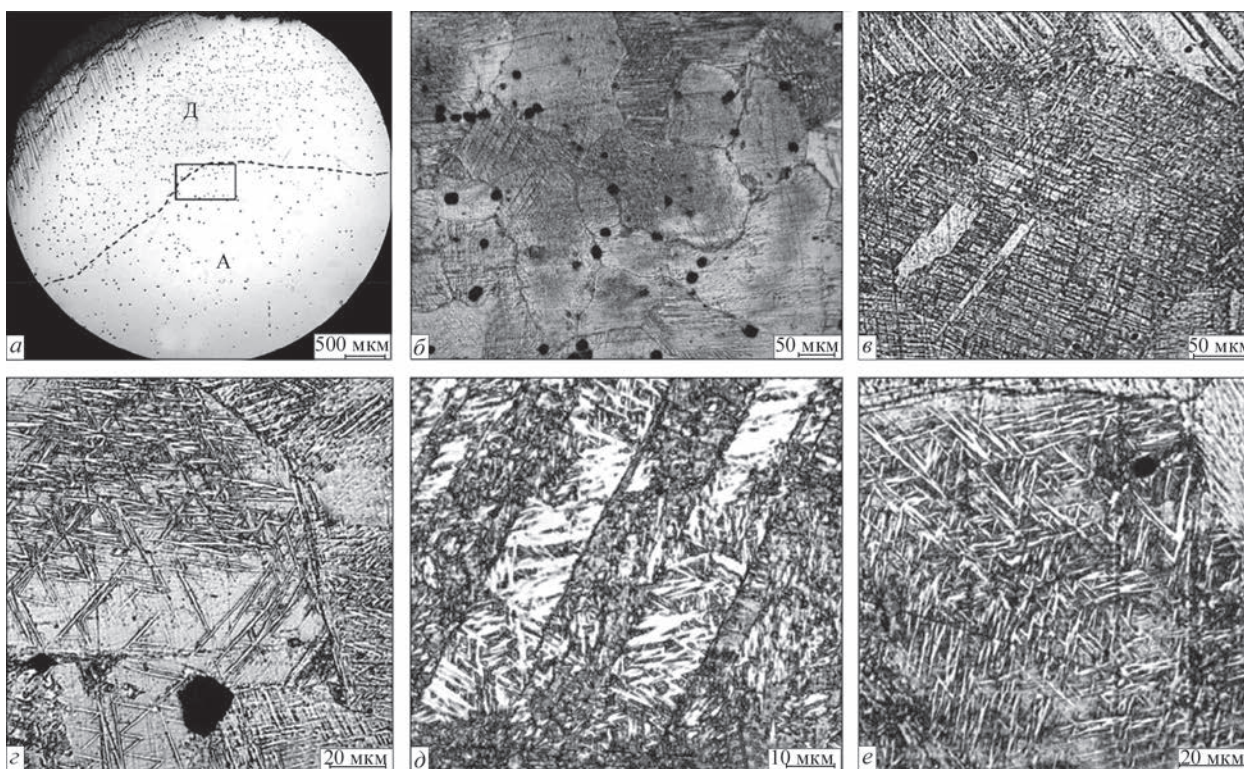


Рис. 10. Фрагменти мікроструктури зразків № 7 (е) та №8 (а–д): мікропори виявлені на нетравленій (а) та травленій на мікроструктуру (б) поверхні; лінії ковзання та двійники в аустенітних зернах (зона Д) (в); мартенсит в початково аустенітних зернах (з, е) та в двійникових пластинах (д)

Значення мікротвердості металу у досліджених зонах траків

Номер зразка	Мікротвердість, $HV_{0,1}$, кг/мм ²	
	зона А	зона Д
№ 7	200...270	400...550
№ 8	224...262	445...539

– в зразку № 8 аустеніт зеренної морфології та дендрити лиття відсутні на відміну від зразка № 7, де аустеніт характеризується зеренно-дендритною морфологією в зоні Д.

Проведені дюрOMETричні дослідження виявили суттєві відмінності значень мікротвердості у досліджених зонах А і Д металу обох траків, що опосередковано підтверджують появу феромагнітного мартенситу (див. таблицю) в зоні Д обох траків.

Таким чином, наявність магнітних властивостей металу обох траків обумовлена трансформацією частини зерен парамагнітного аустеніту в феромагнітний мартенсит. Відмінності в максимальних значеннях коерцитивної сили трака № 8 (40 А/см) та трака № 7 (60 А/см) можна пояснити частковою втратою суцільності металу траку № 8 у вигляді пор ливарного походження, що суттєво знижує максимальні значення коерцитивної сили [1, 2] на відміну від металу траку № 7, де пори не виявлено.

Порівняння структурного стану металу, оціненого величиною коерцитивної сили, еталонного траку № 1 та досліджених № 7 та № 8 показали суттєві відмінності значень H_c . Так у найменш навантажених зонах обох траків у вихідному стані мінімальні значення коерцитивної сили складали приблизно 17,0 А/см. Тоді як у еталонному траку навіть після випробувань значення коерцитивної сили у цих зонах знаходились в межах 1,0 А/см. Низьким значенням коерцитивної сили відповідає малий вміст мартенситу в аустенітній сталі. Дана обставина може стати обґрунтуванням запровадження коерцитиметричного контролю якості термічної обробки виробів в процесі їх «аустенізації» шляхом оцінки структурного стану металу за результатами вимірів коерцитивної сили. В умовах експлуатації застосування коерцитиметричного моніторингу поверхні таких виробів дозволить контролювати їх технічний стан та оцінювати залишковий ресурс.

Висновки

Приведено приклад діагностування неруйнівним методом контролю рівня навантаженості та отриманих пошкоджень за вимірами коерцитивної сили у розглянутих точках гусеничних траків із сталі типу Г13ЛА при їх випробуваннях на 4-х точковий згин.

Характер розподілу відносних значень коерцитивної сили по поверхні траків після навантаження знаходиться у повній відповідності з при-

кладеними зусиллями при випробуваннях та параметром відносного навантаження, який характеризує величини отриманих пошкоджень в досліджених точках.

Аналіз результатів вимірювання значень коерцитивної сили в досліджених точках траків при розглянутих навантаженнях показав, що тяговий гребінь теж сприймає вагому частину навантажень.

Для діапазону малоциклової втоми, включаючи статичний розтяг, для оцінки напружено-деформованого стану найбільш навантажених ділянок виробів шляхом вимірювання значень коерцитивної сили необхідно провести випробування на розтяг лабораторних зразків з визначенням інструментальним методом залежності H_c від діючих напружень та отриманих при цьому деформацій.

Оскільки вироби зі сталі типу Г13ЛА підлягають спеціальній термічній обробці («аустенізації») для розчинення в аустеніті карбідів, сульфідів, нітридів заліза та марганцю, використання дуже простого неруйнівного методу коерцитиметричного контролю дозволить проводити оцінку якості їх структурного стану. Тобто, запровадження коерцитиметричного контролю дозволить контролювати наявність мартенситу і пор у відливках та якість термічної обробки. Шляхом коерцитиметричного моніторингу поверхні виробів в умовах експлуатації з'являється можливість контролювати їх технічний стан та оцінювати залишковий ресурс.

Металографічними дослідженнями встановлено зв'язок особливостей структури металу досліджених траків як з виникненням феромагнітних властивостей, так і зі зміною абсолютних значень коерцитивної сили.

Список літератури

1. 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. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 4, 12–24.
2. Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiy, V. et al. (2020) Damage evaluation for AISI 304 steel under cyclic loading based on coercive force measurements. *Int. J. Fatigue*, 139.
3. Гопкало А.П., Безлюдько Г.Я., Нехотящий В.А. (2017) К экспертной оценке поврежденности стали AISI 304 при статическом и циклическом нагружении по измерениям коэрцитивной силы. *В мире неразрушающего контроля*, 20, 45–51.
4. Гопкало О.П., Безлюдько Г.Я., Котляренко А.А. та ін. (2020) Діагностування пошкодженості феромагнітних сталей при механічному навантаженні за результатами вимірювання коерцитивної сили. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 2, 13–21.
5. Юхимець П.С., Гопкало О.П., Безлюдько Г.Я. та ін. (2020) Із досвіду використання неруйнівних методів контролю для оцінки технічного стану аварійної ділянки трубопроводу. *Там само*, 3.
6. Gopkalo O., Bezlyudko G., Nekhotiashchiy V. (2018) Evaluation of the structures metal damage under the static and cyclic loadings according to the coercive force value. *Scientific Journal of TNTU. Tern., TNTU*, 89, 1, 19–32. (Mechanics and materials science).

References

1. Gopkalo, O.P., Nekhotiashchii, V.O., Bezlyudko, G.Ya., Kurash, Yu.P. (2019) Diagnosis of damage in austenitic steel AISI 304 at mechanical loading by measurements of coercive force. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 12–24 [in Ukrainian].
2. Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchii, V., Gopkalo, O.Ye., Kurash, Yu. (2020) Damage evaluation for AISI 304 steel under cyclic loading based on coercive force measurements. *Int. J. Fatigue*, Vol. 139.
3. Gopkalo, A.P., Bezlyudko, G.Ya., Nekhotiashchii, V.O. (2017) On expert evaluation of damage of steel AISI 304 at static and cyclic loading by measurements of coercive force. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, St.-Petersburg, Vol. **20**, 45–51 [in Russian].
4. Gopkalo, O.P., Bezlyudko, G.Ya., Kotlyarenko, A.A., Kurash, Yu.P., Solomakha, R.M. (2020) Diagnosis of damage to ferromagnetic steels during mechanical loading by results of measurements of coercive force. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **2**, 13–21 [in Ukrainian].
5. Gopkalo, O.P., Yukhymets, P.S., Bezlyudko, G.Ya., Solomakha, R.M., Nekhotiashchii, V.O. (2020) From the experience of using non-destructive control methods to assess the technical condition of the pipeline emergency section. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 30–36 [in Ukrainian].
6. Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchii, V. (2018) Evaluation of the structures metal damage under the static and cyclic loadings according to the coercive force value. *Scientific J. of TNTU*. 89(1), 19–32. (Mechanics and materials science).

DIAGNOSIS OF DAMAGE TO CATERPILLAR TRACKS UNDER MECHANICAL LOADING BASED ON THE RESULTS OF MEASUREMENTS OF THE COERCIVE FORCE

O.P. Gopkalo¹, M.P. Zemtsov¹, O.Ye. Gopkalo¹, V.Ye. Bodunov¹, G.Ya. Bezlyudko², P.M. Solomacha²

¹G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NASU. 2 Timiryazevska Str., 01014, Kyiv, Ukraine. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

²LLC «Special Scientific Developments», P.O. box 12036, 61184, Kharkiv, Ukraine

Obtained experimental results of 4-point bend tests of caterpillar tracks made of austenitic steel of Gadfield type confirmed the possibility of using non-destructive coercimetric testing to assess the level of metal loading, which characterizes the degree of damage, by measuring coercive force (H_c). Due to the effect of a sharp change in the values of the coercive force when stresses of the conditional yield stress are exceeded, which correspond to threshold values of H_c for the transition from elastic to plastic deformation, there is no need to determine the mechanical characteristics of strength and plasticity of the metal, since diagnosis of the relative loading is carried out with respect to the conditional yield stress. An approximate estimate of the level of loading of tracks metal was performed using the known dependence of the values of coercive force on stresses for austenitic steel AISI 304 and a similar hypothetical dependence for the studied steel. It is established that each stage of 4-point bend loading corresponds to a certain level of relative stresses that characterize the extent of metal damage. The maximum level of sustained damage roughly corresponds to the stress limit of the metal. The results obtained are in good agreement with the data of metal-graphic studies. 6 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: caterpillar tracks, structuroscope, coercive force, load, damage, stress

Надійшла до редакції 23.11.2020



**МІЖГАЛУЗЕВИЙ УЧБОВО-АТЕСТАЦІЙНИЙ ЦЕНТР
ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ**




Професійне навчання, підвищення кваліфікації та спеціальна підготовка до атестації згідно з стандартом ДСТУ EN ISO 9712 КОНТРОЛЕРІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ за спеціалізацією:

- ◆ ультразвуковий метод контролю;
- ◆ радіографічний метод контролю;
- ◆ візуально-оптичний метод контролю.

Спеціальна підготовка та атестація персоналу з випробувань зварних з'єднань:

- ◆ фахівців з фізико-механічних випробувань металів і зварних з'єднань;
- ◆ фахівців з металографічним досліджень металів і зварних з'єднань.



Майстерні для навчання зварників знаходяться на території Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона за адресою:

Україна, 03150, м. Київ
вул. Антоновича, 56
Тел.: (+380 44) 200-82-80,
200-81-09
paton_muac@ukr.net
http://muac.kpi.ua



Наш офіс, а також аудиторії для теоретичного навчання та лабораторії для дефектоскопів з неруйнівних методів контролю знаходяться в корпусі зварювального факультету Національного технічного університету України "КПІ ім. Ігоря Сікорського" за адресою:

Україна, 03056, м. Київ
вул. Дашавська, 6/2
Тел.: (+380 44) 294-61-65,
294-61-67, 456-63-30

КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ НАФТОПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ ЗА ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ У ВОДНЕВОВМІСНОМУ РОБОЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ*

В.О. Стрижало, С.З. Стасюк

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

E-mail: stasiuk-ipp@i.ua

З метою підвищення надійної і безпечної експлуатації технологічного обладнання, коли можливе протікання процесів деградації під дією домінуючого фактору пошкодження – водневої корозії металу, проведено дослідження впливу середовища із вмістом від 60 до 90 % об. водню в суміші з рідкими чи пароподібними вуглеводами протягом 180000, 200000 і 245000 год на зміни фізико-механічних властивостей металу трубопроводів із сталі марки 12CrMo19 5 (Німеччина) реакторних блоків трьох установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300. Отримані експериментальні дані дозволили надати практичні рекомендації з проведення пневматичних випробувань під час ревізій і обстежень. Також в роботі розглянуто дію сірководневого середовища на процеси руйнування місткостей нафтового обладнання: абсорбера сірководню, сепаратора гідроочищення і пропан-бутанової місткості. Показано, що підповерхнє воднево-індуковане розтріскування, що проявляється у вигляді розшарування стінки місткостей, викликане поглинанням дефектами структури металу (неметалеві включення, несучільності тощо) утвореного при корозії водню, який під дією прикладених навантажень цілеспрямовано переміщується до місця виникнення максимальних трьохосних напружень. На основі накопиченого експериментального матеріалу розроблено проект ДСТУ «Технічна діагностика. Діагностування і контроль технічного стану посудин і трубопроводів під дією агресивного робочого середовища. Загальні вимоги», який спрямовано на підвищення сталого функціонування технологічного обладнання і зниження імовірності виникнення аварій та надзвичайних ситуацій. Бібліогр. 10, рис. 5.

Ключові слова: технологічні трубопроводи, воднева корозія, процеси деградації, механічні характеристики, сірководневе середовище, воднево-індуковане розтріскування, розшарування, ресурс безпечної експлуатації, національний стандарт

Основні технологічні процеси у нафтопереробних і нафтохімічних виробництвах пов'язані з приєднанням водню до різних речовин з утворенням середовищ, що містять від 60 до 90 % об. водню в суміші з рідкими чи пароподібними вуглеводами, сірководнем та іншими компонентами при температурах 260...550 °C і тиску 2,1...6,6 МПа. В умовах контакту металу з водневомістким середовищем метал насичується воднем і в наслідок цього виникає воднева корозія – знеуглецювання сталі і воднева крихкість – втрата металом пластичності, що викликана виникненням і розвитком тріщин внаслідок накопичення водню на різних дефектах (дислокаціях, вакансіях, міжзеренних границях тощо). Спільна дія кількох чинників (тривалість експлуатації при підвищених температурах і тиску, перегрівання металу, дія агресивного робочого середовища) може викликати зміни у властивостях металу і можливість виникнення раптового руйнування конструкції [1–6]. Досвід експертних обстежень і результати контролю в процесі експлуатації технологічного обладнання нафто- і газопереробних виробництв

показують [5, 6], що в агресивному середовищі із вмістом сірководню руйнування металу проявляється у формі внутрішнього розшарування з утворенням поверхневих пухирів (водневий блістерінг) і розтріскуванням з виникненням тріщини, що виходять на поверхню (воднево-індуковане розтріскування).

Мета роботи полягала у підвищенні надійної і безпечної експлуатації технологічного обладнання, коли можливе протікання деградаційних процесів під дією домінуючого фактору пошкодження – водневої корозії металу. В межах даної роботи досліджували:

– вплив водню на зміни фізико-механічних властивостей і структуру металу, використаного в матеріальному оформленні трубопроводів трьох реакторних блоків установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300, які могли виникнути внаслідок тривалої експлуатації або порушення нормального режиму роботи;

– вплив довготривалої дії сірководневого середовища на структуру і механічні властивості металу нафтового обладнання, а саме абсорбе-

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

Стрижало В.О. – <https://orcid.org/0000-0001-9226-5206>

© В.О. Стрижало, С.З. Стасюк, 2021

ра сірководню, сепаратора гідроочищення і пропан-бутанової місткості.

Дослідження впливу водню на матеріал трубопроводів. В реакторному блоці установок каталітичного реформінгу, виготовлювачем яких є Магдебурський завод важкового машинобудування (Німеччина), використані труби з хромо-молібденової сталі марки 12CrMo19 5 [7] (вітчизняний аналог – сталь марки 15X5M [8]). Згідно з регламентом експлуатації трубопроводи періодично піддавали ревізіям і обстеженням. Коли тривалість їх роботи досягла встановленої експлуатаційними документами величини, з метою визначення подальшого безпечного строку служби «котушки» із зварними швами були вирізані з трубопроводів для лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей матеріалу. При цьому фактичне напруження трубопроводів при тиску 3,8 МПа і температурі 425 °С в середовищі до 85 % об. водню склало 180000 (трубопровід 1), 200000 (трубопровід 2) і 245000 год (трубопровід 3). Металографічний аналіз мікроструктури основного металу (ОМ) і зварних з'єднань (ЗЗ) труб показав, що структура металу не зазнала змін внаслідок високотемпературного напруження в умовах довготривалої дії середовища із вмісту водню високої концентрації. Ознаки водневої корозії відсутні.

Експериментальними даними, отриманими при випробуванні зразків труб за кімнатної і робочої температур, виявлено достатньо високі показники характеристик міцності, пластичності і твердості, які за своїми значеннями відповідають вимогам стандартів і нормативної документації (НД) на матеріал. Проте ударна в'язкість (KCV) зварного шва (ЗШ) значно менша, ніж у основному металі, і при цьому відбувається зміщення критичної температури крихкості T_k – опору крихкому руйнуванню (за показником $KCV = 34$ Дж/см²) і температури в'язко-крихкого переходу в область позитивних температур (рис. 1, а). В силу цього можна стверджувати, що ініціювання процесів водневої корозії зварних швів трубопроводів відбулося після напруження 245000 год.

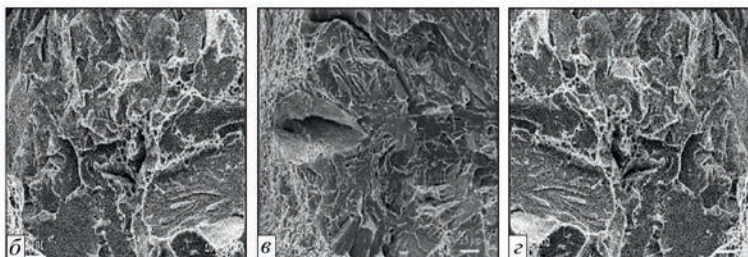
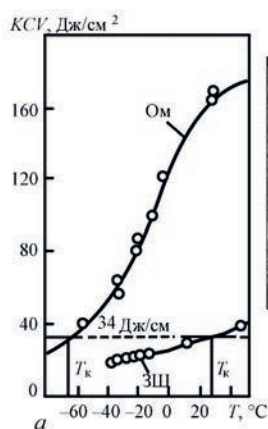


Рис. 1. Визначення температури крихкості (а) і фрактограми поверхні руйнування зразків трубопроводу 3 після випробувань на УВ: при 30 °С в зоні переходу від в'язкого руйнування до квазікрихкого (б); 33 при 20 °С зона зародження і розповсюдження тріщини (в, г)

Таким чином, незважаючи на те, що основний метал задовольняв усім вимогам НД, через підвищення температури в'язко-крихкого переходу зварних швів за певних умов експлуатації може статися крихке руйнування ділянки трубопроводу. Тому з метою запобігання виробничих інцидентів під час технічних наглядів чи експертних обстежень трубопроводів реакторного блоку гідравлічні чи пневматичні випробування на міцність рекомендовано проводити при температурі не менше 15 °С.

В штатних умовах експлуатації (відповідно до регламентних режимів) внаслідок високого рівня в'язких властивостей матеріалу небезпека руйнування відсутня.

Дослідження корозійного розшарування металу місткостей. Внаслідок контакту нафтового обладнання з сірководневим середовищем при знижених (до точки кипіння води) температурах в присутності вологи виникає корозійне розтріскування сталей, викликане наводнюванням металу (воднево-індуковане розтріскування). Як відомо [5, 6], у зв'язку з протіканням електрохімічних процесів за участю сірководню і вологи на поверхні металу утворюється атомарний водень, який дифундує в стінку і накопичується в місцях концентрації напружень розтягу [9] поблизу металургійних дефектів, таких, як несучільності, неметалеві включення, пори, що стають колекторами водню. Там атомарний водень перетворюється у молекулярний (слаборухливий) і за достатньою концентрацією викликає дотичні напруження, величина яких по досягненні критичного значення перевищує сили зчеплення, внаслідок чого починається процес тріщиноутворення. З урахуванням цих обставин в межах даної роботи вивчали воднево-індуковане розтріскування нафтової апаратури, яке проявилось у вигляді пухирів, віддулин і розшарування стінки місткостей (абсорбера сірководню, сепаратора сірководню і пропан-бутанової посудини).

Абсорбер сірководню (рис. 2, а), виготовлений із марганцевокремністої сталі марки 17Г1С [10] і експлуатується з 1993 р. за робочими параметрами: температурі 50 °С, тиску 1,1 МПа, в

середовищі із вмістом водню, сірководню. Після відпрацювання 112000 год (21 рік експлуатації) ультразвуковою товщинометрією на обичайці по середині перетину була виявлена ділянка розширеного металу (рис. 2, б). Вирізку пошкодженої ділянки піддали лабораторним дослідженням з метою вивчення впливу довготривалої дії сірководневого середовища на структуру і механічні властивості металу. Металографічні дослідження показали, що в самому розшаруванні присутні крихіткі подрібнені неметалеві включення. Розшарування розповсюдилось переважно по сульфідним плівковим включенням повздовж напрямку прокату (рис. 3). Це, в свою чергу, підтвердило шкідливий вплив сірки і марганцю, що утвори-

ли сульфід марганцю, на водневе розтріскування. Дослідження властивостей металу пошкодженої ділянки листа обичайки абсорбера не виявили відмінності механічних характеристик верхнього (з боку зовнішньої поверхні апарату) і нижнього (з боку внутрішньої поверхні апарату) шарів металу. Встановлено, що характеристики міцності, пластичності, твердості та ударної в'язкості відповідають нормованим значенням, тому вплив сірководневого середовища на механічні властивості відсутній. На це також вказує в'язкий характер поверхні зламу зразків після механічних випробувань, що відбувається шляхом злиття мікропор при руйнуванні перемичок між ними. Ведучим механізмом утворення мікропор є неоднорідність пластичної деформації в мікрооб'ємах навколо неметалевих включень.

