

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

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,
Варшава, Польща

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія

М.Л. Казакевич

Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського
НАН України, м. Київ

О.М. Карпаш, П.М. Райтер

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

А.Г. Протасов, С.К. Фомічов

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

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з
технічної фізики, Ясси, Румунія

В.О. Стороженко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Г.М. Сучков

Національний університет «Харківський політехнічний інститут»

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка
НАН України, м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і
природокористування України, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,
Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідчення 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 2023

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія: 1120 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 1120 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

МАХНЕНКО О.В., КАНДАЛА С.М. Оцінка опору
крихкому руйнуванню вигородки реактора ВВЕР-1000 в
процесі довготривалої експлуатації з урахуванням залиш-
кових технологічних напружень 3

ЛОБАНОВ Л.М., ЗНОВА В.Я., САВИЦЬКИЙ В.В.,
КИЯНЕЦЬ І.В., ШУТКЕВИЧ О.П. Візуалізація дефектів в
елементах авіаційних конструкцій методом електронної
ширографії 12

БОНДАРЕНКО О.Г., ГЛУХОВСЬКИЙ В.Ю. Спосіб термо-
графування зовнішньої поверхні димових труб дистан-
ційним пасивним тепловізійним методом 19

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

УЧАНІН В.М., БИЧКОВ С.А., СЕМЕНЕЦЬ О.І.,
ДЕРЕЧА В.Я., АЛЕКСАНДРОВ С.А. Автогенераторні
вихрострумові дефектоскопи для експлуатаційного
контролю авіаційних конструкцій 22

КАЗАКЕВИЧ М.Л., КАЗАКЕВИЧ В.М., ШЕ СЯНЮЙ
Контроль герметичності авіаційних систем (Огляд) 30

ТОРОП В.М. Проведення гідравлічних випробувань
трубопроводів теплових мереж з метою досягнення
заданої надійності їх експлуатації 35

BIRRING A., WILLIAMS J. Ультразвуковий контроль на
атомних станціях 42

ЗАГОРУЛЬКО В.С. Досвід Інституту трубної промисло-
вості ім. Я.Є. Осади з неруйнівного контролю труб 50

ІНФОРМАЦІЯ

Дати, події, факти з історії технічного контролю 57

Видання журналу підтримують:

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,
Технічний комітет стандартизації «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» ТК-78,
Асоціація «ОКО», ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади»

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

Krzysztof Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland

Janez Grum

University of Ljubljana, Slovenia

M.L. Kazakevich

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

O.M. Karpash, P.M. Raiber

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

A.G. Protasov, S.K. Fomichov

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

Adriana Savin

National Institute of R & D for Technical Physics,
Iasi, Romania

V.O. Storozhenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

H.M. Suchkov

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
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) 205-23-90
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 2023

Subscription index 74475.

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

\$128, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$104, 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

MAKHNENKO O.V., KANDALA S.M. Evaluation of brittle
fracture resistance of WWER-1000 reactor enclosure
during long-term service, taking into account the Residual
technological stresses 3

**LOBANOV L.M., ZNOVA V.YA., SAVYTSKYI V.V.,
KYIANETS I.V., SHUTKEVYCH O.P.** Visualization of defects
in aircraft structure elements by electron shearography method ... 12

BONDARENKO O.G., GLUKHOVSKYI V.YU. Method of
thermography of the outer surface of chimneys by remote
passive thermal vision technique 19

INDUSTRIAL

**UCHANIN V.M., BYCHKOV S.A., SEMENETS O.I.,
DERECHA V.YA., ALEKSANDROV S.A.** Self-generator eddy
current flaw detectors for operational control of aircraft structures...22

KAZAKEVYCH M.L., KAZAKEVYCH V.M., SHE XIANGYU
Tightness control of aviation systems (review) 30

TOROP V.M. Performance of hydraulic testing of piping of heat
networks to achieve the specified reliability of their operation 35

BIRRING A., WILLIAMS J. Ultrasonic testing in nuclear plants42

ZAGORULKO V.S. Experience of Ya.Ye. Osada scientific
research tube institute in non-destructive pipes testing 50

INFORMATION

Dates, events, facts in the history of technical non-destructive
testing 57

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,
Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78,
Association «OKO», LLC «Diagnostic devices»

ОЦІНКА ОПОРУ КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ ВИГОРОДКИ РЕАКТОРА ВВЕР-1000 В ПРОЦЕСІ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛИШКОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ

О.В. Махненко, С.М. Кандала

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

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua, st_kan@ukr.net

У статті обґрунтовано необхідність врахування залишкових технологічних напружень (ЗТН) у матеріалі вигородки внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП) енергоблоків АЕС типу ВВЕР-1000 внаслідок технологічних процесів зварювання та післязварювальної термообробки при продовженні ресурсу безпечної експлуатації в надпроектний період. Визначено вплив ЗТН на напружено-деформований стан вигородки, а також на опір крихкому руйнуванню (ОКР) матеріалу в процесі експлуатації. Показано, що за рахунок урахування ЗТН спостерігається суттєвий перерозподіл осьових та окружних напружень у вигородці, а саме зони високих розтягуючих напружень, які за нормальних умов експлуатації (НУЕ) із зовнішньої поверхні вигородки переходять у її внутрішній об'єм, а площа цих зон збільшується. Такий перерозподіл напружень суттєво впливає на рівень значень коефіцієнта інтенсивності напружень на контурі тріщиноподібних дефектів. Найбільш небезпечні ділянки з точки зору крихкої міцності утворюються у внутрішньому об'ємі вигородки, а за рахунок розширення зони напружень розтягу розміри підповерхневої еліптичної тріщини, яка постулюється, можуть бути збільшені, що сприяє підвищенню консервативності оцінки ОКР. Також урахування ЗТН дозволяє значно знизити консервативність при оцінці ОКР вигородки за НУЕ для поверхневих напівеліптичних тріщин, розташованих на зовнішній поверхні вигородки, де в процесі виготовлення утворюються залишкові напруження стискування. Отримані результати дозволяють точніше визначати зони вигородки, схильні до крихкого руйнування матеріалу за НУЕ, що важливо для вдосконалення підходів визначення ресурсу ВКП реактора типу ВВЕР-1000. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: ВВЕР-1000, внутрішньокорпусні пристрої, вигородка, залишкові технологічні напруження, опір крихкому руйнуванню, постульовані тріщини, коефіцієнт інтенсивності напружень, нормальні умови експлуатації

Вступ. Внутрішньокорпусні пристрої (ВКП) ядерних реакторів типу ВВЕР-1000 є дуже важливими конструкційними елементами, які впливають на ресурс усієї енергетичної установки. Одним із ключових підходів у роботах щодо продовження ресурсу безпечної експлуатації АЕС є прогнозна оцінка структурної цілісності конструкцій за допомогою математичного моделювання фізичних процесів, характерних для умов експлуатації енергоблоків при радіаційному опроміненні конструкційного матеріалу. Результати існуючих досліджень [1, 2] обґрунтовують забезпечення умов опору крихкому руйнуванню вигородки ВКП за нормальних умов експлуатації (НУЕ) та аварійних ситуацій (АС), але в цих роботах не розглянуто вплив залишкових технологічних напружень на структурну цілісність елементів ВКП протягом довгострокової експлуатації.

Методами математичного моделювання було визначено [3], що при виготовленні ВКП енергоблоку ВВЕР-1000, а саме в процесі швидкого охолодження на повітрі під час післязварювальної термообробки за режимом аустенізації ($T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), виникають високі залишкові технологічні напру-

ження (ЗТН). У цій роботі проведено розрахунковий аналіз ступеню впливу визначених ЗТН на напружено-деформований стан (НДС) та опір крихкому руйнуванню (ОКР) вигородки ВКП у процесі довгострокової експлуатації до 60-и років з різним рівнем накопиченої пошкоджуючої дози.

Внутрішня поверхня товстостінної циліндричної обичайки вигородки має грановану форму, яка обмежує активну зону реактора (рис. 1, а). Конструкція має дзеркально-циклічну симетрію, що дає змогу розбити її при моделюванні на дванадцять аналогічних 30-градусних секторів (рис. 1, б). Переріз вигородки неоднорідний і характеризується наявністю 84-х охолоджувальних каналів, а товщина варіюється в межах від 67 мм до 242 мм. Матеріал – аустенітна сталь 08X18H10T.

Вхідні дані. Для визначення ступеня впливу ЗТН на зміну НДС і ОКР конструкції вигородки в процесі довготривалої експлуатації використовувалися наступні вхідні дані (рис. 2): розподіли ЗТН [3]; два різних за рівнем розподіли накопиченої пошкоджуючої дози; розподіл тепловиділень внаслідок γ -розігріву. Використані розподіли пошкоджуючої дози і тепловиділень взяті як характерні дані з практики виконання відповідних розрахунків.

Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Кандала С.М. – <https://orcid.org/0000-0002-2036-0498>

© О.В. Махненко, С.М. Кандала, 2022

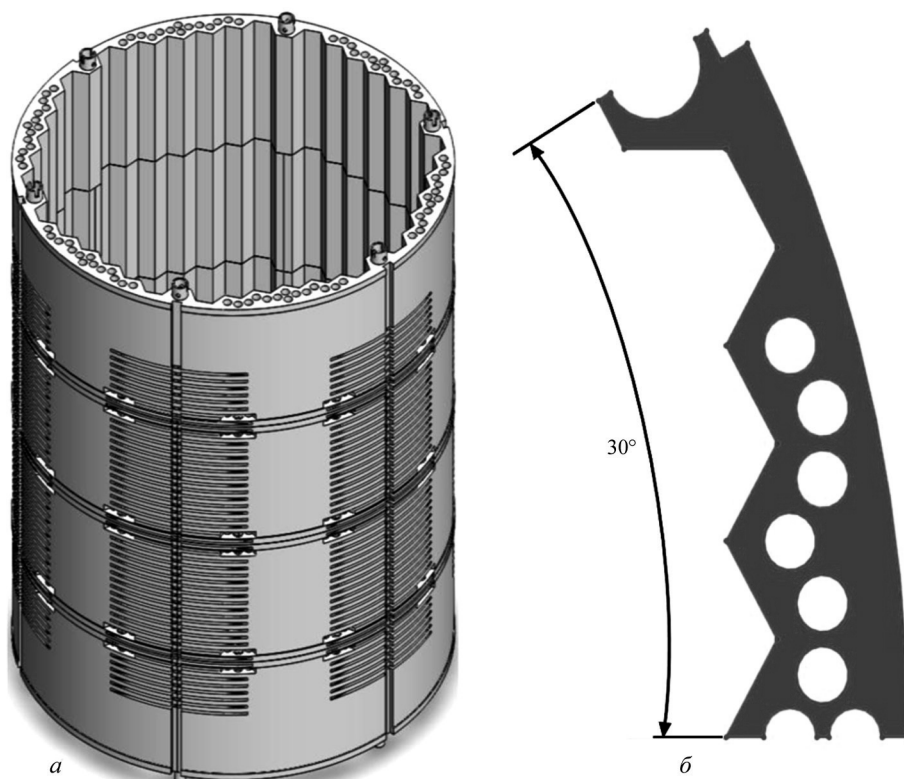


Рис. 1. Загальний вигляд вигородки (а) та її поперечний переріз (30-градусний сектор) (б)