Сепаратор гідроочищення. Сепаратор, виготовлений із марганцевокремністої сталі марки 16ГС [10] на Чернівецькому машинобудівельному заводі, експлуатувався з 1980 р. (рис. 4, а) за температури 35 °С, тиску 3,5 МПа у робочому середовищі – водень, сірководень, бензин. Через 12 років експлуатації в нижній частині апарату утворилися пухирі. Поступово деякі з них досягли розмірів 250 мм у діаметрі і виникло розшарування металу стінки. З метою вивчення механізму руйнування на різних стадіях росту тріщини, яка проходила по се-

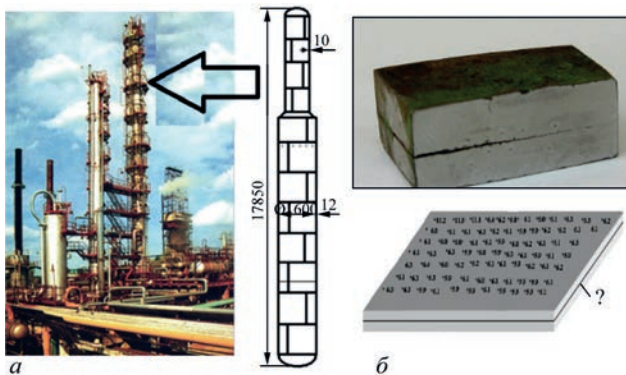


Рис. 2. Загальний вигляд абсорбера (а) і темплет розширеного металу (б)

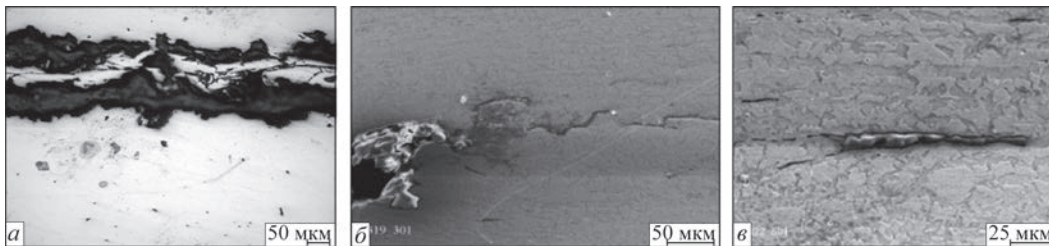


Рис. 3. Неметалеві включення в зоні розширення (а), несучільності у вістрі розширення (б, в)

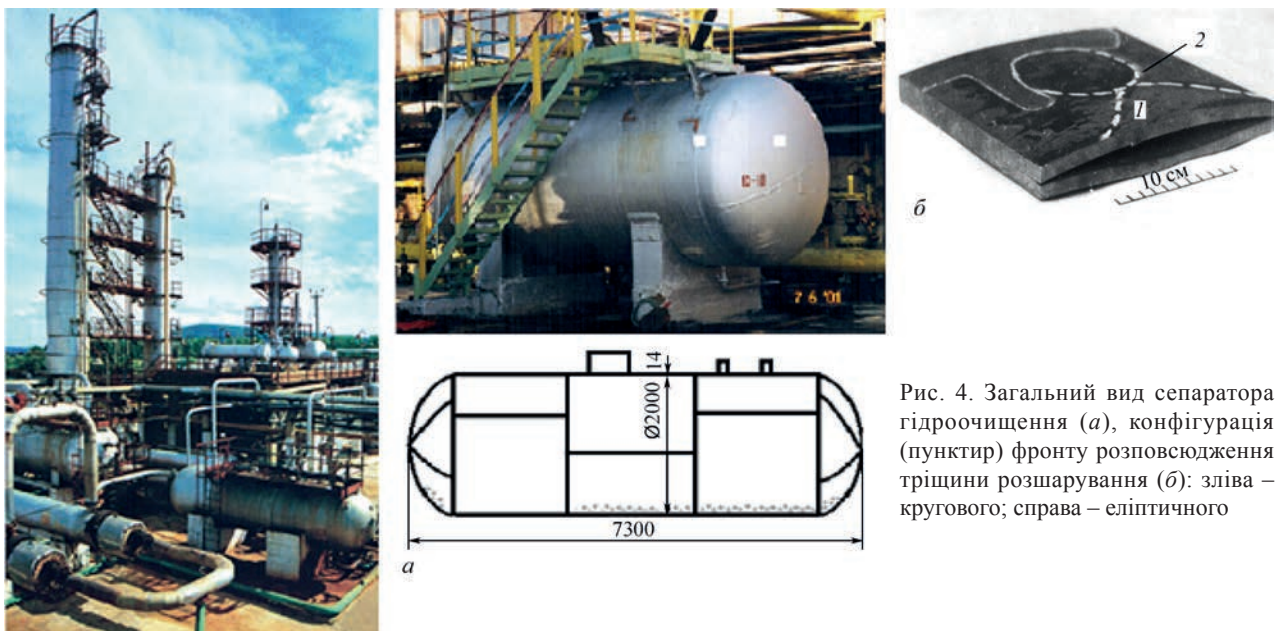


Рис. 4. Загальний вид сепаратора гідроочищення (а), конфігурація (пунктир) фронту розповсюдження тріщини розширення (б): зліва – кругового; справа – еліптичного

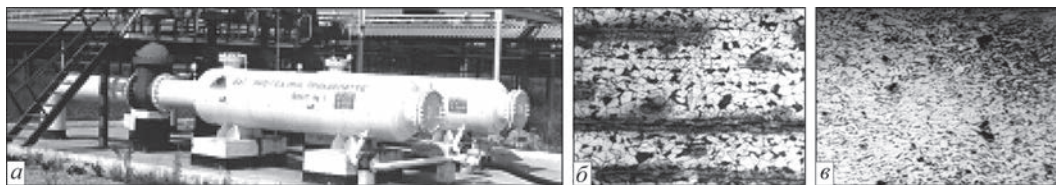


Рис. 5. Загальний вигляд посудини (а), тріщини в основному металі (б), пори в зварному шві (в)

редині перерізу стінки, проведено лабораторні дослідження вирізки металу із пошкодженої ділянки (рис. 4, б). Аналіз структури показав, що фактором, який обумовив виникнення тріщини розшарування, є скупчення грубих частинок неметалевих включень сульфідів $\text{FeS} \cdot \text{MnS}$ в осередку розвитку тріщини. Мікрофрактографія підтвердила наявність (або утворення) локальних внутрішньо-порожнинних дефектів у вигляді витягнутих поздовж текстур прокату протяжних поглиблень або окремих достатньо крупних еліптичних пор, які являли собою каталізатор процесу виділення і накопичення дисоційованого водню в зоні розповсюдження тріщини, тобто в зламі. Поверхня руйнування між витягнутими дефектами формується в основному в'язким внутрішньозереним шляхом за ямковим механізмом, тобто за механізмом виникнення і злиття мікропор з наявністю окремих вторинних тріщин. Ці ознаки характерні для воднево-індукованого розтріскування.

Пропан-бутанова посудина (рис. 5) виготовлена на Подільському машинобудівному заводі із марганцевокремністої сталі марки 16ГС і з 1972 р. експлуатується в таких робочих умовах: тиск 1,4 МПа, температура $\pm 40^\circ\text{C}$, середовище – пропан-бутанова суміш (рис. 5, а).

Після майже 30 років в нижній частині обичайки виявлено численні віддулини. З метою прийняття рішення щодо можливості подальшого безпечного строку служби посудини виконано оцінку стану металу. Мікроструктурними дослідженнями встановлено, що осередком виникнення і розповсюдження тріщини слугують грубі включення оксидів, які знаходились в товщі металу напівфабрикату. Дрібні тріщини виникли на включеннях оксисульфідів і сульфідів, які розміщені в металі паралельно рядам перліту (рис. 5, б) і розповсюджуються від зерна до зерна по тілу останнього. При цьому розповсюдження тріщини вздовж границь зерен виключено. Результати досліджень механічних властивостей показали, що характеристики міцності, пластичності, ударної в'язкості, твердості знаходяться в межах вимог стандарту на сталь. Отже, деградація структури і властивостей металу не спостерігається.

Зазначимо, що підвищена агресивність пропану у відношенні сірководневого розшарування металу пояснюється двома факторами: більш високим вмістом сірководню в пропані в порівнянні з інши-

ми більш важкими вуглеводними сполуками і найбільш високим тиском в апаратах для зрідженого пропану, що сприяє більшому розчину сірководню в дренажній воді в порівнянні з іншими апаратами. Тому саме в пропанових апаратах розшарування є найбільш небезпечним. Виправлення такої посудини, що піддалася воднево-розшаруванню з випинами і пухирями, пов'язане із значними технологічними труднощами, тому рекомендовано пропан-бутанову посудину використовувати при роботі із середовищем інертних газів.

Прикладний результат робіт по проекту. Накопичений експериментальний матеріал покладено у основу національного стандарту, розробленого в рамках програми «Ресурс-2» за назвою «Технічна діагностика. Діагностування і контроль технічного стану посудин і трубопроводів під дією агресивного робочого середовища. Загальні вимоги», який направлений на підвищення рівня безпеки технологічних процесів, забезпечення контролю за технічним станом технологічного обладнання на виробничих об'єктах, що відпрацювали нормативний строк служби під довготривалою дією агресивного середовища. Прогнозування із заданим ступенем ймовірності працездатного стану обладнання на майбутній період часу дозволить знизити ймовірність виникнення аварій та надзвичайних ситуацій. Розроблений стандарт може бути використаний всіма суб'єктами господарювання, що діють у сфері виконання робіт підвищеної безпеки та експлуатації устаткування підвищеної безпеки.

Список літератури

1. Назарчук З.Т. (2017) *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідн.*, у 8-ми томах. Львів, Простір-М.
2. Nelson, G.A. (1990) *Steel for hydrogen service at elevated temperatures and pressures in petroleum refineries and petrochemical plants*. Washington DC, API. Publ. 941.
3. Nechaev Yu.S. (2008) Metallic materials for the hydrogen energy industry and main gas pipelines: complex physical problems of aging, embrittlement, and failure. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 7, 681–697.
4. Крижанівський С.І., Осташ О.П., Никифорчин Г.М. та ін. (2016) *Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів*. Т.1. Львів, Простір-М.
5. Колачев Б.А. (1985) *Водородная хрупкость металлов*. Москва, Металлургия.
6. Арчаков Ю.И. (1985) *Водородная коррозия стали*. Москва, Металлургия.
7. Wegst C.W. (1995) *Verlag Stahlschlüssel GmbH, Dusseldorf*.
8. ГОСТ 550-75 *Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности*.
9. (1990) *Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Нефтеперерабатывающая промышленность*.

- ленность. Справ. изд. Арчаков Ю.И., Сухотин А.М. (ред.). Ленинград, Химия.
10. DSTU 8541:2015. *Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови.*

References

- (2017) Technical diagnostics of materials and structures: Refer. book. Ed. by Z.T. Nazarchuk. In: 8 Vol. Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
- Nelson, G.A. (1990) *Steel for hydrogen service at elevated temperatures and pressures in petroleum refineries and petrochemical plants*. Washington DC, API. Publ. 941.
- Nechaev, Yu.S. (2008) Metallic materials for the hydrogen energy industry and main gas pipelines: Complex physical problems of aging, embrittlement, and failure. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 7, 681–697 [in Russian].
- Kryzhanivskiy, E.I., Ostash, O.P., Nykyforchyn, G.M. et al. (2016) *Service degradation of structural materials*. Vol. 1. Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
- Kolachev, B.A. (1985) *Hydrogen brittleness of materials*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
- Archakov, Yu.I. (1985) Hydrogen corrosion of steel. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- Wegst, C.W. (1995) *Verlag Stahlschlüssel GmbH, Dusseldorf*.
- GOST 550-75: *Seamless steel tubes for petroleum processing and petrochemical industry* [in Russian].
- (1990) *Corrosion resistance of chemical production equipment*. In: Petroleum refining industry. Refer. book. Ed. by Yu.I. Archakov, A.M. Sukhotin. Leningrad, Khimiya [in Russian].
- DSTU 8541:2015: *High strength rolled steel. Specifications* [in Ukrainian].

CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF PETROLEUM-PROCESSING PRODUCTIONS IN LONG-TERM SERVICE IN HYDROGEN-CONTAINING WORKING ENVIRONMENT

V.O. Strizhalo, S.Z. Stasyuk

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NASU 2, Timiryazevskaya Str., 01014, Kyiv. E-mail: stasiuk-ipp@i.ua

In order to improve reliable and safe operation of process equipment, when degradation processes can run under the impact of the dominating factor of damage – hydrogen corrosion of metal, we studied the impact of an environment with the content of 60 to 90 vol.% of hydrogen in a mixture with liquid or vapor-like hydrocarbons for 180000, 200000 and 245000 h on the changes of physico-mechanical properties of metal of pipelines from steel of 12CrMo19 5 grade (Germany) of reactor units in three catalytic reforming installations LG-35-11/300. Derived experimental data enabled giving practical recommendations on performance of pneumatic testing during revisions and inspections. The impact of sulphur-hydrogen environment on the processes of destruction of petroleum equipment tanks, namely hydrocarbon absorber, hydrotreater separator and propane-butane tank is also considered in the work. It is shown that the subsurface hydrogen-induced cracking that is manifested as delamination of tank wall, is caused by absorption by metal structural defects (nonmetallic inclusions, discontinuities, etc.) of hydrogen formed at corrosion, which purposefully moves towards the site of initiation of maximum triaxial stresses under the impact of applied loads. Proceeding from accumulated experimental materials, the draft of DSTU «Technical diagnostics. Diagnosing and monitoring the technical condition of vessels and pipelines under the impact of aggressive working environment. General requirements» was developed. It is aimed at improvement of stable functioning of process equipment and lowering the probability of accidents or emergencies. Ref. 10, Fig. 5

Keywords: process pipelines, hydrogen corrosion, degradation processes, mechanical characteristics, hydrogen-sulphide environment, hydrogen-induced cracking, delamination, safe operating life, national standard

Надійшла до редакції 15.07.2020



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Десята міжнародна конференція ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ в ЗВАРЮВАННІ та ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

6 – 11 вересня 2021 р., Україна, Одеса

Голова програмного комітету – академік І.В. Кривцун

Тематика конференції

- Лазерне та електронно-променеве зварювання, різання, наплавлення, термообробка, нанесення покриттів
- Електронно-променева плавка та рафінування
- Гібридні процеси
- 3D технології
- Моделювання променевих технологій. Неруйнівний контроль.
- Матеріалознавчі проблеми лазерних та електронно-променевих технологій

АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ

Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./факс: (38044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua | <http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2021>

ДОСВІД НТЦ «ТЕРМОКОНТРОЛЬ» В ОБЛАСТІ ТЕПЛООВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В.О. Стороженко, С.М. Мешков, Р.П. Орел, О.В. Мягкий

НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки. 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.
E-mail: volodymyr.storozhenko@nure.ua

Представлені основні результати досліджень і розробок в області створення технологій теплового методу контролю, виконаних у НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки з 1973 р. до теперішнього часу. Показані результати застосування теплових технологій для діагностування затирання підшипників і порушень електроізоляції в заглибних електродвигунах серії ПЕД, які застосовують для нафтовидобутку. Показані результати контролю стану металу трубопроводів агрегатних залів АЕС. З'ясувалося, що дефекти викликані кавітаційною ерозією, мають «тепловий слід» і можуть бути зареєстровані тепловим методом. Описано технологію діагностування підземних трубопроводів і витікань у них. Розроблено метод статистичної обробки результатів теплового діагностування газоперекачувальних агрегатів магістральних газопроводів, який включає створення віртуального еталонного зразка вузла агрегату; сформовані інформативні ознаки для порівняння температурних полів; сформовано вирішальне правило, яке вказує на відхилення обраних інформативних ознак від еталонного значення. Експериментально підтверджено результати розрахунку рівня рідкої фази у газопроводах. Наведено результати термографічного обстеження гідротехнічних споруд Дніпровської ГЕС. Наведено кількісні показники теплових втрат будівель, визначені під час тепловізійного обстеження. Розглянуто напрями та перспективи розвитку теплового методу. Бібліогр. 20, рис. 9.

Ключові слова: тепловий неруйнівний контроль, теплове діагностування, заглибні електродвигуни, підземні трубопроводи, кавітаційна ерозія, гідроспоруди, теплові втрати

На сьогоднішній день тепловий метод неруйнівного контролю є одним із найбільш ефективних та широко використовуваних засобів діагностування промислових об'єктів, виробів та матеріалів. Унікальність методу полягає в його універсальності, високій продуктивності та безпечній реалізації. Теплообмін, або теплоперенесення – мимовільний необоротний процес поширення теплоти, обумовлений різницею температур. Процес теплопередачі відбувається в просторі та в часі, тому її аналітичні дослідження в тепловому методі зводяться до вивчення просторово-часової зміни температури. В межах теплового методу виділяють теплову дефектоскопію, дефектометрію і томографію. Теплова томографія найповніше визначає параметри дефектів і полягає у повній розшифровці структури об'єкта. Водночас часто важливо визначити не тільки параметри дефекту, але й узагальнені параметри технічної системи, що характеризують її працездатність. Це завдання вирішує технічна діагностика. Треба зауважити, що чітких меж між дефектоскопією, дефектометрією, томографією й технічним діагностуванням не існує і часто вони вирішують подібні завдання. У світовій технічній літературі всі види теплового методу об'єднують під назвою «кількісна термографія» (Quantitative Thermography), або «інфрачервона термографія» (IR Thermography). Якщо в технічній діагностиці переваги ІЧ-термографії є безперечними, то активний метод неруйнівного

контролю (НК) відчував періоди підйому та спаду. Основною особливістю теплового методу є те, що для кожного об'єкта контролю необхідно створювати окрему технологію, що включає спосіб нагріву, реєстрацію та обробку отриманих результатів. Нині тепловий неруйнівний контроль (ТНК) – це високотехнологічна сферу теоретичних і прикладних досліджень, які об'єднують досягнення в області теплопередачі, ІЧ-технології, матеріалознавства та комп'ютерної інженерії [1].

Термографія і ТНК нині актуальні, вони застосовуються на низці підприємств і організацій України та мають величезні перспективи використання в майбутньому. У розвитку цього напрямку в Україні значне місце посідає внесок колективу НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ) (рис. 1).

Стисла історія. Поява в ХНУРЕ наукового напрямку «Тепловий неруйнівний контроль» була обумовлена бурхливим розвитком ракетно-космічної техніки. На початку 70-х років ХХ ст. виявилось, що розробка нових матеріалів і виробів із них в авіаційно-космічній техніці випереджає розвиток засобів їхнього контролю. У світових лідерів у цій області з'явилися перші методики ТНК і відповідне обладнання для його реалізації. Оскільки поява теплового методу була пов'язана з оборонними проектами, в умовах гострого протистояння між світовими державами доступна інформація щодо теплових

Стороженко В.О. – <https://orcid.org/0000-0002-7609-2955>, Мешков С.М. – <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>, Орел Р.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>, Мягкий О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0442-5570>

© В.О. Стороженко, С.М. Мешков, Р.П. Орел, О.В. Мягкий, 2021



Рис. 1. НТЦ «Термоконтроль» (2013 р.) Бандурян О.В., Стороженко В.О., Протасеня С.Ю., Орел Р.П., Мягкий О.В., Мешков С.М., Котляр Т.Ю., Ткачев В.М., Малик С.Б., Плетенецький М.В.

технологій була вкрай обмеженою. Тепловий метод в СРСР у той час не мав власної теоретичної бази і необхідних технічних засобів. Тому для розвитку перспективного методу необхідно було проводити роботи відразу по декількох напрямках:

- створювати теоретичну основу;
- створювати прилади для реєстрації теплових полів;

- створювати методи обробки інформації.

Історію розвитку теплового методу в Україні та участь у ній НТЦ «Термоконтроль» можна простежити за тематикою проведених досліджень і проектів. Першою роботою колективу була участь у проекті «Розроблення методів дефектоскопії склопластикових виробів засобами ІЧ-техніки» (1973 р.). Завдання додатково ускладнювалось великою площею та складною геометрією об'єктів контролю. Було створено комплекс для теплової дефектоскопії та промислову методику для виробів плоскої й циліндричної форм із скло- та вуглепластикових матеріалів [2, 3]. Теплові скануючі дефектоскопи ІКД-1, які входили до складу комплексу, були першими в Україні (рис. 2, а, б). Вже перші теплові дефектоскопи мали такі відмінності від традиційних дистанційних вимірювачів температури, як наявність системи сканування, системи вирівнювання чутливості уздовж рядків сканування, системи пригнічення варіювання коефіцієнта випромінювання тощо.

Це було початком багаторічних досліджень нових матеріалів, результатом яких було створення низки оригінальних засобів і технологій ТНК. Для створення елементів потужних лазерних систем потрібні були неконтактні засоби. У 1979 р. у рамках теми «Розроблення макету установки для візуалізації теплових полів» був створений і пройшов випробування ІЧ-сканер П-10П [4] (рис. 2, в). Прилад призначався для контролювання розподілу температури на поверхні вихідного вікна лазера великої потужності.

У 1980 р. для СКБ «ПЕД-потенціал» (м. Харків) у межах теми «Розроблення пристроїв для безконтактної теплової діагностики заглиблених електродвигунів» були сконструйовані пірометри П-21П [5] (рис. 2, з). Випробування були проведені на ремонтних підприємствах нафтовидобувного комплексу у Татарії, де прилад отримав позитивні відгуки нафтовиків. Була випущена партія з 15 приладів. У 1986 р. пірометр П-21П демонструвався на ВДНГ України, де отримав диплом і нагороджений медаллю.

У 1983 р. лабораторією отримані 3 промислових тепловізори ТБ-03, за допомогою яких було проведено дослідження виробів із вакуумно-порошковою теплоізоляцією. Отримані результати дали змогу подовжити розвиток перспективного напрямку у проекті «Розроблення автоматизованого теплового неруйнівного контролю побутових термосів». Було розроблено теплової дефектоскоп ТД-10К для інтегрального оцінювання теплоізолюючих властивостей термосів «ТЕМЕТ». Для поточного контролю було створено промислову автоматизовану систему АСКБТ, яку (2 установки) впроваджено на підприємстві ХЗТО (м. Харків). Для НТЦ отримано цінний досвід створення промислових автоматизованих систем теплового контролю.

У 1985–1988 рр. колектив лабораторії у межах проекту «Дослідження принципів побудови і створення радіометрів спеціального призначення» брав участь у програмі «Буран». Метою робіт було створення приладів для теплової дефектоскопії нових композитних матеріалів і теплообмінних апаратів дюзових камер. Були розроблені унікальні теплові дефектоскопи [6, 7]:

- реєструюча частина робототехнічного комплексу;
- малогабаритний радіометр П-30А (3 зразка) для роботи всередині об'єкта контролю (рис. 2, д);
- радіометр П-40А (2 зразка) з неохолоджуваним приймачем для контролю жароміцних керамічних покриттів (рис. 2, е).

На початку 90-х р. ХХ ст. через відсутність фінансування багато цікавих напрямів ТНК розроблялись в ініціативному порядку. Фахівці НТЦ і студенти проводили роботи, в результаті яких було створено ескізний проект автоматизованої системи теплової діагностики колісних букс рухомих вагонів для залізниці. Тоді проект не був реалізований, але у 1994 р. напрацювання були використані у темі «Створення тепловізійних засобів для транспортних машин» (КАДІ). В результаті за стислий час була розроблена і виготовлена партія (3 зразка) приладів РАД-1 [9] (рис. 2, ж).

Високий рівень проведених лабораторією ТНК досліджень і розробок підтверджується участю в багатьох Міжнародних конференціях і проектах. Міжнародний проект спільно з Францією, Фінлян-

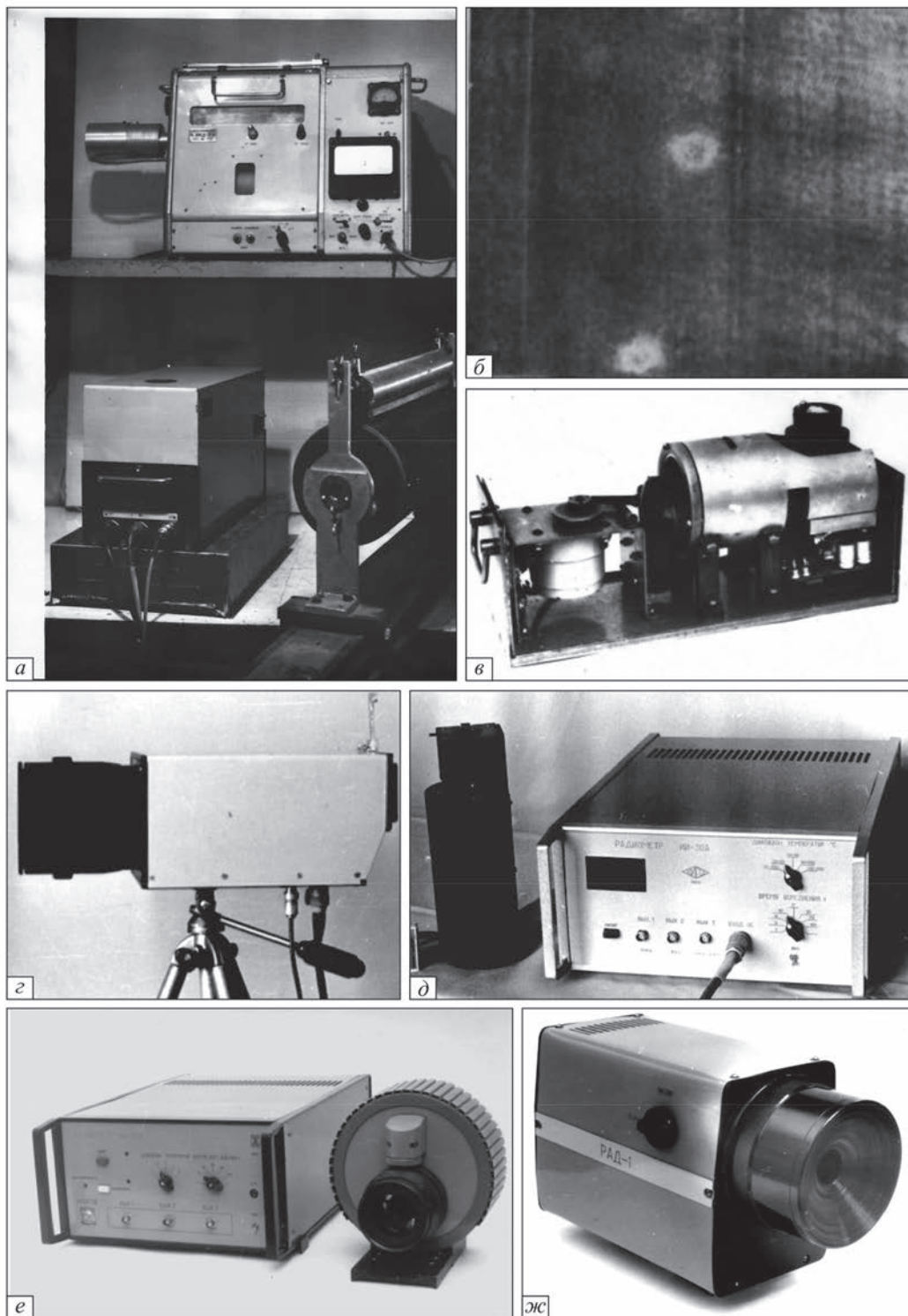


Рис. 2. Прилади, розроблені в НТЦ «Термоконтроль»: ІКД-1 (а); термограма, що отримана ІКД-1 (б); сканер П-10П для дослідження лазерної техніки (в); радіометр П-21П для діагностування двигунів серії ПЕД (г); дефектоскоп П-30А (д); дефектоскоп П-40А (е); радіометр РАД-1 для діагностування електрообладнання (ж)

дією і Росією INTAS № 1770 «Візуалізація та аналіз механічної напруги в будівельних конструкціях методом інфрачервоної термографії» («Visualisation and analysis of mechanical stresses in building constructions by using infrared thermography») у 1998 р. отримав вищу оцінку (А1) журі. Участь лабораторії у вітчизняних проектах відображено у:

– національній програмі 04.03 «Підвищення надійності і довговічності машин і конструкцій» (1997–2000 рр.);

– темі № 2/1517 «Теоретичні та прикладні основи теплової дефектометрії і томографії», Київ, Міністерство освіти і науки України.

У 1997 р. лабораторія ТНК отримала ліцензію Космічної Агенції України на проведення робіт

у області ракетно-космічної техніки. Співпраця з КБ «ПВДЕННЕ» (м. Дніпропетровськ) почалася з робіт по темі «Випробування теплового неруйнівного методу контролю якості для силових конструкцій сонячних батарей КА».

У 2002 р. було укладено договір «Розробка, виготовлення, випробування і передання науково-технічної продукції по стендах для контролю лопаток і теплозахисних покриттів». Світові тенденції в тепловому контролі вказували на те, що підвищення потенціалу методу безпосередньо пов'язане з використанням сучасних методів обробки температурної інформації. Цей проект вивів дослідження НТЦ на новий рівень. Натурні експерименти стали проводитись за допомогою промислового тепловізора, що дало змогу реєструвати динаміку процесу розвитку температурних полів, що значно підвищило інформативність контролю.

Наприкінці 90-х років ХХ ст. зміна ситуації в країні, соціальні зрушення в суспільстві, встановлення нових відносин, розрив науково-технічних зв'язків – все це вимагало нових підходів і організаційних рішень для продовження науково-дослідних робіт. Завдяки тому, що до штату фахівців лабораторії переважно входили викладачі кафедри фізики, вдалося зберегти науково-технічний потенціал і матеріальну базу. У 1998 р. лабораторію «Теплового неруйнівного контролю» було перетворено в НТЦ «Термоконтроль». Це дало позитивні результати.

У 2009–2010 рр. виконувалася держбюджетна науково-дослідна тема «Технології застосування термографічних приладів для аналізу теплових полів», в якій були відображені отримані на той момент досягнення НТЦ. Після модернізації лабораторного тепловізора для роботи в польових умовах і на відкритих просторах у 2004–2013 рр. термографісти НТЦ брали участь у тепловізійних обстеженнях низки важливих промислових об'єктів України: енергетичного обладнання ТЕС Жовті Води, Зміївської ГРЕС, Стаханівського заводу феросплавів, Запорізької АЕС, Дніпровської ГЕС, газоперекачувального обладнання ГПУ «Шебелінкагазвидобування».

За роки плідної дослідницької роботи випущено понад 200 публікацій, у тому числі 11 в іноземних виданнях, отримано 8 патентів. Захищено 9 кандидатських дисертацій і одна докторська.

Теплова діагностика (passive TNDT). Як видно з переліку реалізованих проектів, НТЦ був єдиною в Україні організацією, яка займалася в повному обсязі всіма проблемами теплового неруйнівного контролю:

- аналіз об'єкту (побудова теплофізичних моделей, рішення прямих і зворотних задач, ІЧ-дефектоскопія, дефектометрія і томографія, комп'ютерне моделювання);
- розробка й виготовлення апаратури ТНК (реєструючих пристроїв, систем теплового збудження, систем обробки інформації);

– проведення лабораторних (натурних) випробувань і відпрацювання технологій ТНК для різних об'єктів.

Принцип теплової діагностики полягає у порівнянні аналізованого і еталонного полів температури. Аномалії температури є індикаторами дефектів, а їх характеристики і зміна у часі лежать в основі кількісних оцінок тих чи інших параметрів об'єктів.

Прикладом ефективного застосування теплової діагностики є виявлення місць затирання підшипників у заглиблених електродвигунах (ПЕД) для нафтовидобутку. Метою діагностики було виявлення місць перегріву на корпусі двигуна, які є ознаками характерних дефектів: затирання у підшипниках ротора, розташованих уздовж ПЕД, та короткого замикання на окремих ділянках обмотки. Регламентом експлуатації ПЕД передбачається періодичне підняття із свердловини і розбирання з метою доступу до підшипників. Виробничі випробування радіометра П-21П (рис. 2, з) виявили, що температура над дефектним підшипником може перевищувати середню на кілька градусів [5].

Метою робіт, проведених фахівцями НТЦ (рис. 3) на Запорізькій АЕС [9], було визначення ефективності застосування термографії для виявлення прихованих дефектів металу трубопроводів. В агрегатних залах двох блоків були обстежені дві групи об'єктів: паропроводи та трубопроводи другого контуру основного конденсату.

Термографічне обстеження проводили на ділянках трубопроводів за таких умов: без механічної підготовки поверхні об'єктів та під час нормальних режимів роботи обладнання. Обстеження регламентувалися технічними вимогами на проведення робіт «Контроль металу трубопроводів і обладнання енергоблоків методом теплової термографії» від 02.10.2007. Згідно з діючими на теплових станціях нормами паропроводи високого тиску вкриті шаром із теплоізоляції (скловати) та вміщені в захисний металевий екран, який може сильно спотворювати теплову картину (рис. 4, а). На фрагменті об'єкта з гладкою поверхнею (рис. 4, б) було виявлено ді-



Рис. 3. Учасники обстеження трубопроводів АЕС

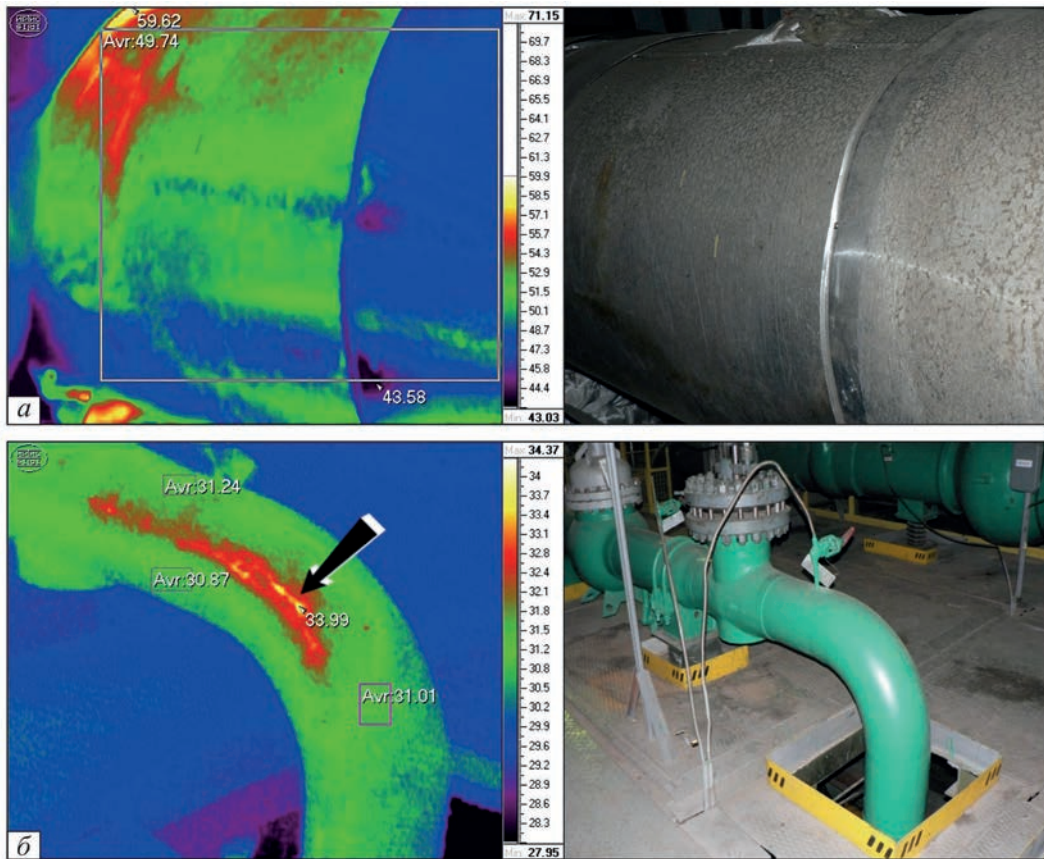


Рис. 4. Визначення стану металу на трубопроводах АЕС: ділянка паропроводу високого тиску з можливим дефектом (а); виявлена ділянка з кавітаційною ерозією (дефект потоншення стінки труби) (б)

лянку з передбачуваним дефектом. Ознакою внутрішнього дефекту, що розвивається, є температура і площа теплової аномалії.

Цікаві результати були отримані під час обстеження трубопроводів основного конденсату (температура теплоносія 40 °C) [9]. На результати тепловізійної зйомки в закритих приміщеннях, коли температура об'єкта наближена до температури навколишнього середовища (30 °C), великий вплив мають зовнішні фактори. В результаті їх дії на поверхні об'єктів формуються зони з уявною («наведеною») температурою, яка не відповідає реальній радіаційній температурі об'єкту. Крім кількісних температурних відмінностей такі наведені аномалії мають і якісні відмінні ознаки. Були виявлені й вивчені такі види факторів, що впливають на температурні поля об'єктів:

- вплив освітлення;
- вплив форми поверхні об'єкта;
- вплив потужних зовнішніх теплових випромінювачів;
- вплив теплообміну об'єкта з підлогою приміщення.

В результаті досліджень виявлено фрагмент трубопроводу з прихованим дефектом – кавітаційною каверною (рис. 4, б). Дефект виявлено за такими ознаками: форма дефектної зони не мала регуляр-

ного характеру й відрізнялася від температурних спотворень, що викликані вивченими зовнішніми факторами; розташування теплової аномалії не змінювалося у випадку зміни ракурсу зйомки; максимальна температура аномалії відрізнялася від середньої температури іншої частини труби на 2,6 °C. На підтвердження факту виявлення свідчить те, що виявлений дефект знаходився на повороті трубопроводу, де відбувається різке гальмування потоку конденсату, а такі місця є найбільш уразливими для виникнення кавітаційних каверн. Отриманий результат підтверджений даними ультразвукового контролю.

У світовій атомній енергетиці програми технічного обслуговування АЕС передбачають до 50 тис. тестових процедур, серед яких постійно збільшується частка тепловізійного моніторингу. Програми тепловізійного огляду впроваджені на всіх АЕС США, є відомості про застосування тепловізійного методу на низці російських АЕС [10]. У вітчизняній атомній енергетиці тепловізійний метод поки застосування не знайшов.

Нині актуальним є виявлення витікання з підземних трубопроводів. Стосовно трубопроводів теплова діагностика полягає в тому, що внаслідок відмінності температури транспортованої по трубопроводу речовини від температури ґрунту на поверхні ґрун-

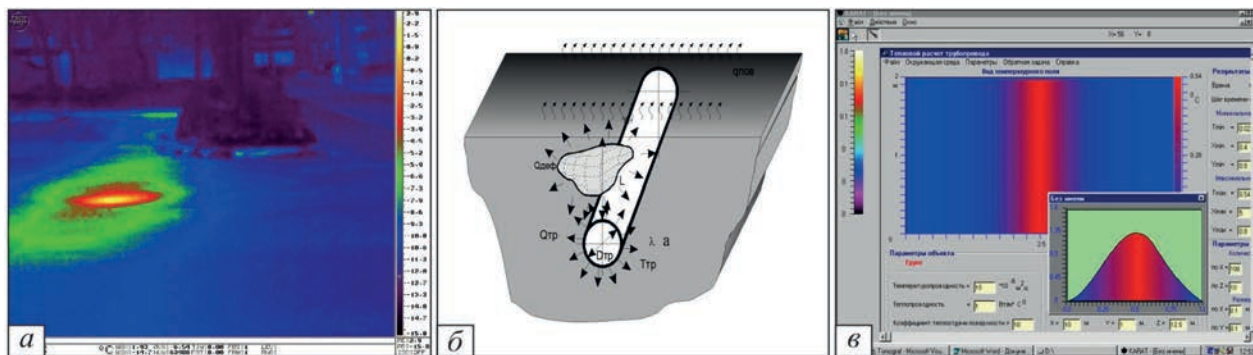


Рис. 5. Діагностування підземних трубопроводів: термограма трубопроводу з витіканням (а); теплофізична модель (б); інтерфейс програми «Трубопровід» з обробленими даними (для бездефектної ділянки) (в)

ту виникає надмірне температурне поле, яке може бути зареєстровано. Розшифрування отриманого температурного розподілу дає можливість визначати деякі параметри трубопроводу і дефектів у ньому (рис. 5, а). Тепловий метод дає змогу:

- виявляти місця залягання трубопроводів і протизаконні врізання в них;
- визначати глибину залягання трубопроводу і наявність «спливання» в ньому;
- виявляти й оцінювати розмір витікання рідких і газоподібних продуктів;
- виявляти засмічення трубопроводів і порушення теплоізоляції.

Для опису процесу витікання й отримання апріорної інформації про об'єкт створено теплофізичну модель (рис. 5, б), що зв'язує параметри трубопроводу, ґрунту, умови навколишнього середовища [11, 12] та комп'ютерну програму «Трубопровід» (рис. 5, в). Програма використовувала метод скінченних різниць у тривимірному просторі та давала змогу отримувати температурний розподіл на поверхні ґрунту. Шляхом комп'ютерного моделювання встановлено поріг чутливості пасивного ТНК за заданих на момент реєстрації теплофізичних характеристик ґрунту – витікання води $0,5 \text{ м}^3/\text{год}$ за різниці температур води та навколишнього середовища 20°C . Тепловий метод дає можливість визначати місця залягання трубопроводу з точністю до $0,1 \text{ м}$ по вертикалі і горизонталі. Розроблено рекомендації щодо термографування підземних трубопроводів і шлях переходу до визначення обсягу витікання за температурним полем на поверхні ґрунту. Досліджено вплив добових і сезонних коливань температури навколишнього середовища на похибку теплового діагностування трубопроводів, запропоновані методики оптимізації режимів контролю, що дало змогу зменшити похибки результатів на $10 \dots 50 \%$. Запропоновано метод спектрального аналізу термограм для ідентифікації температурних полів за рівнями теплових шумів, які наближені до рівня корисного сигналу.

Важливим завданням, від якого залежить ефективність роботи газотранспортної системи України,

є підвищення надійності й довговічності газоперекачувальних агрегатів (ГПА). Значну частину парку ГПА (рис. 6, а) газотранспортної системи країни становить обладнання, виготовлене кілька десятиліть тому, і терміни його експлуатації закінчуються. Для діагностування стану газоперекачувального обладнання проведено термографічне обстеження низки об'єктів на газовидобувному комплексі. Результати досліджень виявили, що великий вплив мають неточність позиціонування тепловізора під час зйомки, неоднорідність випромінювальної здатності на поверхні об'єкта та наявність відбитку від зовнішніх джерел [13]. Запропоновано порівнювати температурні поля за їхніми гістограмами, які є стійкішими до впливу перешкод. Термограма об'єкта з математичного погляду є матрицею зі значеннями температури кожного пікселя зображення. Таку матрицю можна розглядати як вибірку і застосовувати до її аналізу статистичні методи. Запропоновано статистичний підхід для обробки термограм, заснований на принципі визначення найбільш ймовірного значення температури поверхні об'єкта або його фрагменту, який би враховував як статистичні властивості поверхні, що випромінює, так і параметри використаної тепловізійної апаратури [14]. Термограми і гістограми обраних однотипних вузлів ГКН (компресорних циліндрів) показані на рис. 6, в, г.

Для проведення діагностування вузлів ГКН шляхом порівняння гістограм їхніх температурних полів здійснено такі заходи [14]:

- створено віртуальний еталонний зразок обраного вузла агрегату (модель теплових процесів, що відбуваються в об'єкті контролю);
- вибрано відповідні критерії (інформативні ознаки) для порівняння температурних полів аналогічних вузлів;
- сформовано вирішальне правило, яке вказує на те, яке саме відхилення обраних інформативних ознак від еталонного значення свідчить про дефектність контролюваного вузла.

Результати діагностування вузлів за вирішальним правилом з урахуванням мінімізації помилки вказали на дефектність 21 вузла з 104 розглянутих. Запро-

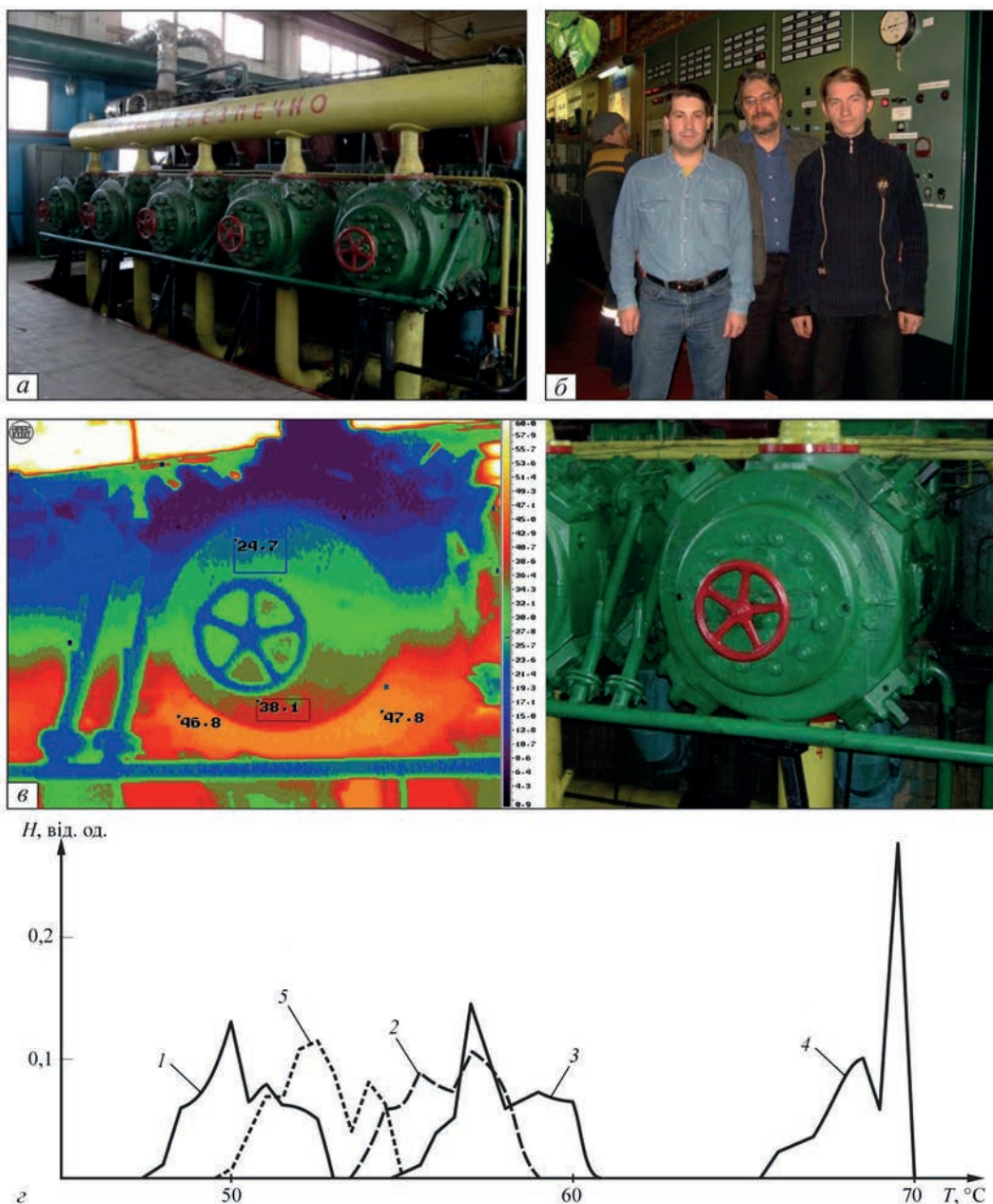


Рис. 6. Діагностування вузлів газоперекачувальних агрегатів: газоперекачувальний агрегат ГKH-10 (а); термографісти – Р.П. Орел, С.М. Мешков, О.В. Мякий (б); термограма компресорного циліндра (КЦ) (в); огинаючі нагнітальних клапанів 5-ти КЦ агрегату № 1 (4-й клапан дефектний) (г)

понований метод статистичної обробки зображень температурних полів дає змогу здійснювати оперативну діагностику технічного стану однотипного обладнання. Метод може знайти застосування в багатьох секторах промислового виробництва: енергетиці, машинобудуванні, нафтогазовому комплексі.

Важливим виробничим завданням газового комплексу є визначення вмісту рідкої фази у газопроводах. На одній із ділянок газопроводу було проведено дослідження. Для розшифрування термограми побудовано теплофізичну модель із дефектом (рис. 7, а) і проведено моделювання процесу [15]. Розрахунки параметрів моделі показали, що за певних співвідношень температур теплоносія і навколишнього середовища перепад температур

на поверхні труби може перевищувати поріг чутливості тепловізора (рис. 7, б, в). Аномалія поверхневої температури може становити кілька градусів, що є достатнім для чіткої реєстрації рівня рідкої фази в певному місці трубопроводу.

Багато гідротехнічних споруд (греблі, дамби) в Україні потребують ретельного контролю технічного стану. Для проведення такого контролю поряд із традиційними (регламентованими) засобами і методами розглянуто можливість застосування термографії. Під час зведення гравітаційних гребель екзотермія, а також коливання температури зовнішнього повітря викликають у бетонному масиві значні температурні напруження, в результаті чого виникають тріщини, які можуть значно зміни-

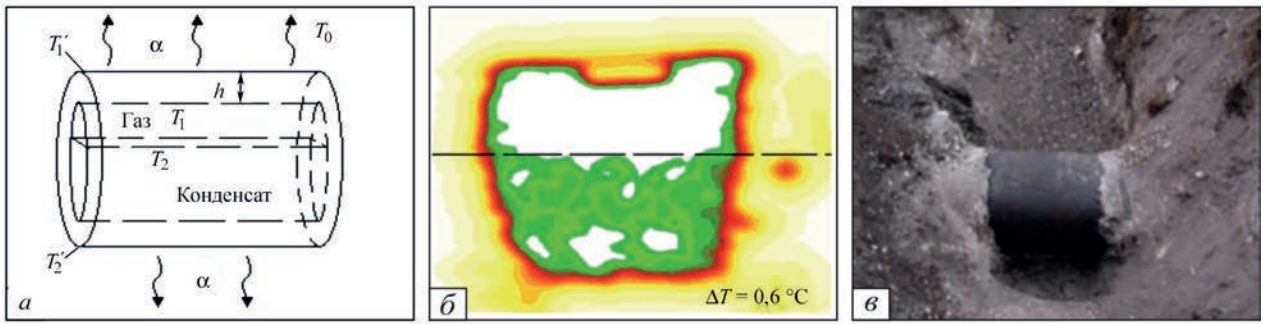


Рис. 7. Визначення вмісту рідкої фази в газопроводах: теплофізична модель газопроводу з конденсатом (а); оброблена термограма (б); ділянка трубопроводу (в)

ти схему статичної роботи споруди і знизити його несучу здатність. Тому нерівноважне температурне поле тіла греблі є однією з інформативних ознак, яку використовують для оцінювання показників міцності гідротехнічних споруд.

У межах спільного проекту з НДІ Укргідропроєкт (м. Харків) перед колективом НТЦ було поставлено завдання провести термографічне обстеження гідротехнічних споруд Дніпровської ГЕС [16]. Основою методики проведення обстеження був ГОСТ 26629–85 «Будівлі та споруди. Метод тепловізійного контролю теплоізоляції огорожувальних кон-

струкцій» (нині ГОСТ Р 54852–2011, аналог ISO 6781–83) і накопичений досвід термографічного обстеження великогабаритних об'єктів енергетики та будівництва. Обстеження полягало у проведенні зовнішнього та внутрішнього термографування. Об'єктами внутрішнього термографування були: верхня потерна водозливної греблі, галереї щитової стінки ГЕС-1 і машинного залу ГЕС-2. Об'єктами зовнішнього термографування були: щитова стінка ГЕС-1, водозливна гребля, водоводи ГЕС-2. Схему проведення термографічного обстеження показано на рис. 8, а. З'ясувалося, що температура води

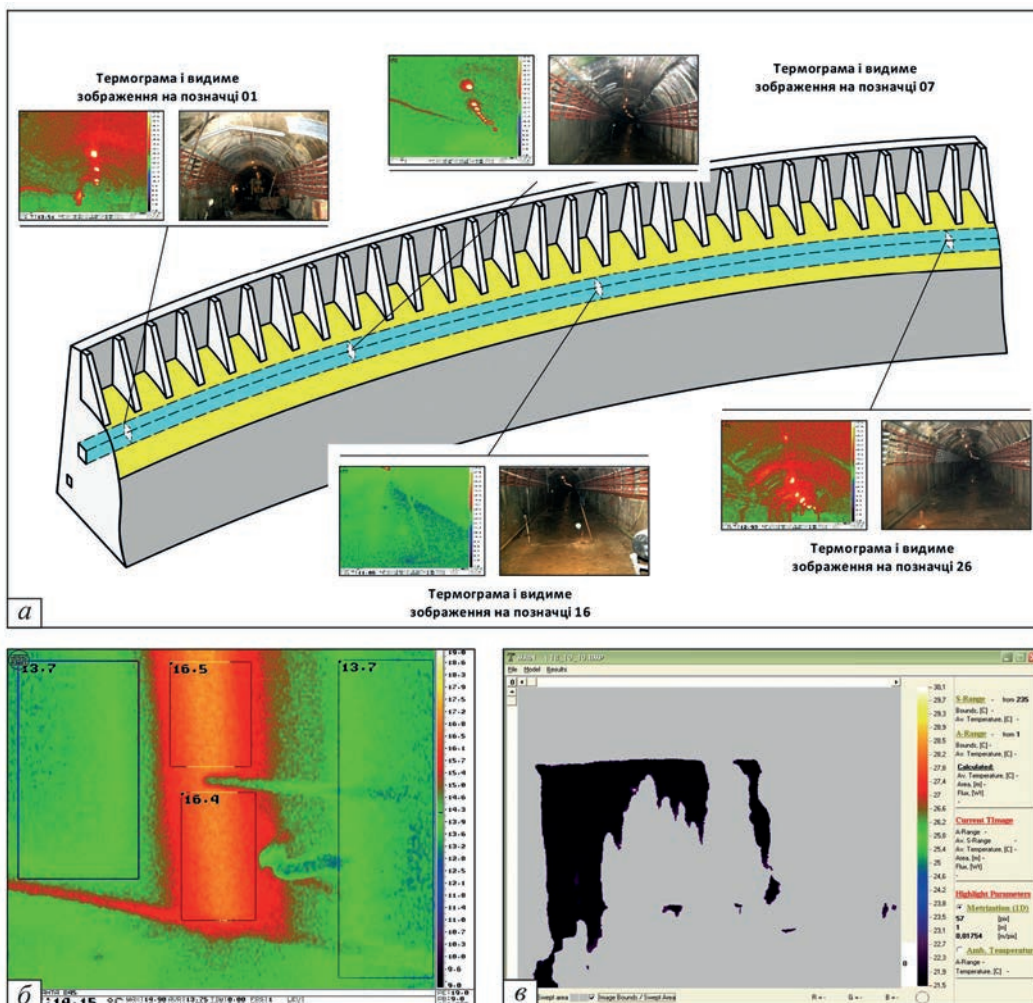


Рис. 8. Термографування гідроспоруд: схема огляду верхньої потерни (а); інфільтрація води біля позначки 36 (б); інтерфейс програми «Thermo V1 05» для розрахунку площі зволжених ділянок (в)

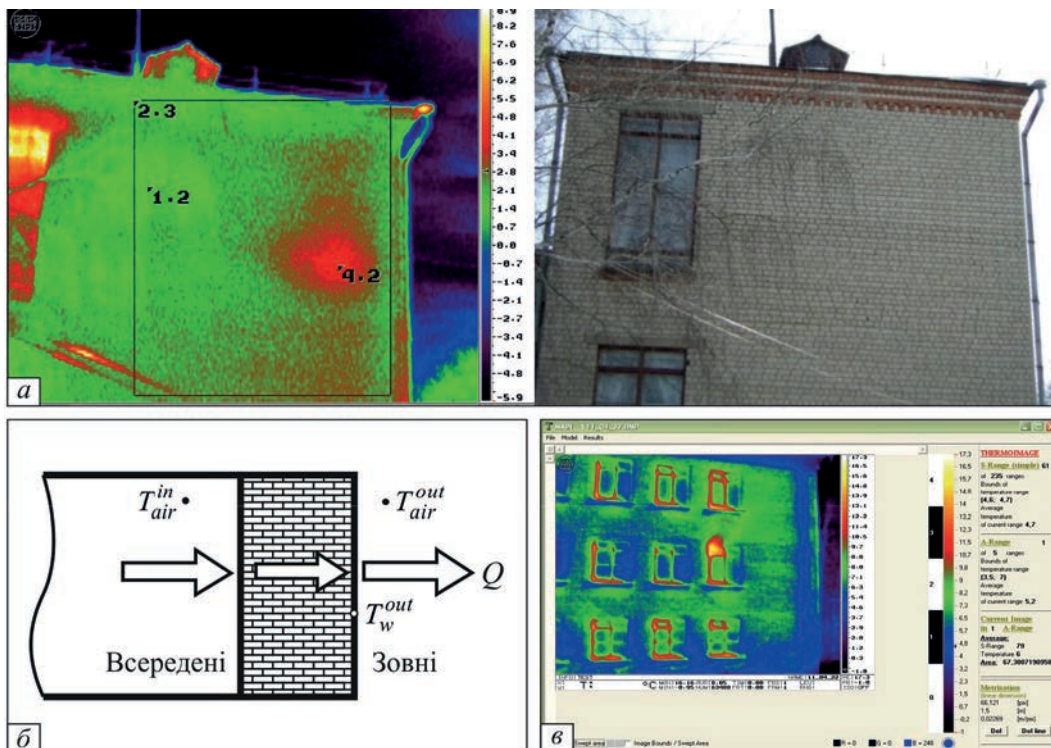


Рис. 9. Визначення теплових втрат: термограма будівлі школи-інтернату (сел. Кочеток) (а); схема і параметри для визначення теплових втрат (б); інтерфейс програми «ThermoSquare v.1.0» (в)

на різних ділянках відрізняється. На всіх ділянках із підвищеною середньою температурою виявлено фільтрацію води з температурою на 2...4 °C вище.

Температура «гарячої» води відрізняється від води, яка постійно протікає по всій довжині потерни (рис. 8, б). Такі відмінності температури води пояснюються різною швидкістю її інфільтрації. Отже, виявлені теплові аномалії вказують на деякі порушення цілісності тіла греблі. Продуктивність термографічного методу дає змогу проводити температурний моніторинг і створювати теплові паспорти гідроспоруд України [17]. Подальшим напрямом досліджень може бути вдосконалення апарату обробки термограм з метою підвищення їхньої інформативності та створення баз даних щодо кожного об'єкта з використанням розробленої програми «Thermo V1 05» (рис. 8, в).

Велике значення у технічній політиці держави має енерго- та ресурсозбереження. Комунально-побутовий сектор становить 30 % загального потенціалу економії паливно-енергетичних ресурсів країни, тому велика роль відводиться економії тепла на опалення житлових та адміністративних будинків.

У сучасній тепловізійній практиці в основному превалює якісна картина та існує певний розрив між теоретичними аспектами теплопередачі та практичними обстеженнями будівель і споруд. Останнім часом розвивається тенденція кількісної інтерпретації результатів. Термографісти НТЦ на основі теплофізичного підходу кількісно оцінили теплові втрати низки житлових і адміністративних будівель (рис. 9) після їхньої тепловізійної зйомки [18, 19].

Отримані термограми (рис. 9, а) обробляли за допомогою програми підрахунку площ «ThermoSquare v.1.0» (рис. 9, б, в) і стандартного програмного забезпечення тепловізора. Наприклад, оцінені теплові втрати будівлі гуртожитку університету становили 364 Гкал/рік. [19]. Порівняння з фактичними витратами за лічильником тепlopункту показало, що розрахована оцінка на 32 % вища. Розбіжності, близькі до цього результату, отримані й іншими авторами, які використовували зазначену методику в своїх дослідженнях [20].

Висновки

Дослідження в області теплової діагностики, проведені НТЦ «Термоконтроль», показали ефективність методу під час виявлення дефектів та оцінювання стану великої кількості об'єктів, перелік яких постійно поповнюється.

Застосування теплового методу під час діагностування стану металу трубопроводів можна визначити як експрес-контроль, що дає змогу швидко встановлювати за температурними аномаліями області для детального вивчення іншими, більше точними методами. Це дасть змогу економити час, підвищити якість і оперативність контролю. Тепловізійний моніторинг дозволить визначати ділянки першочергових досліджень з метою оптимізації обсягу контролю.

Розроблені теоретичні аспекти та методика проведення тепловізійних обстежень мають великі перспективи застосування у трубопровідному транспорті. Крім нафтогазового

комплексу великою потенційною сферою застосування теплового методу є міське комунальне господарство.

Показано ефективність сучасних статистичних методів для діагностування технічного стану однотипного газоперекачувального обладнання. Застосування запропонованої методики може бути поширено на інші види машин і механізмів.

Проведені термографічні обстеження об'єктів Дніпровської ГЕС дали змогу створити теплову картину гідропороди. Тепловізійний моніторинг може бути важливою частиною діагностичних методів оцінювання стану тіла греблі.

Для вирішення проблеми теплозбереження термографія не має альтернативи. Показано, що застосування теплофізичного підходу дає змогу кількісно оцінювати теплові втрати.

Теплофізичний підхід, який застосовується під час діагностування, дав змогу перейти до кількісного оцінювання стану досліджуваних об'єктів. Це є великим кроком до прогнозування залишкового ресурсу об'єктів із великим експлуатаційним напруженням.

Список літератури

1. Стороженко В.А., Маслова В.А. (2004) *Термография в диагностике и неразрушающем контроле*. Харьков, Смит.
2. Волков Я.А., Денисов С.С., Стороженко В.А. (1975) Оптико-электронное устройство для регистрации тепловых полей. *Приборы и техника эксперимента*, **5**, 36.
3. Стороженко В.А., Денисов С.С., Волков Я.А. и др. (1977) Тепловизор с одноосевым оптико-механическим сканированием. *Оптико-механическая промышленность*, **12**, 23–24.
4. Рапопорт Д.А., Стороженко В.А., Денисов С.С. (1979) Оптико-электронное устройство для регистрации термопрофилей. *Приборы и техника эксперимента*, **5**, 268.
5. Стороженко В.А., Мешков С.Н., Денисов С.С. (1985) Бесконтактный контроль тепловых режимов погружных электродвигателей. *Дефектоскопия*, **10**, 86–87.
6. Стороженко В.А., Мешков С.Н., Денисов С.С., Чижов В.Н. (1989) Комплект измерительной аппаратуры для ТНК. *Там же*, **3**, 94–96.
7. Стороженко В.А., Денисов С.С., Мешков С.Н. и др. (1989) Радиометр для теплового контроля с улучшенными эксплуатационными характеристиками. *Там же*, **4**, 85–86.
8. Стороженко В.А. (1991) Радиометр «РАД-1» для тепловой диагностики энергоустановок. *Там же*, **9**, 93–94.
9. Meshkov, S.N., Orel, R.P. (2017) Thermal Control for Metal Condition Testing in Pipelines of Nuclear Power Plant. *Metrology and Metrology Assurance 2017. Proceedings of the symposium, Sozopol, Bulgaria*, pp. 112–118.
10. Вавилов В.П. (2009) *Инфракрасная термография и тепловой контроль*. Москва, Спектр.
11. Стороженко В.А., Мельник С.И., Кухарев Ю.А. (2001) Новые методики для анализа информации при тепловом контроле трубопроводов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 45–48.
12. Стороженко В.А., Мельник С.И., Кухарев Ю.А. (2002) *Повышение информативности теплового метода контроля трубопроводов. Физические методы и засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів*. Зб. наук. пр., Львів, **7**, 166–169.
13. Стороженко В.О., Мешков С.М., Саприкин С.О., Орел Р.П. (2007) Застосування термографії для діагностики

технічного стану газоперекачувального обладнання. *Методи та прилади контролю якості*, **18**, 7–9.

14. Стороженко В.А., Малик С.Б. (2009) Температурная диагностика машин и механизмов на основе статистического подхода. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 33–35.
15. Стороженко В.А., Мешков С.Н., Саприкин С.А., Мягкий А.В. (2009) Применение термографического метода контроля для определения содержания жидкой фазы в газопроводах. *Методи та прилади контролю якості*, **23**, 12–15.
16. Мешков С.Н., Орел Р.П., Маслова В.А. (2006) Термографическое обследование гидротехнических сооружений Днепропетровской ГЭС. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 56–60.
17. Мешков С.М., Герасимович Н.М., Смеляков К.С. (2006) Термографування гідротехнічних споруд Дніпровської ГЕС. Ч. 2. Внутрішнє термографування. *Гідроенергетика України*, **3**, 31–33.
18. Стороженко В.А., С.Б. Малик (2007) Экспресс-метод оценки теплопотерь в зданиях путем термографического обследования. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 49–50.
19. Meshkov, S.N., Orel, R.P., Korotenko, A.E. (2019) Heat losses estimation of buildings and constructions by thermographic examination. In: *Proc. of Int. Symposium on Metrology and Metrology Assurance 2019, (Sozopol, Bulgaria)*, 105–108.
20. Вавилов В.П. (2010) Пессимистический аспект тепловизионного энергоаудита строительных сооружений. *Дефектоскопия*, **12**, 49–54.

References

1. Storozhenko, V.A., Maslova, V.A. (2004) *Thermography in Diagnostics and Non-Destructive Testing*. Kharkov, Smit [in Russian].
2. Volkov, Ya.A., Denisov, S.S., Storozhenko, V.A. (1975) Optical-electronic device for registration of thermal fields. *Pribyry i Tekhnika Eksperimenta*, **5**, 36 [in Russian].
3. Storozhenko, V.A., Denisov, S.S., Volkov, Ya.A., Bedraty, V.I., Rapoport D.A. (1977) Thermal imager with single-axis optical-mechanical scanning. *Optiko-Mekhanicheskaya Promyshlennost*, **12**, 23–24 [in Russian].
4. Rapoport, D.A., Storozhenko, V.A., Denisov, S.S. (1979) Optical-electronic device for registration of thermal profiles. *Pribyry i Tekhnika Eksperimenta*, **5**, 268 [in Russian].
5. Storozhenko, V.A., Meshkov, S.N., Denisov, S.S. (1985) Contactless test of thermal conditions of submersible electric motors. *Defektoskopiya*, **10**, 86–87 [in Russian].
6. Storozhenko, V.A., Meshkov, S.N., Denisov, S.S., Chizhov, V.N. (1989) Set of measuring instruments for NDT. *Ibid.*, **3**, 94–96 [in Russian].
7. Storozhenko, V.A., Denisov, S.S., Meshkov, S.N., Chizhov, V.N., Galkin, A.V., Piskunova, L.E. (1989) Radiometer for thermal monitoring with improved performance. *Ibid.*, **4**, 85–86 [in Russian].
8. Storozhenko, V.A. (1991) Radiometer “RAD-1” for thermal diagnostics of power plants. *Ibid.*, **9**, 93–94 [in Russian].
9. Meshkov, S.N., Orel, R.P. (2017) Thermal control for metal condition testing in pipelines of nuclear power plant. In: *Proc. of Int. Symposium on Metrology and Metrology Assurance 2017, (Sozopol, Bulgaria)*, 112–118.
10. Vavilov, V.P. (2009) *Infrared Thermography and Thermal Control*. Moscow, Spektr [in Russian].
11. Storozhenko, V.A., Mel'nik, S.I., Kukharev, Yu.A. (2001) New procedures for information analysis in thermal control of pipelines. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 45–48 [in Russian].
12. Storozhenko, V.A., Mel'nik, S.I., Kukharev, Yu.A. (2002) Increasing the information content of the thermal method of pipeline inspection. In: *Physical methods and means of control of media, materials and products, Zb. Nauk. Prats, Lviv*, **7**, 166–169 [in Russian].
13. Storozhenko, V.O., Meshkov, S.M., Saprykin, S.O., Orel, R.P. (2007) Application of thermography for diagnostics of

- the technical state of gas-pumping equipment. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, **18**, 7–9 [in Ukrainian].
14. Storozhenko, V.A., Malik, S.B. (2009) Temperature diagnostics of machines and mechanisms based on a statistical approach. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 33–35 [in Russian].
 15. Storozhenko, V.A., Meshkov, S.N., Saprykin, S.A., Myahkyi, A.V. (2009) Thermographic control method to determine the content of the liquid phase in gas pipelines. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, **23**, 12–15 [in Russian].
 16. Meshkov, S.N., Orel, R.P., Maslova, V.A. (2006) Thermographic examination of hydraulic structures of the Dnieprovskii HPS. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 56–60 [in Russian].
 17. Meshkov, S.M., Gerasymovych, N.M., Smelyakov K.S. (2006) Thermography of hydraulic engineering equipment of the Dnieprovskii HPS. Pt 2: Internal thermography. *Gidroenergetyka Ukrainy*, **3**, 31–33 [in Ukrainian].
 18. Storozhenko, V.A., Malik, S.B. (2007) Express-method of evaluation of thermal losses in buildings by thermographic examination. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 49–50 [in Russian].
 19. Meshkov, S.N., Orel, R.P., Korotenko, A.E. (2019) Heat losses estimation of buildings and constructions by thermographic examination. In: Proc. of Int. Symposium on *Metrology and Metrology Assurance 2019*, (Sozopol, Bulgaria), 105–108.
 20. Vavilov, V.P. (2010) Pessimistic aspect of thermal imaging energy audit of building structures. *Defektoskopiya*, **12**, 49–54 [in Russian].

EXPERIENCE OF RESEARCH AND TECHNICAL CENTER «THERMOCONTROL» IN THE AREA OF THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING

V.O. Storozhenko, S.M. Meshkov, R.P. Orel, O.V. Miahkyi

RTC «Thermocontrol» of Kharkiv National University of Radio Electronics, 14 Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine.

E-mail: volodymyr.storozhenko@nure.ua

The main results of research and development in the field of creating technologies for the thermal control method carried out at the Research and Technical Center «Thermocontrol» of the Kharkiv National University of Radioelectronics since 1973 and up to the now, are presented. The results of application of thermal technologies for diagnosing bearing wear and electrical insulation faults in submersible electric motors of the SEM series used for oil production are shown. The results of monitoring the condition of metal in pipelines of the NPP unit rooms are given. It turned out that the defects caused by cavitation erosion have a “heat trace” and can be registered by the thermal method. The technology for diagnosing underground pipelines and leaks in them is described. A method of statistical processing of the results of thermal diagnostics of gas-pumping units of main gas pipelines has been developed, which includes creation of a virtual reference sample of the selected part of the unit; informative features for comparing temperature fields were formed; a decision rule was formulated, which indicates the deviation of the selected informative features from the reference value. The results of calculating the level of the liquid phase in gas pipelines have been experimentally confirmed. The results of a thermographic survey of the hydrotechnical structures of the Dnieper HPP are presented. The quantitative indicators of heat losses of buildings during thermal imaging inspection are given. The directions and prospects of the development of the thermal method are considered. Ref. 20, Fig.9

Key words: thermal non-destructive testing, thermal diagnostics, submersible motors, underground pipelines, cavitation erosion, hydraulic structures, heat losses

Надійшла до редакції 02.02.2021

НОВА КНИГА

Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Збірник наукових статей за результатами, отриманими у 2016–2020 рр. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – Київ, 2020. – 712 с.



До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2016–2020 рр., до реалізації якої було залучено інститути НАН України. Мета програми – створення нових матеріалів з подовженим ресурсом роботи, розроблення наукових положень управління надійністю і довговічністю відповідальних об'єктів, створення ефективних методів, технічних засобів і технологій для оцінки і подовження ресурсу обладнання провідних галузей промисловості, нафто- та газопроводів, мостів, будівельних і транспортних конструкцій.

Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

З книгою можна ознайомитись в бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Попередні чотири випуски збірників «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, споруд та машин» у відкритому доступі за посиланням: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/compilations>.

ЗМІСТ

- РОЗДІЛ 1.** Розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної безпеки та авіакосмічної техніки.
- РОЗДІЛ 2.** Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації.
- РОЗДІЛ 3.** Розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації.
- РОЗДІЛ 4.** Розробка ефективних методів оцінки та подовження ресурсу об'єктів атомної енергетики.
- РОЗДІЛ 5.** Розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної безпеки та авіакосмічної техніки.
- РОЗДІЛ 6.** Створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості.
- РОЗДІЛ 7.** Підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій.
- РОЗДІЛ 8.** Розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної безпеки з метою подовження терміну їх експлуатації.
- РОЗДІЛ 9.** Матеріали з подовженим ресурсом роботи для екстремальних умов експлуатації.

ГОДОГРАФИ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНІЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ В ПРОКАТНІЙ КЛІТІ

М.М. Кіпін

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

У процесі розробки алгоритмів для систем вібраційного діагностування особлива увага приділяється вивченню основних типів прокатного обладнання, визначаються вібраційні характеристики, враховуються особливості впливу технології прокатки металу на технічний стан агрегатів. В результаті проведених обстежень та аналізу вібраційних параметрів на клітях середньосортного А/С 400/215 і листопрокатного станів НТЛС-1680 був обраний варіант монтажу датчиків вібрації у вертикальному напрямку вздовж головної лінії приводу. Даний варіант орієнтації акселерометрів забезпечив максимальну інформативність системи в процесі діагностування прокатного обладнання. Конструктивною особливістю поворотних клітей середньосортного стану є наявність кутового редуктора, при цьому датчики, встановлені на підшипниках вхідного і вихідного валів, розташовані ортогонально один щодо одного. Синхронна реєстрація вібраційних сигналів вимірювальним модулем системи «Корунд» дозволила виявити певні закономірності в роботі конусного зачеплення в кутовому редукторі кліті. В результаті об'єднання на програмному рівні тимчасових сигналів, що зчитуються з парних датчиків, побудовані годографи просторового положення контрольних точок валів, які знаходяться в зачепленні. Запропонований метод візуалізації дозволяє виконувати оцінку технічного стану кутового редуктора кліті на додаток до існуючих алгоритмів, реалізованих в системі вібраційної діагностики. Бібліогр. 9, рис. 9.

Ключові слова: прокатний стан, поворотна кліть, кутовий редуктор, система вібраційної діагностики, годограф, технічний стан

Безперервний дрібно-середньосортний прокатний стан А/С 400/215 фірми «SMS Meer» призначений для виробництва арматури і фасонного сортового прокату і складається з послідовно розташованих шести чорнових, шести проміжних, шести чистових клітей і двох високошвидкісних блоків. Виходячи з особливостей безперервної прокатки в багатокліткових станах розроблено систему діагностики «Корунд» для своєчасного виявлення дефектів і зниження витрат комбінату на ремонти [1]. Програмне забезпечення системи являє собою комплекс програмних засобів, призначених для оперативної оцінки стану обладнання та виявлення ймовірних дефектів і несправностей в процесі експлуатації. У системі реалізовані алгоритми пошуку і визначення дефектів спектральним методом, проте в процесі аналізу отриманих даних були виявлені деякі взаємозв'язки і закономірності, що стосуються взаємодії зубчастих пар кутового редуктора поворотної кліті [2].

У конічних коліс з круговими зубами концентрація навантаження на обмеженій ділянці робочої поверхні взаємодіючих зубів виникає внаслідок осьових зсувів зубчастих коліс. Взаємний перекис коліс впливає на довговічність і надійність роботи редуктора [3].

Наявність ударних навантажень в прокатному обладнанні посилюють перераховані явища при експлуатації конічних передач, викликають появу шуму, зростання рівня вібрації, місцеве підвищення навантажень, концентрацію напруг, що, в кінцевому рахунку, може привести до прискореного розвитку дефектів, задирів і поламок зубів. Узагальнений аналіз форм вібраційних сигналів конічного редуктора дозволив зробити допущення, що побудова годогра-

фів на основі записаних акселерометрами сигналів (розташованими в безпосередній близькості один до одного), може вказувати на наявність несправностей в елементах сполучення.

Мета роботи:

- шляхом дослідних вимірювань на діючих поворотних клітях прокатного стану встановити можливість використання годографа вібрації для діагностування вузлів обладнання;

- враховуючи взаємне розташування точок контролю на кутовому редукторі поворотної кліті, виконати вимірювання синхронних тимчасових вибірок сигналу і отримані результати перетворити в просторовий образ – годограф;

- систематизувати види побудованих годографів з передбачуваними несправностями;

- оцінити відповідність зорових образів з поточним технічним станом сполучених вузлів кліті в процесі роботи з'єднувальної муфти, проміжного підшипника 61830 і безпосередньо зубчастого зачеплення кутового редуктора.

Опис дослідження. Поворотна кліть є компактною конструкцією, призначеною для оперативної і автоматичної зміни конфігурації з горизонтальної осі на вертикальну вісь прокатки слябу (рис. 1). Активна фаза роботи кутового редуктора здійснюється тільки при вертикальному положенні кліті. Для забезпечення безперервного контролю технічного стану і своєчасного виявлення дефектів на обладнанні встановлено систему вібраційної діагностики.

Кутовий редуктор поворотної кліті є ортогональною конічною передачею з пересічними осями, у якій кут між осями сполученої пари коліс дорівнює 90° , передавальне число складає 1,0 (рис. 2).

© М.М. Кіпін, 2021

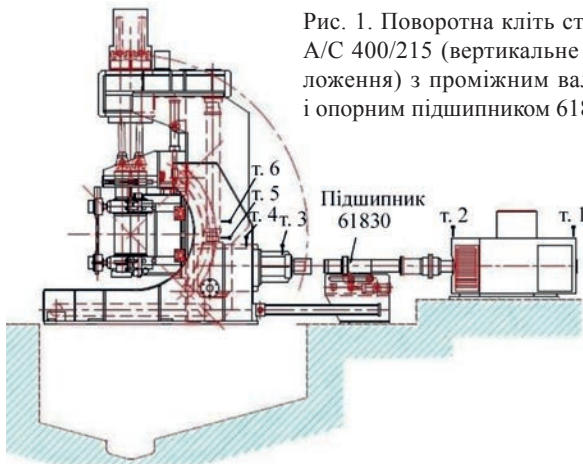


Рис. 1. Поворотна кліть стану А/С 400/215 (вертикальне положення) з проміжним валом і опорним підшипником 61830

В ході здійснення контролю коливань ведучого вала у т. 3 і т. 4, а також коливань веденого вала у т. 5 і т. 6 кутового редуктора було помічено деяку схожість в поведінці конструкції з методом контролю орбіт, які відображують рух центру вала ротора у підшипнику ковзання, який детально описано у літературі [4]. У підсумку дослідження сформувалося припущення, що вібраційні параметри редуктора, записані аналогічним засобом, можна перетворити в зоровий образ і на основі аналізу отриманих фігур оцінювати технічний стан валів, шестерень і підшипників кочення. У якості вимірюваного па-

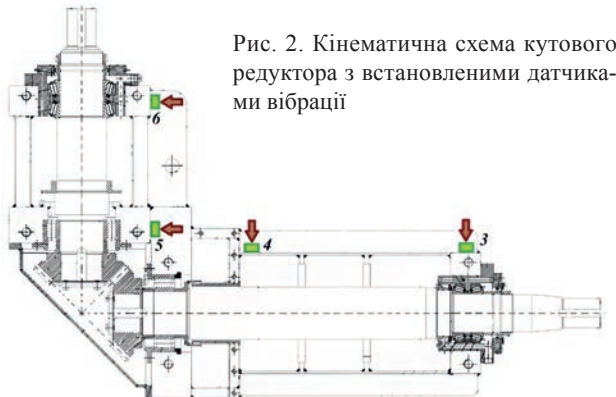


Рис. 2. Кінематична схема кутового редуктора з встановленими датчиками вібрації

раметра прийнято абсолютне віброприскорення (віброшвидкість або вібропереміщення) корпусу редуктора в зоні розташування опорних підшипників.

Беручи до уваги взаємний вплив вібрації відповідних пар акселерометрів т. 3/т. 6 і т. 4/т. 5, форми цих сигналів були об'єднані на програмному рівні в криві (годографи), що відображають просторове положення контрольних точок зубчастого зачеплення в процесі обертання.

Публікацій, присвячених подібному методу аналізу стану клітей, виявити не вдалося. Огляд літературних джерел, присвячених діагностиці прокатного обладнання [5–9], в сукупності з отриманими результатами роботи діагностичної системи «Корунд» привів до розуміння того, що існуючі алгоритми аналізу необхідно доповнити новим методом.

Отримані результати. Годограф, побудований за сумою форм тимчасових сигналів двох пар взаємно перпендикулярних датчиків т. 3/т. 6 і т. 4/т. 5 згідно з кінематичною схемою кутового редуктора, представлений на рис. 3. Аналіз отриманих результатів вказує на те, що у всіх випадках, наведених в даній статті, виявлені несправності супроводжувалися запланованою зупинкою клітей для огляду і технічного обслуговування або ремонту.

Слід зазначити, що після ремонтного впливу побудована крива має форму, близьку до круглої хмари (центр перетину «+» розташований всередині хмари), що свідчить про бездефектний технічний стан зубчастого зачеплення кутового редуктора.

Залежно від типу сортаменту, виробленого на стані, поворотна кліть гідравлічною системою постійно переводиться з вертикального положення в горизонтальне і назад. Внаслідок цього між опорними поверхнями напрямних і станиною потрапляє пила, окалина, завислі частинки, що призводить до порушення співвісності валів між електродвигуном і редуктором кліті. Було помічено, що в разі виникнення порушення співвісності валів в лінії сполучення кліті електродвигун-проміжний вал-кутовий редук-

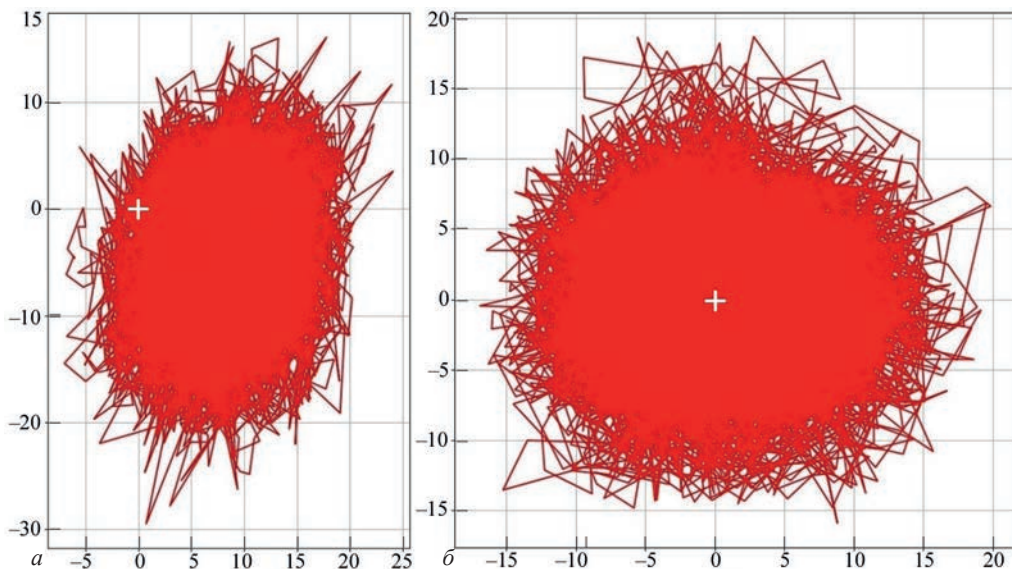


Рис. 3. Годограф кутового редуктора за умов бездефектного стану: а – т. 3/т. 6, б – т. 4/т. 5

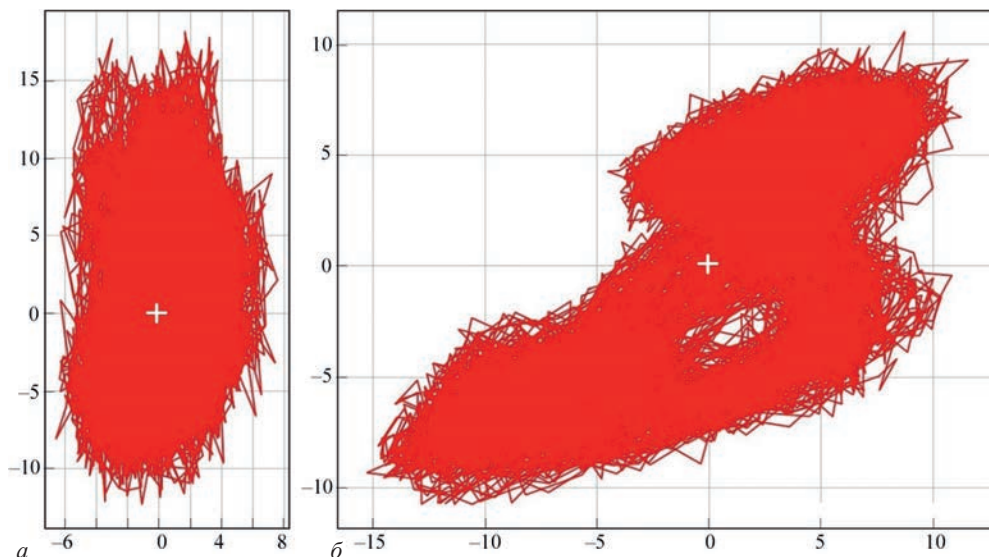


Рис. 4. Годограф кутового редуктора у випадку порушення співвісності валів в лінії сполучення кліті електродвигун-проміжний вал-кутовий редуктор: *a* – т. 3/т. 6, *б* – т. 4/т. 5

тор, форми хмар витягуються в еліпс (рис. 4, *a*) або приймають вигляд вигнутих петель (рис. 4, *б*).

Після технічного обслуговування кліті і усунення порушення співвісності валів годографи хмар придбали щільну круглу форму.

На рис. 5 наведені годографи контрольних точок кутового редуктора поворотної кліті при нестачі мастила в з'єднувальній муфті проміжного валу-кутового редуктора, при цьому хмари мають складну щільну форму без розсіювання сигналу. Годограф у т. 3/т. 6

(рис. 5, *a*) нагадує символ нескінченності, а годограф у т. 4/т. 5 (рис. 5, *б*) схожий на метелика. Слід врахувати, що т. 3 розташована в безпосередній близькості до місця локальної несправності (див. рис. 1).

Дефекти кріплення болтових з'єднань, як, наприклад, послаблення кріплення корпусу проміжного підшипника до опорної рами, ведуть до розсіювання хмари, побудованої у координатах точок т. 3/т. 6. А хмара, сформована без точками т. 4/т. 5, має ромбовидну щільну форму без розсіювання сигналу (рис. 6).

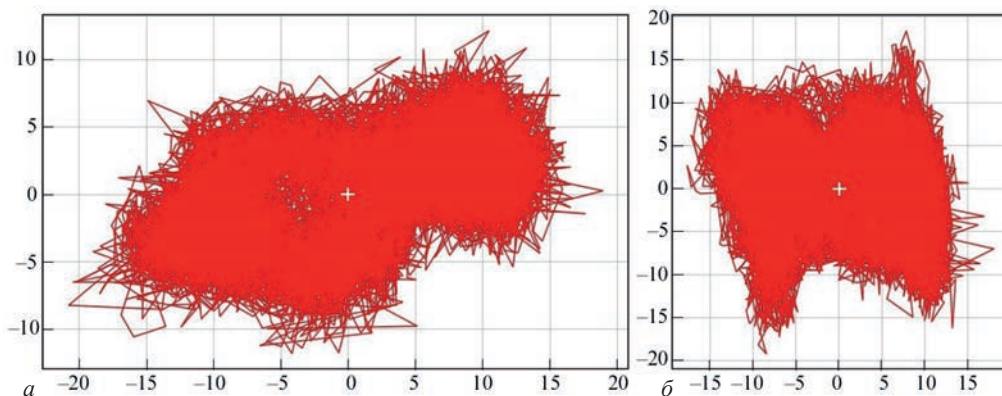


Рис. 5. Годограф кутового редуктора у випадку нестачі мастила в муфті проміжного валу-кутового редуктора: *a* – т. 3/т. 6, *б* – т. 4/т. 5

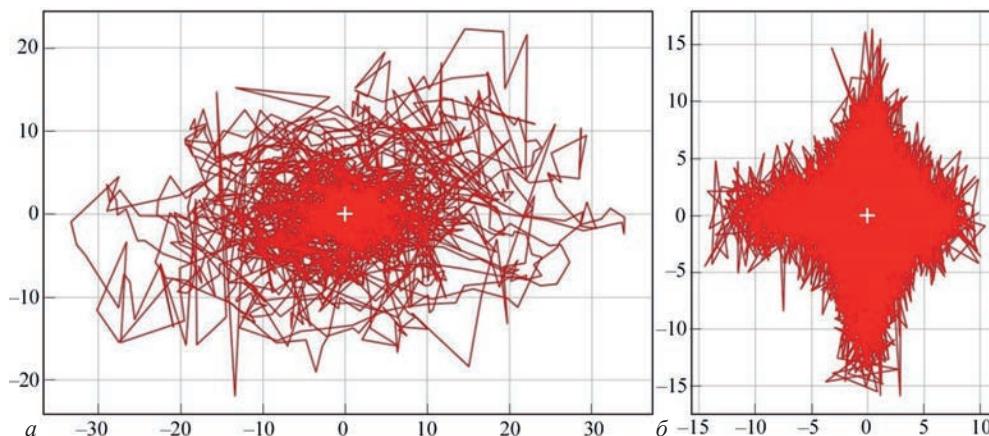


Рис. 6. Годограф кутового редуктора кліті чистової групи у випадку ослаблення болтів кріплення корпусу проміжного підшипника 61830 до опорної рами: *a* – т. 3/т. 6, *б* – т. 4/т. 5

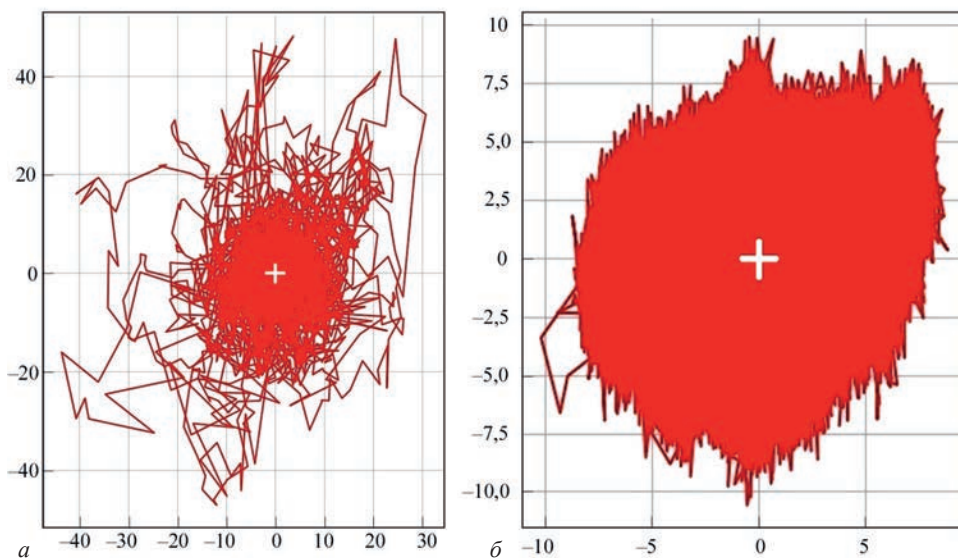


Рис. 7. Годограф кутового редуктора кліті проміжної групи у випадку ослаблення болтів кріплення корпусу проміжного підшипника 61830: *a* – т. 3/т. 6, *б* – т. 4/т. 5

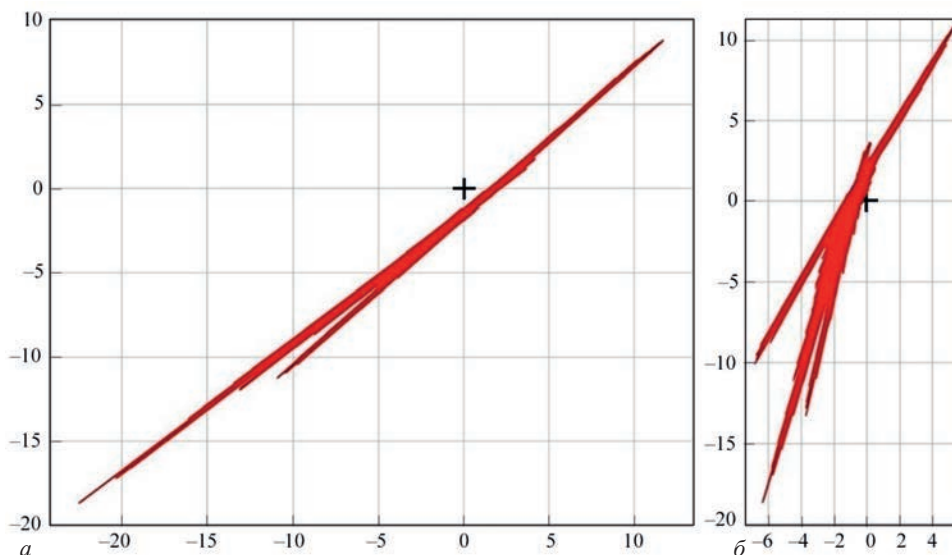


Рис. 8. Годограф кутового редуктора поворотної кліті при наявності тріщини опорної лапи корпусу опорного проміжного підшипника 61830: *a* – т. 3/т. 6, *б* – т. 4/т. 5

Звертає на себе увагу той факт, що форми хмар, побудованих в координатах точок т. 4/т. 5 кутових редукторів чистової і проміжної групи клітей, які характерні для дефекту кріплення болтових з'єднань, дещо відрізняються один від одного. Можливо, дана обставина пов'язана з особливостями навантаження клітей в процесі прокатки (рис. 6 і 7).

Ослаблення болтів кріплення корпусу проміжного підшипника до опорної рами кліті проміжної групи викликає значне розсіювання хмари, побудованої у координатах точок т. 3/т. 6 (рис. 7, *a*). Хмара, сформована точками т. 4/т. 5 (рис. 7, *б*), має щільну форму без розсіювання сигналу.

На рис. 8 представлений годограф кутового редуктора поворотної кліті при наявності діагональ-

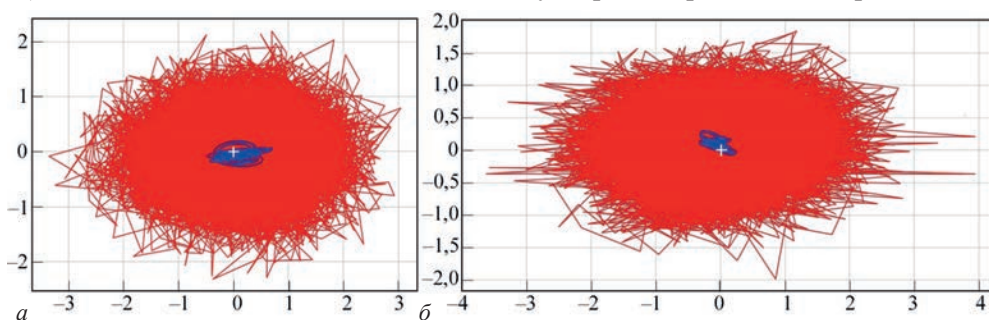


Рис. 9. Годограф кутового редуктора після ремонту опорної лапи корпусу підшипника 61830: *a* – т. 3/т. 6, *б* – т. 4/т. 5

ної тріщини в опорній лапі корпусу проміжного підшипника 61830. При цьому переміщення контрольних точок в просторі має вигляд сильно витягнутих петель (центри перетинів «+» розташовані за межами петель).

Після виконання відновлювального ремонту траверси поворотної кліті годограф кутового редуктора знову має вигляд щільної хмари без розсіювання сигналу. Слід зазначити, що амплітуда коливань редуктора знизилася у ~ 4 рази, центри перетинів «+» розташовані всередині хмар, криві в центральній зоні побудовані для першої гармоніки частоти обертання $f_{06} = 18$ Гц (рис. 9).

Виявлені несправності в процесі експлуатації поворотних клітей і рекомендації, запропоновані обслуговуючому персоналу для їх усунення, вказують на те, що запропонований метод може використовуватися діагностами при виконанні вібраційного аналізу кутових редукторів.

Висновки

Шляхом натурних вимірювань у прокатних клітках встановлено можливість визначення стану ділянок обладнання побудовою годографів вібрації. На конкретних прикладах показано зв'язок виду (форми) годографа з такими факторами, як порушення співвісності валів, нестача мастила в проміжній муфті, послаблення болтів кріплення.

Обсяг інформації, який зчитується з датчиків вібрації, розташованих на кутовому редукторі поворотної кліті, дозволив реалізувати додатковий метод візуалізації вібраційних параметрів у вигляді кривої, що відображає взаємне переміщення контрольних точок у просторі.

Запропонований метод має високу інформативну наочність і може бути застосований в якості додаткового засобу аналізу даних при діагностуванні поточного технічного стану зубчастого зачеплення кутового редуктора, з'єднувальної муфти проміжного валу і опорного підшипника 61830 поворотної кліті стану А/С 400/215.

HODOGRAPHS OF INTERACTION OF ELEMENTS OF BEVEL DRIVE IN THE ROLLING STAND

M.M. Kipin

SE «DIAMECH-UKRAINE», 19 Kirgizska str., 61105, Kharkiv, Ukraine. E-mail: diamech@diamech.com.ua

During development of algorithms for vibration diagnostic systems, special attention is given to studying the main types of rolling equipment, vibration characteristics are determined, and features of the influence of metal rolling technology on the technical condition of the equipment are taken into account. As a result of the conducted examination and analysis of vibration parameters of stands of medium section A/C 400/215 and flatting NTL-1680 rolling mills, a variant of mounting vibration sensors in the vertical direction along the main line of the drive was selected. This variant of accelerometer orientation ensured maximum informativeness of the system during diagnostics of rolling equipment. A design feature of turning stands of medium section mill is the availability of angular gearbox. Here, the sensors mounted on the bearings of the input and output shafts, are located orthogonally relative to each other. Synchronous recording of vibration signals by a measuring module of "Corundum" system allowed revealing certain regularities in the operation of bevel gear in the angular gearbox of the stand. Combining on the software level the temporary signals read from paired sensors resulted in plotting the hodographs of spatial position of reference points of the engaged shafts. The proposed method of visualization allows assessment of the technical condition of the angular gearbox of the stand, in addition to the available algorithms realized in vibration diagnostics system. Ref. 9, Fig. 9

Keywords: rolling mill, turning stand, angular gearbox, vibration diagnostic system, hodograph, technical condition

Надійшла до редакції 04.12.2020

Список літератури

- (2019) ТУ 4277-030-54981193-06. Комплексы виброконтроля промышленного оборудования стационарные «КОРУНД». Технические условия. Москва.
- Баглай А.В., Воробьев В.В., Гузеев А.Н., Кипин М.М. (2020) Система вибродиагностики для оборудования прокатного производства. *Черные металлы*, **2**, 62–68.
- Калашников С.Н., Калашников А.С. (1983) *Зубчатые колеса и их изготовление*. Москва, Машиностроение.
- Гольдин А.С. (1999) *Вибрация роторных машин*. Москва, Машиностроение.
- Шварцбург Л.Э., Филиппов С.В. (1998) Особенности выбора типа датчиков положения по критерию «обобщенная желательность». Москва, ВНИИТЭМР, **8** (202), с. 126.
- Шефер Х.-Ю. (2001) Состояние диагностики машин в черной металлургии. *Черные металлы*, **6**, 28–31.
- Айнер Х., Хелекаль Г., Хохрайтер В. и др. (2001) Системы диагностики и мониторинга в черной металлургии. Там же, **6**, 41–45.
- Белодеденко С.В., Ибрагимов М.С. (2017) Выбор интервалов между инспекциями при предупредительном обслуживании металлургического оборудования. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **3**, 93–102.
- Веренев В.В., Большаков В.И., Путники А.Ю. и др. (2011) *Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680*. Монография. Днепропетровск, ИМА-пресс.

References

- (2019) TU 4277-030-54981193-06: *Stationary complexes «KORUND» for vibration control of industrial equipment*. Specifications, Moscow [in Russian].
- Baglai, A.V., Vorobiov, V.V., Guzeev, A.N., Kipin, M.M. (2020) System of vibration-based diagnostics for rolling production equipment. *Chyornye Metally*, **2**, 62–68 [in Russian].
- Kalashnikov, S.N., Kalashnikov, A.S. (1983) *Gear wheels and their manufacture*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Goldin, A.S. (1999) *Vibration of rotary machines*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Shvartsburg, L.E., Filippov, S.V. (1998) Features of selection of position sensor type by the criterion of «generalized desirability». Moscow, VNIITEMP, *Chyornye Metally*, **8** (202), 126 [in Russian].
- Shefer, Kh.Yu. (2001) State of diagnostics of machines in ferrous metallurgy. *Chyornye Metally*, **6**, 28–31 [in Russian].
- Aigner, Kh., Khelekal, G., Khohraiter, V. et al. (2001) Systems of diagnostics and monitoring in ferrous metallurgy. *Ibid.*, **6**, 41–45 [in Russian].
- Belodedenko, S.V., Ibragimov, M.S. (2017) Selection of intervals between inspections in preventive maintenance of metallurgical equipment. *Metal. i Gornorud. Promyshl.*, **3**, 93–102 [in Russian].
- Verenev, V.V., Bolshakov, V.I., Putniki, A.Yu. et al. (2011) *Dynamic processes in 1680 wide-strip mill stands*: Monography. Dnepropetrovsk, IMA-press [in Russian].

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ГОЛОВНЫМИ ВОЛНАМИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ Ду-300 НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Н.П. Разыграев, А.Н. Разыграев

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

В настоящей работе ставилась цель ознакомить читателей с опытом разработки специалистами НПО «ЦНИИТМАШ» УЗК головными волнами трубопроводов из аустенитных сталей, который был применен при оценке состояния трубопроводов Ду-300 на Чернобыльской АЭС. Библиогр. 16, табл. 2, рис. 14.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль (УЗК), трубопроводы, аустенитная сталь, продольная волна, поперечная волна, головная волна (ГВ), подповерхностная волна, сварное соединение, методика контроля, межкристаллитное коррозионное растрескивание под напряжением, трещина

В 1986–1987 гг. на АЭС с РБМК-1000 впервые были обнаружены и идентифицированы повреждения вследствие межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением (МКРПН) в сварных соединениях водоуравнительных трубопроводов барабан-сепараторов РБМК. В те годы эффективной и работоспособной методики УЗК для выявления дефектов МКРПН не существовало.

На Чернобыльской АЭС в 1987 г. было проведено опытное исследование возможности применения УЗК методом ГВ для выявления трещин МКРПН в сварных соединениях трубопроводов из аустенитных сталей (АСС) Ду-300 (325×12 мм). Исследования проводилось на специальной катушке (отрезке трубы) с реальным сварным соединением, в котором предположительно имелась трещиноподобная несплошность, с помощью искателя ГВ ИЦ-91 («тандем»).

Следует отметить, что ещё на самых ранних этапах исследований УЗК ГВ при разработке первой методики контроля было отмечено наличие различных паразитных сигналов при УЗК изделий, элементов и сварных соединений толщиной до 30 мм [1, 2]. В «Методике контроля изделий головными ультразвуковыми волнами» 1974 г. (п. 1) не рекомендовалось применять УЗК ГВ при толщине элементов менее 30 мм. Наши исследования всех ГВ [3], возникающих одновременно с первой ГВ (рис. 1), позволили идентифицировать все эти «ложные» сигналы и учесть их в новых современных методиках, способах и операциях УЗК. Так, например, в связи с применением искателя ГВ типа «тандем» ИЦ-91 была разработана новая технология УЗК «корневой тандем» для выявления дефектов вблизи и на донной поверхности. В этом способе была исследована поперечная волна (рис. 2), возбуждаемая в стали под третьим критическим углом (она намного мощнее, чем ГВ), а затем использована

ещё более мощная поперечная волна с углом ввода $\sim 35^\circ$, возбуждаемая падающей под углом $\sim 29^\circ \dots 30^\circ$ продольной волной с максимальным коэффициентом прохождения в сталь (рис. 2, а).

Позднее при разработке методики УЗК сварных соединений биметаллических трубопроводов Ду-850 искатель КТ-35 был переработан в КТ-45 с углом ввода поперечной волны 45° , который обеспечил возможность выявления поднаплавочных трещин с наружной поверхности трубопровода (рис. 2, б). Эта методика УЗК была включена в ПНАЭГ-7-30-91 [4].

Первичные исследования УЗК ГВ на трубе толщиной 12...15 мм на Чернобыльской АЭС вновь продемонстрировали существенные сложности при расшифровке множества сигналов УЗК от отражателей в АСС. Определенный оптимизм появился при обследовании и фиксации сигналов ГВ на участке, где предположительно располагалась трещина. Быстро создать методику выявления трещин в АСС трубопроводов Ду-300 с помощью УЗК ГВ не удалось. Первичные исследования показали

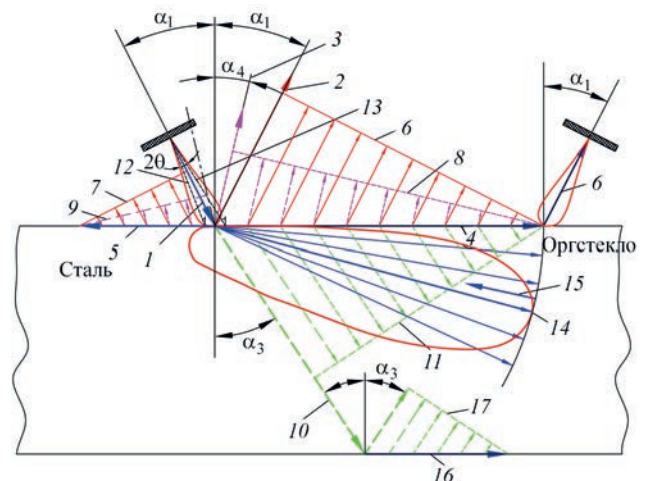


Рис. 1. Образование волн на границах раздела и вблизи них при критических и околоскритических углах

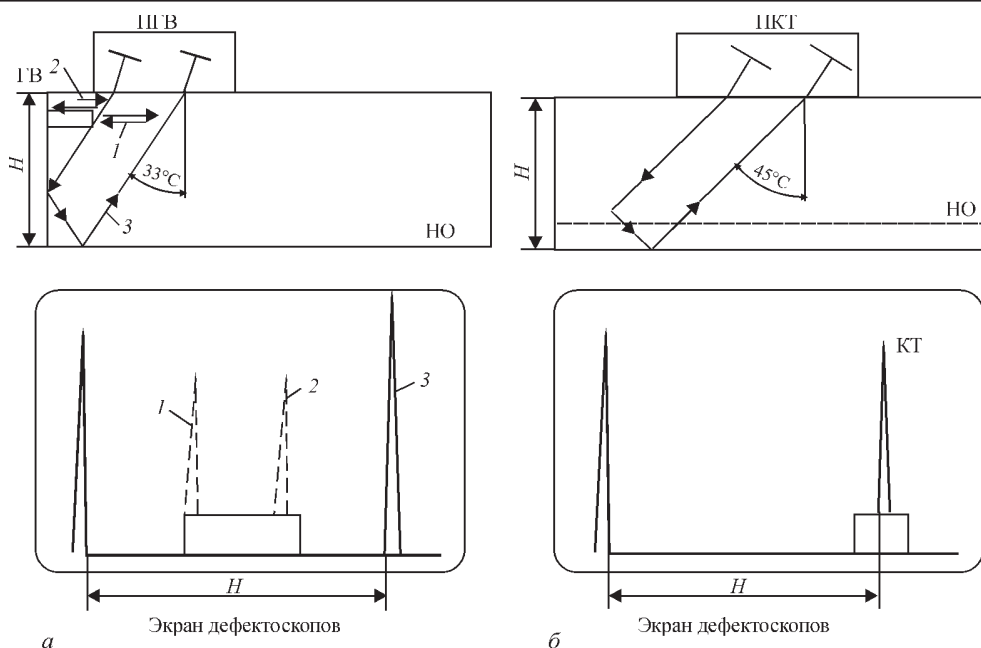


Рис. 2. Схемы УЗК и выявления дефектов в подповерхностном слое и под аустенитной антикоррозионной наплавкой: а – головными волнами; 1 и 2 – ход лучей и эхо-сигналы ГВ соответственно от дна плоскодонного отверстия и от торца настроечного образца (НО); 3 – ход лучей и сигнал поперечной волны (ПГВ) по схеме «корневой тандем» (КТ); б – ход лучей по схеме «корневой тандем» КТ-45 поперечными волнами (ПКТ) при выявлении поднаплавочных трещин при УЗК снаружи трубопровода или сосуда

необходимость проведения специальных исследований и разработки новой методики УЗК.

На новом этапе работ по УЗК АСС Ду-300 совместные изыскания с конструкторами и эксплуатационниками АЭС с РБМК-1000 показали:

- трещины МКРПН инициируются на внутренней поверхности сварных соединений вблизи линии сплавления и распространяются на расстоянии 0,7...1,0 мм вглубь сечения и в кольцевом направлении по окружности трубы;

- трещины, берущие начало как бы в одной точке (на расстоянии 1,5 мм от линии сплавления в корне шва), «паукообразно» распространяются преимущественно в основной металл и в меньшей степени в металл шва.

Трещинообразование по механизму МКРПН происходит при одновременном присутствии трех основных факторов:

- коррозионно-активной среды с присутствием кислорода в теплоносителе (около 30 мкг/кг);
- узкой чувствительной зоны (балл 1-3 зерна аустенита) вследствие повышенного тепловложения от многопроходной сварки;
- высоких растягивающих напряжений и наличия концентраторов на внутренней поверхности сварного соединения [5].

На рис. 3 представлена трещина МКРПН, выявленная УЗК ГВ после металлографического исследования сварного соединения опускного трубопровода. Выявленные кольцевые трещины инициируются в околошовной зоне (ОШЗ). Они имеют весьма слабое раскрытие, ветвистый характер и тонкие ответвления от магистральной

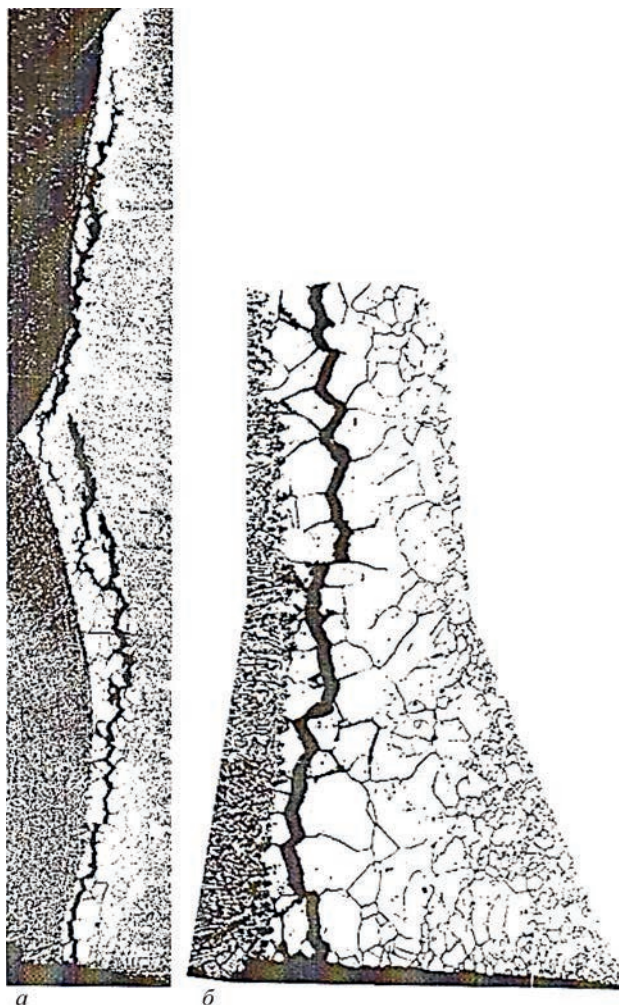


Рис. 3. Трещина МКРПН после металлографического исследования аустенитного сварного соединения опускного трубопровода: общий вид трещины и структуры металла АСС (а), начало трещины (б)

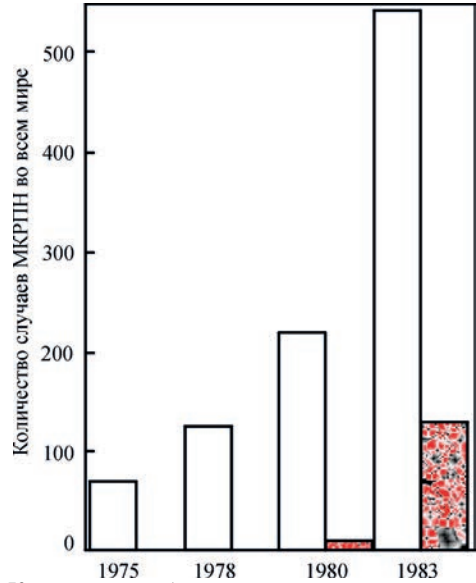


Рис. 4. Количество наблюдавшихся повреждений на трубопроводах реакторной установки типа BWR в начальный период проявления механизма МКРПН: □ – для всех трубопроводов; ■ – для всех трубопроводов свыше 20 дюймов (510 мм) трещины. Высота трещин может достигать 2/3 толщины трубы. На участках с трещинами металл в ОШЗ имеет крупнозернистую структуру (балл 1, 2, 3), образовавшуюся под воздействием термического цикла многопроходной сварки. Такая структура границы обуславливает образование эхо-сигналов поперечной волны из-за их отражения от границы зерен с различным размером. Эти

паразитные сигналы поперечных волн от структурных неоднородностей металла при отсутствии несплошностей объясняют физическую суть невозможности качественной УЗД аустенитных сварных соединений поперечными УЗ волнами.

Следует отметить, что на АЭС западных стран и Японии с реакторами BWR с проблемой растрескивания сварных соединений трубопроводов, изготовленных из аустенитных сталей, столкнулись в начале 70-х г. XX ст. [6]. В Германии впервые трещины были замечены на втором блоке Дрезденской АЭС в 1994 г. [7]. На АЭС США проблема коррозионного растрескивания имела большие масштабы. В среднем 25 % сварных соединений имели показания на наличие трещины, причем на некоторых блоках уровень дефектности доходил до 50 % [8]. Количество наблюдавшихся повреждений на трубопроводах реакторных установок BWR в начальный период проявления механизма показано на рис. 4 [9].

На АЭС РФ проблема трещинообразования в сварных соединениях трубопроводов 325×16 мм (Ду-300) реакторов РБМК-1000 остро встала в начале 1997 г. Сначала множественные трещины были выявлены на опускных трубопроводах Ленинградской АЭС, затем на Курской АЭС.

В 1997 г. в связи с массовым появлением трещин в трубопроводах Ду-300 концерн «РОСЭНЕРГОАТОМ» поставил вопрос о разработке эффективной методики УЗК на АЭС.

Конструкционные элементы подготовки кромок свариваемых деталей согласно рекомендациям ОП 1513-72 и ПНАЭГ 7-009-89

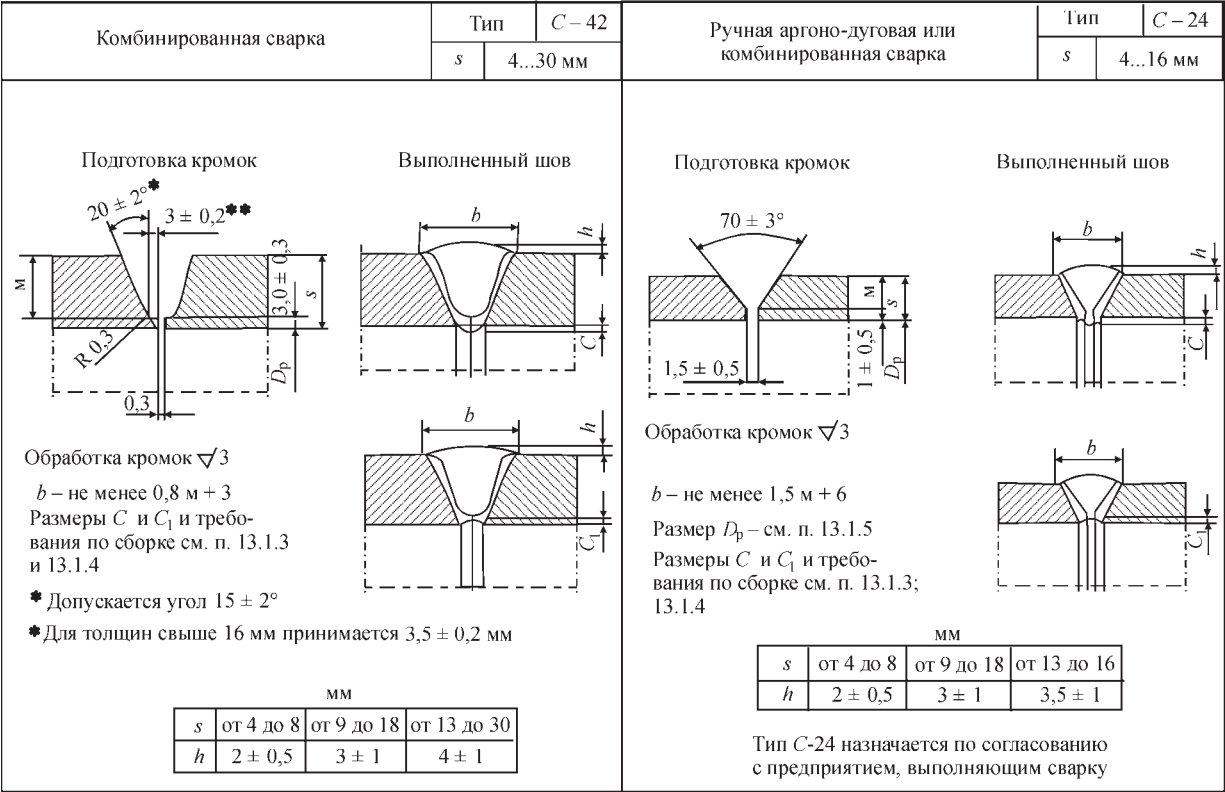


Рис. 5. Конструкции сварных соединений трубопроводов Ду-300 в соответствии с рекомендациями ОП 1513-72 и ПНАЭГ-7-09-89

Исследования и анализ показали, что основные сложности УЗК АСС трубопроводов Ду-300 состоят в следующем:

- высокий уровень радиационного фона, что предполагает высокую производительность и простоту методики УЗК из-за невозможности длительного пребывания контролера на объекте;

- сложная конструкция сварного соединения (рис. 5), включающая проточки различных размеров (по ширине и высоте) и углы её скоса на внутренней поверхности, а также возможные технологические отражатели и дефекты в корне шва (провисания, утяжины, несоосность труб);

- сварное соединение имеет сложную крупнозернистую структуру в ОШЗ и в металле шва, нагружено внутренним давлением, усилиями от самокомпенсации труб и оборудования. Кроме того, в нем присутствуют остаточные сварочные напряжения (рис. 6);

- ширина (валика) усиления установлена в диапазоне 16...20 мм, но встречается и больше. Вблизи усиления могут иметь место технологические утяжины и неровности, образованные при механическом удалении брызг от сварки, которые препятствуют созданию качественного акустического контакта искателя с металлом;

- сварные соединения располагаются в различных пространственных положениях, в стесненных условиях (в особенности на напорных трубопроводах), на различной высоте.

В связи с этим перед разрабатываемой технологией УЗК АСС поставили задачи:

- выявлять кольцевые протяженные (более 10 мм) трещиноподобные несплошности (эксплуатационные трещины) высотой 2 мм и более в сварном шве и ОШЗ;

- не предусматривать выявление технологических (объемных) несплошностей, регламентируемых требованиями «Правил контроля по радиографии».

При выборе способа УЗК руководствовались следующими соображениями. Многочисленные исследования по УЗК сварных соединений из аустенитных сталей показали, что при УЗК попе-

речными волнами основным препятствием для его применения является перебраковка, связанная с образованием отраженных сигналов от границ зерен, трансформацией волны на этих границах и образованием ложных сигналов. По форме, характеру и времени распространения эти сигналы практически не отличаются от сигналов от несплошностей и технологических отражателей.

Одновременно и параллельно с нашими исследованиями на АЭС Украины и РФ поступали предложения от стран Западной Европы и США на использование их технологий УЗК поперечными волнами. Похожая «Методика УЗК АСС с толщиной стенки 10...25 мм в процессе монтажа и эксплуатации атомных станций» МТ 34-70-023-86 существовала и в СССР. Она была разработана в 1986 г. в московском ВТИ и предложена специалистами Ровенской АЭС для использования на Чернобыльской АЭС и специалистами ВНИИ АЭС – на Курской АЭС.

Изучение опыта применения этих технологий показало, что они, могут быть применены для контроля сварных соединений оборудования и трубопроводов, выполненных из нестабилизированных аустенитных сталей. Это связано с тем, что их растрескивание происходит на расстоянии 2...7 мм от линии сплавления. При таком расположении трещин, выходящих на внутреннюю поверхность трубопровода, они располагаются в основном металле с мелкозернистой структурой и могут быть выявлены при УЗК через основной металл. При прозвучивании через сварной шов использование поперечных волн не эффективно. То есть такая технология может быть рекомендована только для УЗК сварных соединений аустенитных нестабилизированных сталей с двусторонним доступом к ним – для обеспечения выявления трещин с обеих сторон сварного соединения.

НПО «ЦНИИТМАШ» на протяжении многих лет проводил исследования возможности применения продольных волн, в том числе головных, для выявления дефектов (трещин) в аустенитных наплавках и под антикоррозионными наплавками, которые имеют сложную дендритную структуру наплавленного металла и зон сплавления между слоями наплавов и с перлитным металлом. Были разработаны эффективные методики выявления трещин в наплавках и под наплавками в биметаллических сосудах, трубопроводах и их сварных соединениях: корпусах реакторов ВВЭР-1000, трубопроводах ГЦК Ду-850 и КМПС Ду-800 и др. [10], новые нормы по УЗК антикоррозионных наплавов [11, 12]. Впервые были разработаны методики определения толщины аустенитных наплавов и плакировок с помощью УЗК (ПНАЭ Г-7-31-91) [13].

С учетом перечисленных факторов и обнаружением новых закономерностей нами вновь пред-

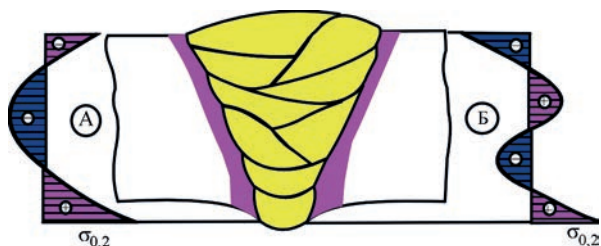


Рис. 6. Схемы распределения остаточных напряжений (σ_y) в ОШЗ сварных соединений, выполненных в несколько проходов (многослойная сварка): стыковое сварное соединение пластин (А), стыковое сварное соединение трубопровода 325×16 мм из стали 08Х18Н10Т (Б)

ложено использовать для УЗК сварных соединений трубопроводов Ду-300 продольные волны головного типа. При этом мы опирались на следующие базовые положения:

- при использовании ГВ они распространяются почти по нормали к преимущественной ориентации трещины в сварном соединении. Как известно, при таком взаимодействии волны и отражателя обеспечиваются наилучшие условия для его выявления;

- ГВ имеют максимальную скорость распространения по сравнению с другими волнами. Это обеспечивает наилучшие возможности для интерпретации сигнала о наличии отражателя и его идентификацию;

- ГВ на одной и той же частоте в сравнении с другими волнами имеют максимальную длину волны. Это обеспечивает возможность получения сравнительно высокого соотношения сигнал-шум от несплошности на фоне от крупнозернистой структуры шва и ОШЗ. Дополнительным фактором, способствующим этому, является то, что колебания волны происходят в направлении её распространения. Эти факторы также являлись предпосылкой для выявления трещин в сварном соединении при наличии одностороннего доступа к сварному шву с помощью прозвучивания через сварной шов;

- до проведения настоящих исследований к негативным факторам мы относили сравнительно

небольшую толщину трубы: 15 или 16 мм, а при наличии проточки 11...12 мм. Считалось, что близость донной поверхности может мешать контролю из-за образования паразитных сигналов в стробируемой зоне контроля. Выше уже отмечено, что в первых методиках УЗК ГВ сосудов, трубопроводов, наплавов с аустенитной структурой рекомендовалось контролировать детали толщиной 30 мм и более, чтобы исключить влияние сигналов поперечных волн, падающих на внутреннюю поверхность под третьим критическим углом.

Важнейшим фактором мы считали правильный выбор конструкции искателя головных волн: «тандем» или «дуэт». С учетом формы и диаметра поверхности трубопровода, ширины контролируемой зоны сварного соединения, возможных неровностей и ям (утяжин) вблизи сварного шва, расположения, ориентации и формы трещин, необходимости прозвучивания в полном объеме всего сварного соединения по толщине (в том числе под усилением шва) и ширине с самого начала мы склонились в пользу схемы «тандем». Были разработаны специализированные искатели ГВ ПГЦ-300. Испытания искателей, последующие результаты исследований и практика контроля и выявления дефектов подтвердили правильность выбора конструкции искателя.

Были проведены дополнительные исследования структуры поля подповерхностной ГВ в кон-

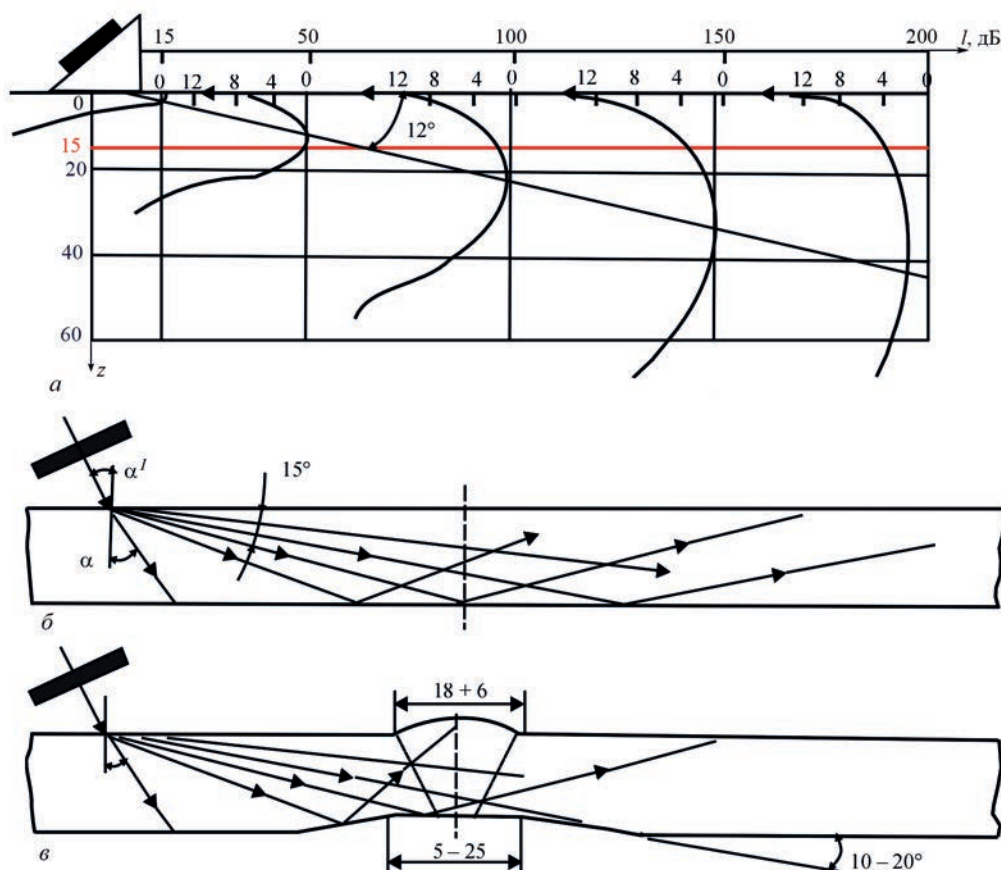


Рис. 7. Структура акустического поля ГВ в полубезграничной среде (а), в листе (б) и в сварном соединении трубопровода (в)

тролируемом металле. На рис. 7 показаны известные закономерности для поля подповерхностной ГВ в полубезграничной среде: луч с максимальной амплитудой как бы отжимается от контактной поверхности, распространяется под углом $12...15^\circ$ к ней, а амплитуда ГВ достаточно быстро убывает с расстоянием [14].

Исследования на листах толщиной $8...20$ мм показали, что в них имеет место концентрация акустической энергии подповерхностной волны в ограниченном объеме, в том числе за счет переотражений на донной поверхности при больших углах падения продольных волн (они как бы скользят над донной поверхностью). Было обнаружено, что при расстояниях $30...40$ мм и более от точки выхода излучателя максимальное значение амплитуды подповерхностной головной волны распространяется вдоль внутренней поверхности и располагается на высоте $2...5$ мм от донной поверхности. То есть вблизи донной поверхности образуется ультразвуковой поток, распространяющийся параллельно донной поверхности.

Исследование акустического поля на трубах 325×15 мм показало наличие закономерностей, полученных на листах. В трубе вблизи донной поверхности также имеет место акустический поток подповерхностной ГВ. Результаты этих исследований и полученные закономерности в значительной мере способствовали разработке технологии УЗК корневых трещин в сварных соединениях Ду-300.

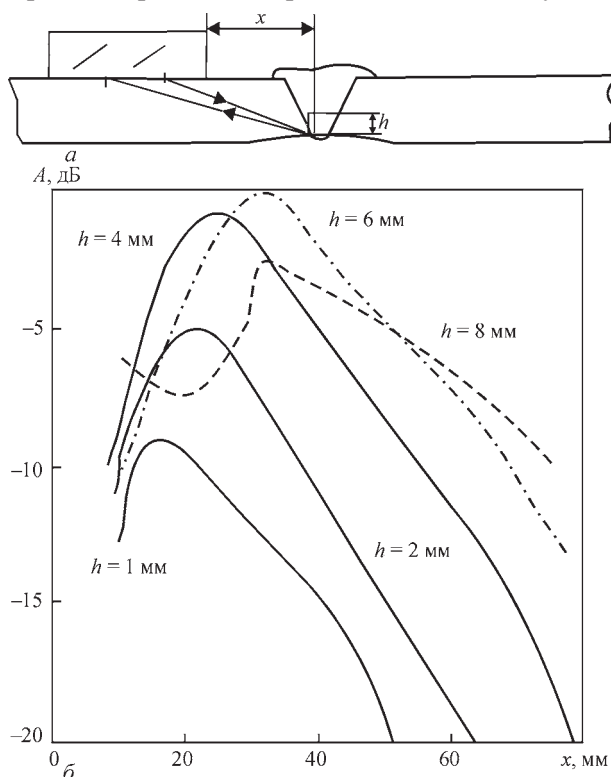


Рис. 8. Схема УЗК (прозвучивание через основной металл) (а) и зависимость амплитуды эхо-сигнала ГВ A от расстояния между искателем и отражателем x для различной высоты трещин h (б)

Исследование возможности выявления трещин в АСС трубопроводов Ду-300 проводилось на специальных образцах со сварным швом и реалистичными имитаторами трещин: вертикальными пазами различной высоты и плоскодонными отверстиями в корне сварных швов. Исследования проводились при прозвучивании сварного соединения:

- с двух сторон от шва;
- при различных расстояниях между сварным швом (имитатором трещины) и искателем;
- при различной высоте трещин.

На рис. 8, 9 представлены схемы прозвучивания и результаты измерений зависимостей амплитуды эхо-сигнала ГВ от трещины различной высоты в функции расстояния между искателем и отражателем. Рис. 8 представляет зависимости при прозвучивании через основной металл, когда трещина расположена со стороны кромки шва, ближней к искателю, а на рис. 9 – при прозвучивании через сварной шов, когда трещина расположена со стороны дальней кромки сварного шва.

Анализ полученных зависимостей показал, что при выявлении корневых трещин высотой 2 мм и более имеется возможность обнаружения трещин с соотношением сигнал-шум 12 дБ и более при прозвучивании как через основной металл, так и через сварной шов.

Дальность обнаружения трещин высотой 2, 4, 6 и 8 мм при измерении на поисковом уровне, рав-

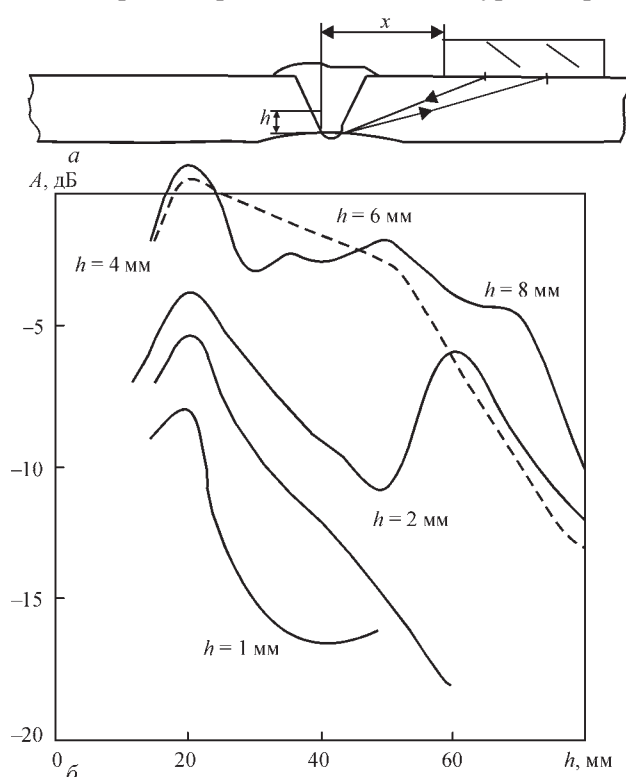


Рис. 9. Схема УЗК (прозвучивание через основной шов) (а) и зависимость амплитуды эхо-сигнала ГВ A от расстояния между искателем и отражателем x для различной высоты трещин h (б)

ном максимальной амплитуде от трещины высотой 2 мм плюс 6 дБ, достигает соответственно 43, 60, 73 и около 80 мм при прозвучивании через основной металл и 23, 30, 60 и 74 мм – при прозвучивании через сварной шов. Несомненно, что при прозвучивании через сварной шов на величину эхо-сигнала влияет ослабление сигнала в сварном шве и на границах зерен, а также переотражение на неровностях в корне шва. Эти же факторы влияют на дальность обнаружения трещин. Наличие дополнительных экстремумов в зависимостях амплитуды от расстояния связано с наличием наклонной проточки и интерференцией импульсов эхо-сигналов, непосредственно отраженных от дефектов и с переотражением от донной поверхности (на скосе).

Важным результатом представляется возможность реализации способа оценки высоты (термин «эквивалентной высоты» предложен нами по аналогии с эквивалентной площадью дефектов) трещины путем измерения дальности обнаружения трещины и сопоставления ее с высотой имитатора трещины в виде прямоугольного паза с известной высотой. На рис. 10 на основе зависимостей, представленных на рис. 8, 9 и экспериментальных данных на трещинах известной высоты изображена связь высоты корневой трещины с дальностью её обнаружения. Эта связь может характеризоваться прямой зависимостью.

Полученные результаты показали, что предложенный способ УЗК позволяет:

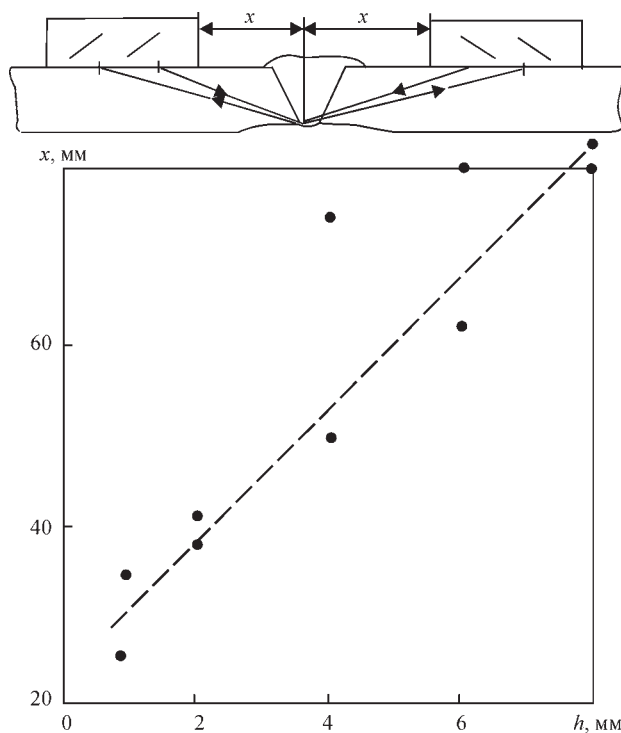


Рис. 10. Зависимость между эквивалентной высотой трещины в АСС h и максимальной дальностью обнаружения дефекта x различной высоты при УЗК ГВ

– обнаруживать корневые трещины различной высоты в АСС трубопроводов и сосудов, выполненных по технологии, рекомендуемой для АЭС РБМК;

– обнаруживать корневые протяженные (более 10 мм) трещины высотой 1 мм и более;

– использовать при УЗК несколько информативных признаков, а именно:

- амплитуду эхо-сигнала;
- условную протяженность трещины;
- эквивалентную высоту трещины, определяемую через условную ширину отражателя как разницу расстояний между искателем и отражателем при различных уровнях чувствительностей (или при различных амплитудах эхо-сигнала) для оценки высоты корневой трещины.

В процессе исследований возможности УЗК ГВ сварных соединений трубопроводов Ду-300 на объектах была выявлена специфическая особенность данной технологии УЗК. На рис. 11 показаны схема хода лучей в контролируемой трубе, экран дефектоскопа и реальные изображения сигналов от трещины при различных расстояниях искателя от сварного шва. Особенность состоит в том, что наряду с эхо-сигналом подповерхностной ГВ, а он, как мы и предполагали, располагается ближе всех к зондирующему импульсу, имеют место сопровождающие его импульсы других головных, продольных и поперечных волн, которые распространяются по различным траекториям, показанным на рис. 11. Научиться правильно настроить дефектоскоп с искателем на настроечном образце (НО) с имитатором трещины и отличать основной сигнал ГВ от сопровождающих на НО и реальном АСС в трубопроводе, как в последствие оказалось, являлось одной из главных задач контролера УЗК при освоении новой технологии контроля.

При отработке и исследованиях методики на реальных сварных соединениях трубопроводов РБМК проведены сравнительные исследования разработанного способа УЗК с другими способами и методами контроля. Исследования и испытания проводились совместно со специалистами АЭС, конструкторских, научно-исследовательских и других организаций, надзорных органов. Использовались стандартная и нестандартная аппаратура, методики УЗК, внешний осмотр, радиографический контроль (РГК), капиллярный контроль, металлография. Некоторые результаты представлены ниже.

На всех АЭС, где методика предполагалась к использованию, проводились специальные работы по определению эффективности и достоверности методики и в особенности в эффективности выявления реальных трещин МКРПН. Совместно со специалистами Курской АЭС проведено обследование сварного соединения 23М2 водоопускного трубопровода УЗК и металлографией.

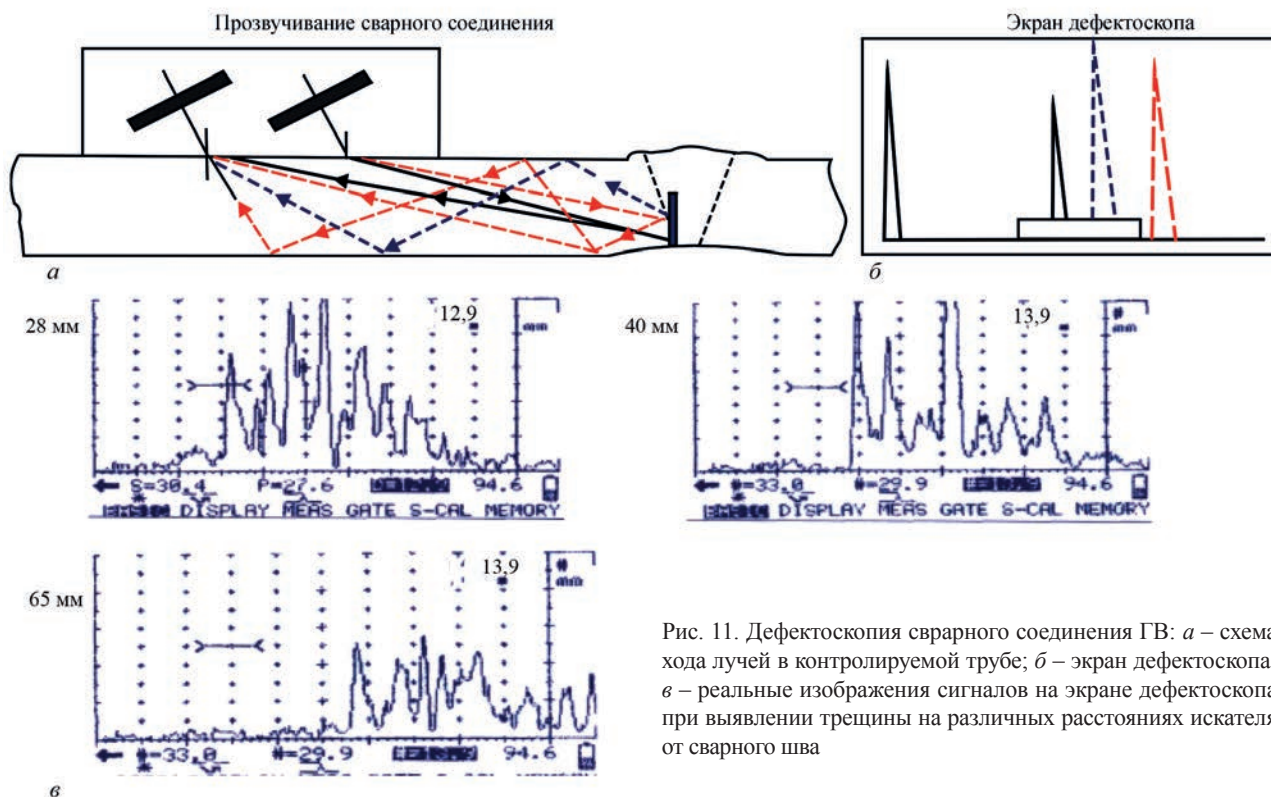


Рис. 11. Дефектоскопия сварного соединения ГВ: а – схема хода лучей в контролируемой трубе; б – экран дефектоскопа; в – реальные изображения сигналов на экране дефектоскопа при выявлении трещины на различных расстояниях искателя от сварного шва

По результатам радиографического контроля сварное соединение 23М2 водоупусного трубопровода было вырезано из трубопровода в виде катушки длиной 500 мм. Исследование сварного соединения производилось с применением разработанного НПО «ЦНИИТМАШ» проекта «Методики УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов 325×15 АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7-96 и методики ВТИ «Методика УЗК АСС с толщиной стенки 10...25 мм в процессе монтажа и эксплуатации атомных станций» МТ 34-70-023-86.

Контроль по методике МТ 34-70-023-86 производился с помощью преобразователей МВБ-70N4 с настройкой чувствительности по вертикальному отверстию диаметром 8,4 мм (однажды отраженным лучом). Амплитуда эхо-сигнала соответствовала контрольному уровню чувствительности.

Контроль по проекту методики НПО «ЦНИИТМАШ» проводился с использованием доработанного для УЗК АСС трубопроводов Ду-300 искателя ГВ ИЦ-91. Диапазон контроля и чувствительность определялись по специальному настроечному образцу и устанавливались соответственно по положению на развертке и по амплитуде эхо-сигнала ГВ от имитатора трещины высотой 2 мм.

В процессе контроля определялись максимальная амплитуда сигналов от выявленных отражателей и условная протяженность. Дефектограмма представлена на рис. 12.

Методика МТ-34-70-86 выявила 4 отражателя со следующими характеристиками:

- максимальная амплитуда на 14 дБ превышала контрольный уровень чувствительности, условная протяженность 80 мм;
- максимальная амплитуда на 6...7 дБ превышала контрольный уровень, условная протяженность 40 мм;
- максимальная амплитуда на 6 дБ превышала контрольный уровень, условная протяженность 60 мм;
- максимальная амплитуда на 5 дБ превышала контрольный уровень, условная протяженность 20 мм.

Отражатели I-IV выявлялись только с одной стороны от шва. Участки с отражателями I-IV по МТ-34-70-86 считаются браком.

Способ НПО «ЦНИИТМАШ» УЗК ГВ на поисковом уровне чувствительности зафиксировал отражатель I с максимальным превышением по амплитуде на 6 дБ с одной стороны шва и на 4 дБ с другой стороны шва с условной протяженностью 37 мм. Отражатель II выявлялся в виде отдельного сигнала (без соответствующего сопровождения другими импульсами) с амплитудой на 4 дБ больше браковочного уровня и условной протяженностью 40 мм. Отражатель III давал эхо-сигнал меньше поискового уровня, точечный. Отражатель IV выявлялся как точечный с амплитудой равной поисковому уровню.

Отражатели II-IV наблюдались только с одной стороны шва. Участок 1 по способу НПО «ЦНИИТМАШ» считается браком, участок 2 должен

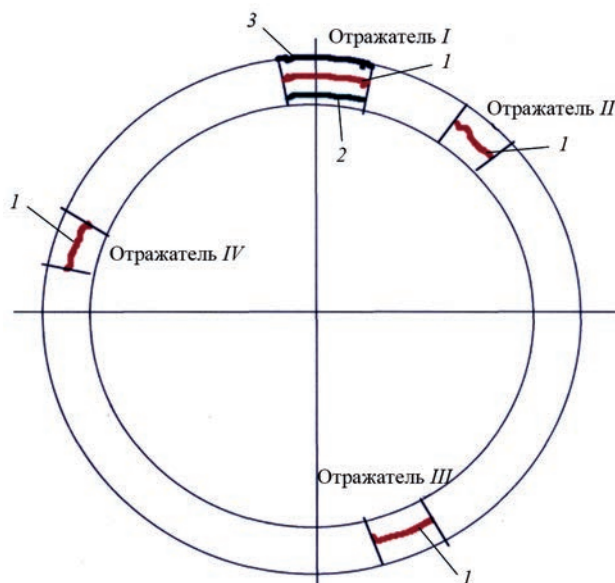


Рис. 12. Дефектограмма НК и металлографии сварного соединения 23М2: 1 – МТ-34-70-023-84 (МWB-70N2, $d = 8,4$ мм); 2 – МЦУ-7-96 (ПГВ, $h = 2$ мм, пропилен); 3 – металлография, трещина

быть отмечен как участок с повышенным шумом, участки 3 и 4 не фиксируются.

На поверхности сварного шва были отмечены координаты отражателей, в них намечены сечения для резов и проведено вскрытие фрезерованием. Затем поверхности резов шлифовались, подвергались травлению, рассматривались под микроскопом и фотографировались при наличии несплошностей.

В результате установлено:

- на участке 1 выявлена протяженная несплошность (трещина) высотой 3,1...7 мм в рассмотренных сечениях (рис. 13);

- на участках 2-4 несплошностей не обнаружено.

Анализ результатов УЗК показал:

- возможность ложной отбраковки сварных соединений при использовании методики МТ-34-70-86;

- удовлетворительные результаты контроля при использовании способа и методики НПО «ЦНИИТМАШ».

На основании результатов исследований и апробации способа УЗК ГВ и проекта методики и апробации технологии контроля сварных соединений трубопроводов Ду-300 была разработана «Методика УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов 325×15 мм АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7-97. Испытания и опытное апробирование

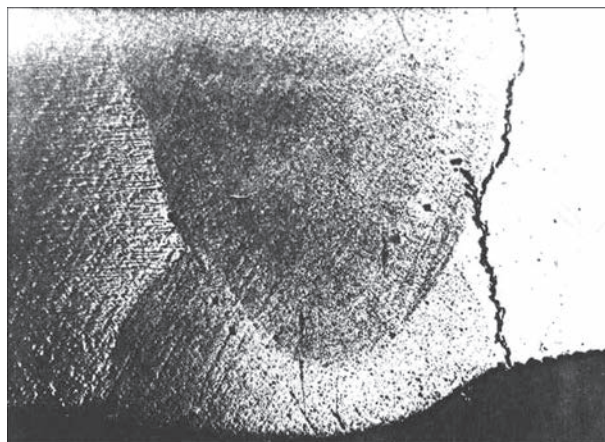


Рис. 13. Несплошность – трещина МКРПН на участке сварного соединения 23М2 с отражателем I

ее на АЭС показали реальные возможности способа в части выявления трещин МКРПН различной протяженности и высоты по сравнению с другими методами неразрушающего контроля. В табл. 1 представлены результаты контроля АСС трубопроводов Ду-300 1-го блока Курской АЭС.

Видно, что методика МЦУ-7-97 позволила оценить реальную дефектность сварных соединений и определить объем сварных соединений для ремонта. Заключение по результатам 100 % УЗК по МЦУ-7-97 сварных соединений явилось основанием для оценки качества трубопроводов Ду-300 и позволило своевременно пустить блок в эксплуатацию.

Аналогичные испытания уже утвержденной методики МЦУ-7-97 до начала ее использования были проведены на Смоленской АЭС. Результаты апробации продемонстрировали эффективность методики и она была принята для использования на АЭС [15].

Наибольшие подготовительные работы перед допуском к применению методики МЦУ-7-97 были проведены на Чернобыльской АЭС.

Для обеспечения нормативного использования новой технологии УЗК АСС трубопроводов Ду-300 на Чернобыльской АЭС АЯР Украины и НАЭК «Энергоатом» предложили проводить работы по двум направлениям:

1. Провести приемочные испытания методики МЦУ-7-97 в соответствии рекомендациями европейского сообщества по неразрушающему контролю ENIQ «Европейская методология по аттестации (второе издание)» 1997 г. [16].

Таблица 1. Результаты исследований АСС трубопроводов Ду-300 1-го блока Курской АЭС

Метод контроля		Количество швов, шт.	Брак, шт.	Примечание
РГК		444 (100 %)	14 – непровары, шлак 5 – трещины 12 – технологические отклонения	Не выявлено трещин с коррозией под напряжением
УЗК	МТ-34-70-023-86	444 (100 %)	222 (50 %) (по амплитуде, протяженности)	Предположили перебраковку при чувствительности $d = 8,4$ мм
	МЦУ-7-96	226	34 ($1 < 100$ мм)	Ремонт и допуск по техрешению

Таблица 2. Сравнительные результаты неразрушающего контроля (РГК и УЗК по МЦУ-7-97) сварных соединений (СС) трубопроводов Ду-300 КМПЦ энергоблока №3 Чернобыльской АЭС

Метод НК	Количество СС, где дефектов не обнаружено, штук	Количество сварных соединений с протяженностью несплошностей						Суммарная протяженность по всем СС
		50 мм и менее	51...100 мм	101...150 мм	150...200 мм	> 200 мм	Всего	
РГК	-	32	11	2	—	—	45	1882
УЗК	6	5	16	8	5	5	39	4945

2. Провести опытный экспертный УЗК по методике МЦУ-7-97 на трубопроводах 3-го блока Чернобыльской АЭС.

В процессе выполнения экспертного УЗК проходила подготовка, обучение и тренинг высококвалифицированных контролеров УЗК, аттестованных по правилам и унифицированным методикам УЗК ПНАЭГ, Чернобыльской и других АЭС Украины. Эти специалисты в дальнейшем принимали участие в работах по аттестации методики и по сплошному УЗК АСС Ду-300 на 3-м блоке Чернобыльской АЭС.

По методике МЦУ-7-97 при экспертном УЗК было проконтролировано 135 сварных соединений опускных трубопроводов и 45 сварных соединений напорных трубопроводов, не имевших замечаний по результатам РГК.

Результаты УЗК:

- из 135-и сварных соединений опускных трубопроводов в 19-и были обнаружены протяженные отражатели;
- из 45-и сварных соединений напорных трубопроводов в 6-и были обнаружены протяженные отражатели;
- выборочные разрушающие испытания темплетов шириной 42...47 мм (долотом на разрывной машине), вырезанных на участках расположения по результатам УЗК трещинообразных протяжен-

ных отражателей, подтвердили наличие трещин различной высоты.

Анализ результатов экспертного УЗК по методике МЦУ-7-97 и металлографических исследований показал, что РГК не обеспечивает выявления трещинообразных несплошностей в сварных соединениях трубопроводов Ду300.

В табл. 2 представлены сравнительные результаты неразрушающего контроля (РГК и экспертного УЗК по МЦУ-7-97) сварных соединений трубопроводов Ду-300. Результаты свидетельствуют о том, что, во-первых, при радиографическом контроле возможна значительная перебраковка по количеству дефектных сварных соединений, а во-вторых, возможна недобраковка по протяженности трещин. В последнем столбце табл. 2 показано, что суммарная протяженность трещин по результатам УЗК более чем в два с половиной раза превышает данные по РГК. Сравнительные данные по протяженности хорошо иллюстрируются диаграммами расположения дефектов по периметру сварных швов на рис. 14.

Была разработана «Программа аттестации методики УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов 325×15 мм АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7-97, которая утверждена руководством НАЕК «Энергоатом» и Чернобыльской АЭС и согласована АЯР МЭБУ. Она определила цели и задачи аттестации, требования к аттеста-

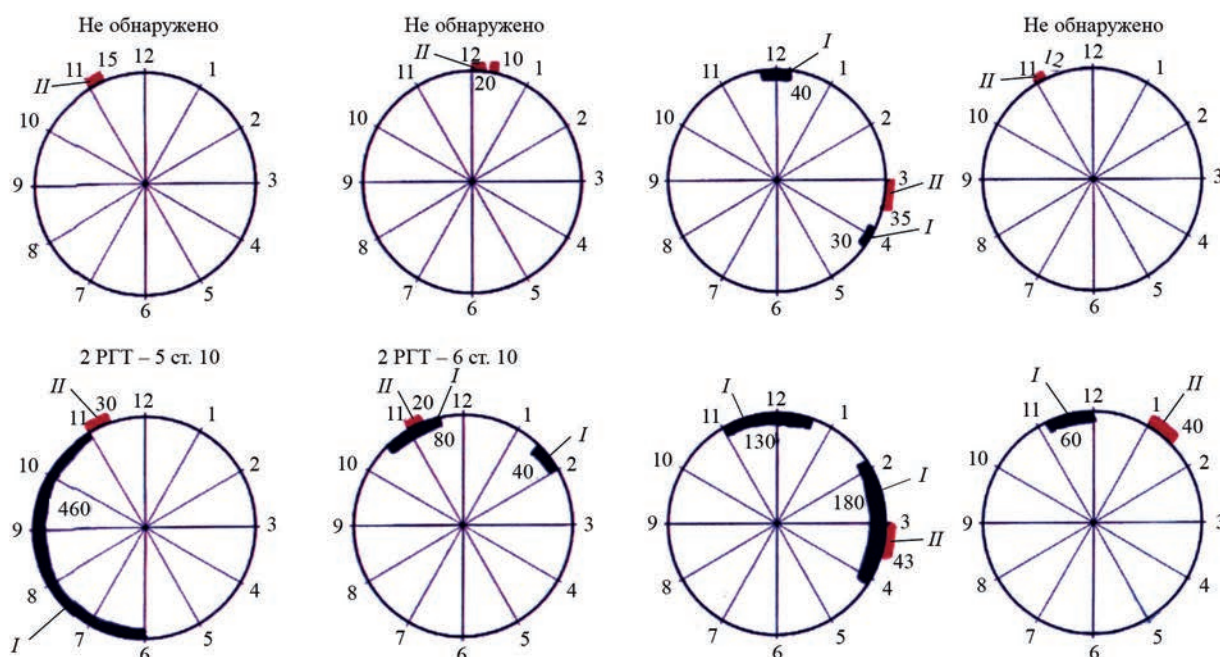


Рис. 14. Диаграммы расположения и протяженность дефектов в сварных соединениях напорного трубопровода по результатам УЗК по МЦУ-7-97 и РГК: I – УЗК, II – РГК

ционной комиссии, требования к тест-образцам, требования к персоналу, этапы аттестации, оценки результатов аттестации. Такая аттестация впервые проводилась в Украине и процедура аттестации предусматривала:

- аттестацию специалистов УЗК, прошедших теоретическое и практическое обучение по методике МЦУ-7-97;
 - наличие метрологически поверенного оборудования, в данном случае приборов УД-2-12 (или аналогичных им) совместно со специально разработанными искателями;
 - разработку и изготовление специальных тест-образцов с искусственными дефектами для открытых испытаний и выбор тест-образцов для закрытых («слепых») испытаний;
 - аттестацию собственно методики.
- Этапы аттестации включали:
- анализ методики, выдачу экспертного заключения;
 - анализ ранее полученных результатов контроля на АЭС РФ и на Чернобыльской АЭС (экспертных) с применением МЦУ-7-97;
 - подготовку тест-образцов с искусственными отражателями (имитаторами трещин);
 - выбор двух катушек с реальными трещинами по результатам экспертного УЗК на Чернобыльской АЭС;
 - проведение УЗК по МЦУ-7-97 двумя независимыми звеньями на:

- тест-образцах с заранее известными отражателями (открытые испытания);
- двух катушках с эксплуатационными отражателями (слепые испытания);
- подтверждение результатов испытаний методами радиографии и металлографии «слепых» образцов;
- рассмотрение результатов и подготовка Протокола аттестации.

Все этапы работы были выполнены. В частности предприятием «ЭАКС» (Украина) в результате анализа методики было выдано экспертное заключение о том, что «Методика УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов 325×15 АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7-97 может быть рекомендована для использования на Чернобыльской АЭС. Эта методика была введена в перечень НТД, действующей на Чернобыльской АЭС.

Итогом всей работы явилось принятие «Решения о допуске в эксплуатацию трубопроводов из аустенитной стали Ду-300», согласованного в установленном порядке и отвечающего требованиям нормативно-технической документации.

В период 1997–2001 гг. по методике МЦУ-7-97 было проконтролировано ~ 20000

сварных соединений (многие неоднократно) трубопроводов и коллекторов Ду-300. При этом сквозных трещин не обнаружено и не пропущено, что свидетельствует о надежности УЗК по методике МЦУ-7-97. Следует отметить, что есть еще много перспективных вопросов применения этой методики. В частности, методика УЗК ГВ имеет значительный резерв на пути использования сопровождающих импульсов для повышения качества и достоверности контроля, оценки высоты трещин.

Список литературы

1. (1974) *Методика контроля изделий головными ультразвуковыми волнами*. Москва, ЦНИИТМАШ.
2. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1981) О выявлении подповерхностных дефектов искателями головных волн ИЦ-61, ИЦ-70. *Дефектоскопия*, **3**, 97–105.
3. Разыграев Н.П. (2020) Головные волны в ультразвуковой дефектоскопии металлов. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 58–70.
4. ПНАЭГ-7-30-91. *Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Ультразвуковой контроль. Ч. 2. Контроль сварных соединений и наплавки*. Москва, ЦНИИАтоминформ.
5. Зубченко А.С., Харина И.Л., Маханов В.О., Рунов А.Е. (2003) Некоторые аспекты коррозионно-механического повреждения сварных трубопроводов из стали 0X18H10T реакторов типа РБМК. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, **2**, 69, 50–55.
6. Electric Power Research Institute. (1982) *The Growth and Stability of Stress-Corrosion Cracks in Large Diameter BWR Piping*. EPRI-NP-2472-SY. Vol.1, Summary.
7. Wachter, O. (1996) *Experience with austenitic steels type 321 and type 347 in German boiling water reactors*. VGB Kraftwerktechnik **76**, 10.
8. Spiedel, M.O., Magdowski R. (1994) Stress corrosion cracking of Ti- and Nb-stabilized austenitic steels in 288 °C water. *Corrosion-94*, 132.
9. Angelu, T.M., Andresen, P.L., Sutliff, J.A., Horn, R.M. (1999) Intergranular Stress Corrosion Cracking of Unsensitized Stainless Steel in BWR Environments. *Proc. Ninth Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water reactors*, AIME.
10. Разыграев Н.П. (1984) Ультразвуковой контроль трещинообразования под антикоррозионной аустенитной наплавкой. *Дефектоскопия*, **2**, 60–66.
11. Зубченко А.С., Разыграев Н.П., Кретов Е.Ф. и др. (1988) *Актуальные вопросы ультразвукового контроля наплавленных антикоррозионных покрытий*. Москва, Энергомашиностроение, Ч. 1., 10, Ч. 2., 11.
12. Зубченко А.С., Разыграев Н.П., Кретов Е.Ф. и др. (1988) Оценка технологии изготовления и норм качества при ультразвуковом контроле наплавленных антикоррозионных покрытий. Москва, Энергомашиностроение, 12.
13. ПНАЭГ-7-031-91. *Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Ультразвуковой контроль. Ч. 3. Измерение толщины монометаллов, биметаллов и антикоррозионных покрытий*. Москва, ЦНИИАтоминформ.
14. Разыграев Н.П. и др. (1978) Исследование процесса формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде. *Дефектоскопия*, **11**, 5.
15. Разыграев Н.П. (2006) УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду-300. *Там же*, **10**, 59–71.
16. (1997) *«Европейская методология по аттестации (второе издание)» ENIQ. Отчет № 2, EUR 17229 Ru, Генеральный директорат, Объединенный исследовательский центр. ECSC-EEC-EAEC, Brussels-Luxemburg*.

Поступила в редакцию 29.01.2021

В.О. ТРОЇЦЬКОМУ – 85



Редколегія та редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» щиро вітають заступника головного редактора журналу доктора технічних наук, професора, заслуженого діяча науки та техніки України, голову Українського товариства НКТД, члена

Міжнародної академії НК Троїцького Володимира Олександровича з ювілеєм!

В.О. Троїцький у 1958 р. закінчив Московський електромеханічний інститут. У 1961 р. він вперше почав використовувати магнітодіелектрики в низькочастотній техніці та захистив за цією тематикою кандидатську дисертацію.

З 1964 р. В.О. Троїцький працює в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, з 1976 р. керує відділом «Неруйнівний контроль зварних з'єднань та металоконструкцій» електрозварювання ім. Є.О. Патона. Протягом багатьох років під керівництвом проф. В.О. Троїцьким та за його безпосередньою участю ведеться розробка і впровадження систем рентгенівського, магнітного, ультразвукового, візуального та інших видів неруйнівного контролю на промислових підприємствах, в тому числі на трубопрокатних і машинобудівних заводах.

Професором В.О. Троїцьким створені теоретичні основи намагнічування складних деталей, сформульовані умови, що обмежують можливості магнітних методів з урахуванням розмагнічуючих чинників, геометрії деталей, форм частинок магнітного порошку, можливостей системи для намагнічування. Під його керівництвом впроваджені в різних галузях промисловості ряд магнітних дефектоскопів, серед яких рухомі намагнічуючі пристрої на основі матеріалів з рідкоземельних металів і відповідні технології. Створені комплекси для цифрової миттєвої (флеш) радіографії, які істотно ефективніші за плівкову радіографію, робочі місця рентгенолога для обробки і архівації R-зображень, документування результатів контролю; розроблено технологію діагностики тіл обертання (труб, реакторів і т.п.) без зняття ізоляції за допомогою тангенціального радіаційного просвічування. Створені унікальні методики та прилади для неординарних завдань дефектоскопії, таких, як УЗК поздовжніх і кільцевих швів з роздільною фіксацією дефектів шва і зон термічного впливу, з точним спостереженням за віссю зварних швів; апаратура для УЗК зварних з'єднань арматури, способи для пошарового контролю товстостінних конструкцій, тренажери для підготовки операторів УЗ контролю. Впроваджено пристрої для запам'ятовування і аналізу результатів УЗК, цифрові ульт-

развукові методи TOFD, SAFT для точного визначення розмірів внутрішніх дефектів, засновані на ефекті дифракції хвиль і математичних методів побудови штучних апертур. Розроблено УЗ методики для знаходження дефектів типу матових плям і оксидних плівок, які не мають розкриття (обсягу) і є провісниками майбутніх втомних тріщин в швах контактного та дифузійного зварювання.

Під керівництвом В.О. Троїцького як заступника голови Технічного комітету із стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» було виконано роботи із розроблення і погодження більше 60 стандартів з проблем неруйнівного контролю і зварювання.

Від дня заснування в 1990 р. професор Троїцький В.О. очолює Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики. Він є членом багатьох аналогічних товариств НКТД зарубіжних країн, в тому числі США, Великої Британії, Німеччини, РФ. Він активно працює у Міжнародному комітеті з НК (ICNDT) і в Європейській федерації з НК (EFNDT), бере участь в підготовці фахівців за програмами IAEA (MAGATE), є членом комітету ISO TC135 «Non-Destructive Testing» Міжнародної організації із стандартизації (ISO). Дякуючи його контактам з провідними європейськими фахівцями в галузі НК, УТ НКТД став учасником європейських наукових проектів LRUCM і SHIPINSPECTOR в галузі ультразвукового контролю. У 2008 р. спільно з іншими вченими В.О. Троїцький приймав участь у створенні Міжнародної академії НК (ANDTI), штаб-квартира якої знаходиться в м. Брешія, Італія.

Діяльність проф. В.О. Троїцького відзначена премією Ради міністрів СРСР і Державною премією України в галузі науки і техніки. Впродовж своєї наукової діяльності Троїцький В.О. підготував 14 кандидатів технічних наук, написав 15 книг, в тому числі шість навчальних посібників, підготував 850 друкованих праць.

Проф. В.О. Троїцький багато років є членом редколегії британського журналу INSIGHT, заступником головного редактора журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», членом ряду вчених рад, головним редактором інформаційного бюлетеню по неруйнівному контролю «НК - Інформ», заступником редактора міжнародного журналу «Территория NDT», який видається національними товариствами з НК країн Європи та Ізраїлю.

Володимир Олександрович Троїцький все своє життя присвятив науковій діяльності, його праці – безцінний внесок у розвиток науки і техніки нашої країни!

Щиро бажаємо ювіляру міцного здоров'я, успіхів і благополуччя!

КОНФЕРЕНЦІЇ, ВИСТАВКИ, СЕМІНАРИ – 2021

Назва заходу	Дата	Місце проведення
Київська технічна ярмарка	13 – 15 квітня	Київ, Україна
Міжнародна конференція «Sudura 2021/Welding 2021»	22 – 23 квітня	Решіця, Румунія
XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні–2021»	28 – 29 квітня	КПІ, Київ
Control 2021	4 – 7 травня	Stuttgart/Germany
XXIV Міжнародна спеціалізована виставка «Машинобудування. Металургія»	21 – 23 травня	Запоріжжя, Україна
Міжнародна конференція молодих професіоналів із зварювання та суміжних технологій	25 – 28 травня	Київ, Україна
Міжнародна конференція «Сучасні технології з'єднання матеріалів»	31 травня – 2 червня	ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київ
20 th World Conference on NDT (WCNDT 2020)	31 травня – 4 червня	Incheon/Korea
17 th Int. Conference on Condition Monitoring and Asset Management (CM 2021)	15 – 17 червня	BINDT London/Great Britain
XXV Міжнародна Пекінська Виставка зварювання та різання	16 – 19 червня	Пекін, Китай
7 th US-Japan NDT Symposium	5 – 9 липня	ASNT, JSNDI
XXIII Міжнародна конференція «Матеріали. Методи. Технології.»	19 – 22 серпня	Бургас, Болгарія
II Міжнародна конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану»	6 – 11 вересня	Одеса, Україна
X Міжнародна конференція «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів»	6 – 11 вересня	Одеса, Україна
59 th Annual Conference of the British Institute of NDT	7 – 9 вересня	Telford/UK
Міжнародна ярмарка «Welding Engineering – Joining, Cutting, Surfacing»	13 – 17 вересня	Ессен, Німеччина
Seminar Wirbelstromprüfung	14 – 15 вересня	Schweinfurt/Germany
2 nd European NDT & CM Days in Prague:	4 – 8 жовтня	Prague/ Czech Republic
FCTM-ESOP Symposium	6 – 7 жовтня	Paris/France
APCNDT 16 th Asia Pacific Conference for NDT	18 – 22 жовтня	Melbourne/Australia
Міжнародна виставка зварювального устаткування і технологій	19–21 жовтня	Кельце, Польща
Workshop on structural integrity, NDT and CM requirements for Industry 4.0	19 – 20 жовтня	BINDT Coventry/UK
Міжнародна виставка зварювання, зварювального обладнання та технологій	27 – 28 жовтня	Гданьск, Польща
Міжнародна виставка промислових технологій	27 – 28 жовтня	Гданьск, Польща
Seminar des FA Ultraschallprüfung – Konventionelle und innovative Anwendungen der Ultraschallprüfverfahren	10 – 11 листопада	DGZfP Berlin
ASNT Annual Conference	15 – 18 листопада	ASNT Phoenix/USA
XX Промисловий форум	16 – 19 листопада	Київ, Україна
Malaysia International NDT Conference and Exhibition 2020 (6 th MINDTCE)	7 – 8 грудня	Malaysian Society for NDT

ДАТИ, ПОДІЇ, ФАКТИ З ІСТОРІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ*

У січні 1987 р. в журналі «Вісник Академії наук Української РСР» було опубліковано статтю академіка Б.Є. Патона «Неруйнівний контроль і надійність технічних об'єктів». Уперше на такому високому рівні в Україні було визнано велике значення неруйнівного контролю в надійності техніки. В статті аналізуються дослідження та розробки в цій галузі та поставлені завдання на майбутнє.



У січні 1965 р. у видавництві «Наука» Академії наук СРСР вийшов перший номер журналу «Дефектоскопія» – популярний науковий журнал. Англomовна версія журналу – «Russian Journal of Nondestructive Testing». Видавець – Інститут фізики металів (м. Єкатеринбург) Уральського наукового центру АН СРСР. Першим головним редактором був проф. Р.І. Янус. Періодичність – 6 номерів на рік. Журнал видається до теперішнього часу.



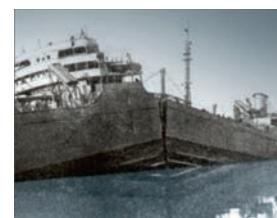
У січні 1999 р. почав видаватись інформаційний бюлетень Українського товариства НКТД «НК-інформ» (4 номери в рік). Відповідальним редактором перших номерів бюлетеня був Олександр Козін. В наступні роки в виданні бюлетеня брали участь Андрій Шекеро, Тетяна Корольова, Лариса Мартинова. Бюлетень видається до теперішнього часу.



9 січня 1949 р. народився Олег Карпаш, професор, доктор технічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, проректор з наукової роботи Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, завідувач кафедри технічного діагностування трубопроводів, засновник НВФ «Зонд».



16 січня 1943 р. після успішних морських випробувань при поверненні на базу тріснув навпіл танкер «Скенектаді» водотоннажністю 7230 т. Тріщина з'явилася в куті люка на палубі, пройшла через палубу і по обох бортах до кіля. Незважаючи на війну, ця подія набула широкого розголосу в пресі і послужила в свою чергу стимулом для розвитку наукових досліджень в галузі зварювання та технічного контролю в суднобудуванні.



21 січня 1942 р. виготовлено перший танк Т-34, корпус якого вперше виконаний із застосуванням автоматичного зварювання. Технологію зварювання було розроблено фахівцями Інституту електрозварювання. Продуктивність автоматичного зварювання виявилася в 10 разів вищою за ручне. У повоєнні роки в Інституті продовжувались розробки в галузі автоматичного зварювання та його ультразвукового контролю.



* Матеріал підготував Посипайко Ю.М.

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



25 січня 2004 р. на Марсі здійснив посадку перший марсохід «Opportunity», доставлений ракетою-носієм «Дельта II». Ця модель ракети була першою, при виробництві якої застосували зварювання тертям з перемішуванням. Були застосовані різні способи радіаційного, вихрострумового, капілярного, оптичного та ін. контролю.



27 січня 1983 р. закінчено проходку найдовшого підводного тунелю Сейкан, що з'єднує японські острови Хонсю і Хоккайдо. Остаточна довжина цього залізничного тунелю склала 53,9 км, в тому числі підводна частина – 23,3 км. Тунель опускається на 100 м нижче рівня морського дна. Рейки не мають болтових з'єднань, вони зварені в єдину 54-кілометрову колію. Мабуть це найдовше зварне залізничне полотно в світі. Під час будівництва та щодня під час експлуатації виконується ультразвуковий та магнітний контроль рейок за допомогою вагонів-дефектоскопів.



У лютому 1989 р. вийшов перший номер журналу «Технічна діагностика і неруйнівний контроль» - науковий журнал НАН України. Головний редактор – академік Б.Є. Патон. Номер відкривається статтею Б.Є. Патона і А.Я. Недосеки «До питання прогнозування залишкового ресурсу зварних конструкцій». Журнал видається до цього часу (4 номери на рік).



У лютому 2016 р. вперше на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» виконані роботи з дефектоскопії. Проведено технічне діагностування металоконструкцій резервуарів для зберігання нафтопродуктів об'ємом 200 куб. м.



У лютому 2021 р. на новий термін було підписано двосторонню угоду про професійне співробітництво між УТ НКТД і Американським товариством з неруйнівного контролю (ASNT). Угода встановлює загальні принципи, яких обидві організації пропонують дотримуватися, співпрацюючи в обміні інформацією та знаннями у галузі НК. Варто сказати, що співпраця між УТ НКТД и ASNT продовжується вже понад 20 років.



2 лютого 1928 р. проф. С.Я. Соколов (1897–1957) подав заявку на патент «Спосіб випробування металів». Так розпочалось застосування височастотних акустичних хвиль ультразвукового діапазону для неруйнівного контролю металу.



2 лютого 1934 р. прийнято постанову Всеукраїнської академії наук (ВУАН) про створення на базі електрозварювального комітету і електрозварювальних лабораторій ВУАН науково-дослідного Інституту електрозварювання. Директором призначено Євгена Озаровича Патона (1870–1953).



18 лютого 1914 р. народився В.В. Підгаєцький (1914–1991) – відомий вчений, заслужений діяч науки і техніки України. Він вніс фундаментальний внесок в металургію зварювання, зокрема, у вивчення взаємодії металу, шлаку і газів, причин утворення пор, тріщин і інших дефектів в швах. Оpubлікував 215 наукових праць, в тому числі 23 монографії.

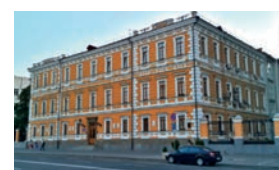
20 лютого 1986 р. в СРСР проведено запуск орбітальної наукової станції «Мир», що прийшла на зміну орбітальних станцій «Салют» і стала на півтора десятка років єдиною в світі пілотованою космічною лабораторією для довготривалих науково-технічних експериментів і дослідження людського організму в космосі. В подальшому на станції були проведені дослідження із зварювання і наплення в космосі. При виготовленні конструкцій станції застосовано великий обсяг неруйнівного контролю.



21 лютого 1936 р. народився В.О. Троїцький, відомий вчений, професор, доктор технічних наук, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії в області науки і техніки, член Міжнародної академії неруйнівного контролю (м. Бреція, Італія), голова Українського товариства неруйнівного контролю і технічної діагностики, керівник відділу неруйнівного контролю Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона.



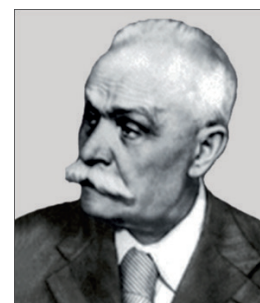
28 лютого 1962 р. на загальних зборах АН УРСР обраний новий склад Президії. Президентом став академік АН УРСР Борис Євгенович Патон. Сьогодні НАН України включає 160 інститутів. Чисельність співробітників становить понад 28 тис.



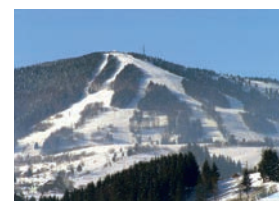
2 березня 1927 р. почалося будівництво нафтопроводу Грозний-Туапсе. Це був перший великий магістральний нафтопровід з труб середнього діаметру. Будівництво велось з 1927-28 рр. Для з'єднання труб вперше було застосоване електродугове зварювання. Під час спорудження нафтогону при зварюванні труб вперше застосовувалась дефектоскопія.



5 березня 1870 р. народився Євген Оскарович Патон (1870–1953) – видатний учений в області мостобудування і електрозварювання, засновник широко відомої в світі патонівської науково-інженерної школи, Герой Соціалістичної Праці, лауреат Сталінської премії, засновник Інституту електрозварювання, який з 1953 р. носить його ім'я. Його діяльність в галузі в мостобудування, будівельної механіки, електрозварювання і електрометалургії назавжди залишиться в історії світової науки і техніки.



5-9 березня 1996 р. в сел. Славське Львівської області відбулась перша науково-технічна конференція «Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів». Організатором і модератором конференції був В.М. Учанін. Такі конференції в Славському проходились щорічно до 2012 р.



7 березня 2003 р. у видавництві «Машинобудування» розпочався випуск 8-ми томного видання «Неруйнівний контроль. Довідник» під загальною редакцією В. Ключева. Його авторами є провідні вчені РФ. Це найбільш повне зібрання, що охоплює всі види неруйнівного контролю (загальна кількість сторінок – більше 4000).





16 березня 1942 р. відбувся перший запуск ракети «Фау-2», яка стала першою в історії ракетою, що здійснила суборбітальний космічний політ. Ракети виготовлялись в Німеччині в роки другої світової війни в умовах дефіциту стратегічної сировини. Тому у виробництві застосовувалась велика кількість дешевих замінників, в тім числі багато деталей зі сталі. В наступні роки розвиток ракетобудування в багатьох країнах спричинив бурхливе зростання досліджень та розробок нових матеріалів, технологій машинобудування і неруйнівного контролю.



20 березня 1908 р. в Магдебурзі (Німеччина) народився Фрідріх Форстер (помер в 1999 р.) – піонер неруйнівного контролю, видатний вчений-винахідник, автор більше 180 патентів. Заснований ним «Інститут Доктора Форстера» в Ротлінгені став першим в світі з досліджень та розробок в галузі вихрострумового та магнітного контролю.



21 березня 1800 р. італійський вчений Алесандро Вольт (1745-1827) поінформував Королівське товариство в Лондоні про створення ним нового джерела енергії. А. Вольт розмістив в банці з кислотою дві пластинки – цинкову і мідну, з'єднав їх дротом і показав, що по дроту протікає електричний струм. Так був винайдений «елемент Волта» – перший гальванічний елемент, прообраз майбутніх акумуляторів.



27 березня 1968 р. шляхом злиття ряду організацій був створений Британський інститут зварювання (TWI). Він працює для всіх галузей промисловості, пропонуючи навчання та експертизу з неруйнівного контролю, зварювання та інспекції по всьому світу. Чисельність співробітників – понад 900 чол. Інститут співпрацює із зварювальними та інспекційними організаціями понад 80-ти країн світу.



28 березня 1945 р. створений польський Інститут зварювання в м. Глівіце. Він є важливим науково-дослідним центром в Польщі, який проводить роботи з розвитку і впровадженню зварювальних технологій. Кількість працівників – понад 200 чол. Важливим напрямком діяльності інституту є підготовка кадрів в галузі зварювання та неруйнівного контролю. Інститут видає науково-технічний журнал «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa».



30 березня 1929 р. Ірвінг Ленгмюр (1881-1957) назвав плазмою іонізований газ в газорозрядній трубці. При вивченні електричного розряду в трубці з розрідженим повітрям і було відкрито матерію, яка стала четвертим станом речовини. Лауреат Нобелівської премії з хімії (1932) за дослідження в області хімії поверхневих явищ.



31 березня 1948 р. з ініціативи академіка Є.О. Патона було засновано науково-технічний і виробничий журнал «Автоматичне зварювання» (перші два роки – збірка «Праці з автоматичного зварювання під флюсом»). За широтою охоплення і глибиною освітлення опублікованих матеріалів журналу за 73 роки випуску його можна називати зварювальною енциклопедією. Він допоміг становленню вже декількох поколінь учених-зварників.