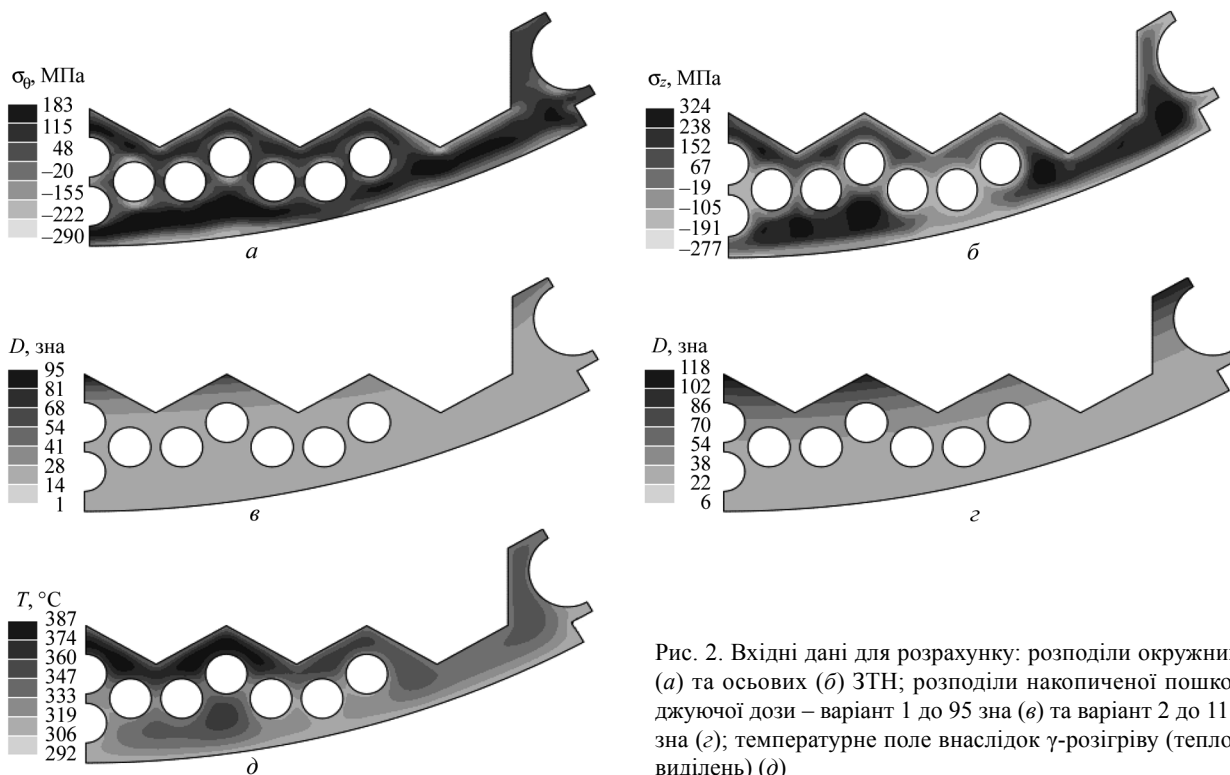


Рис. 2. Вхідні дані для розрахунку: розподіли окружних (а) та осевих (б) ЗТН; розподіли накопиченої пошкоджуючої дози – варіант 1 до 95 зна (в) та варіант 2 до 118 зна (г); температурне поле внаслідок γ -розігріву (тепловиділень) (д)

Моделі радіаційного розпухання та повзучості. Процес довготривалої експлуатації вигородки ВКП в умовах нейтронного опромінення супроводжується радіаційним розпуханням, яке може бути описане апробованою в ДП НАЕК «Енергоатом» моделлю [4–6]:

$$S = C_D \cdot D^n \cdot f_1(T) \cdot f_2(\sigma_m, \sigma_{eq}) \cdot f_3(\varepsilon), \quad S > 0, \quad (1)$$

$$f_1(T) = \exp(-r \cdot (T - T_{\max})^2),$$

$$f_2(\sigma_m, \sigma_{eq}) = 1 + P \cdot (0,85 \cdot \sigma_m + 0,15 \cdot \sigma_{eq}),$$

$$f_3(\varepsilon) = \exp(-\eta \cdot \varepsilon),$$

$$C_D = 1,035 \cdot 10^{-4} \text{ зна}^{-n}, \quad n = 1,88,$$

$$r = 1,825 \cdot 10^{-4}, \quad ^\circ\text{C}^{-2}, \quad T_{\max} = 470 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$P = 8 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}, \quad \eta = 8,75,$$

де S – розпухання, %; D – пошкоджуюча доза, зна; T – температура опромінення, °C; σ_m – середні напруження, МПа; σ_{eq} – еквівалентні напруження, МПа; α – параметр Оджкіста.

Також модель враховує деформації радіаційної повзучості, які для сталі 08X18H10T описуються за законом [6]:

$$\frac{d\varepsilon^{cr}}{dt} = \left(B_0 \frac{dD}{dt} + \omega \frac{dS}{dt} \right) \sigma_{eq} \quad (2)$$

де ε^{cr} – деформація радіаційної повзучості, $B_0 = 1 \cdot 10^{-6} (\text{МПа} \cdot \text{зна})^{-1}$, $\omega = 2,95 \cdot 10^{-3} (\text{МПа}^{-1})$.

Визначення розподілів напружень протягом експлуатації. НДС вигородки з урахуванням процесів радіаційних розпухання і повзучості матеріалу може бути визначений в результаті рішення крайової задачі механіки суцільного середови-

ща методом скінчених елементів в пружно-в'язко-пластичній постановці [5, 7]:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{cr},$$

де ε – сумарні деформації; ε^e , ε^p , ε^{cr} – відповідно пружні, пластичні і деформації повзучості.

Рішенням відповідної 2D задачі з початковими і крайовими умовами у вигляді розподілів ЗТН, пошкоджуючої дози і тепловиділень внаслідок γ -розігріву (рис. 2), а також умов теплообміну з теплоносієм на поверхнях вигородки [5, 7] шляхом послідовного простеження за часом з кроком $\Delta t = 0,2$ року були отримані розподіли напружень в поперечному перерізі вигородки в процесі довгострокової експлуатації з урахуванням та без урахування ЗТН. На рис. 3, 4 показано осьові та окружні напруження в робочому режимі вигородки на 60-у році експлуатації для двох розглянутих варіантів рівня накопиченої пошкоджуючої дози – 95 зна і 118 зна відповідно.

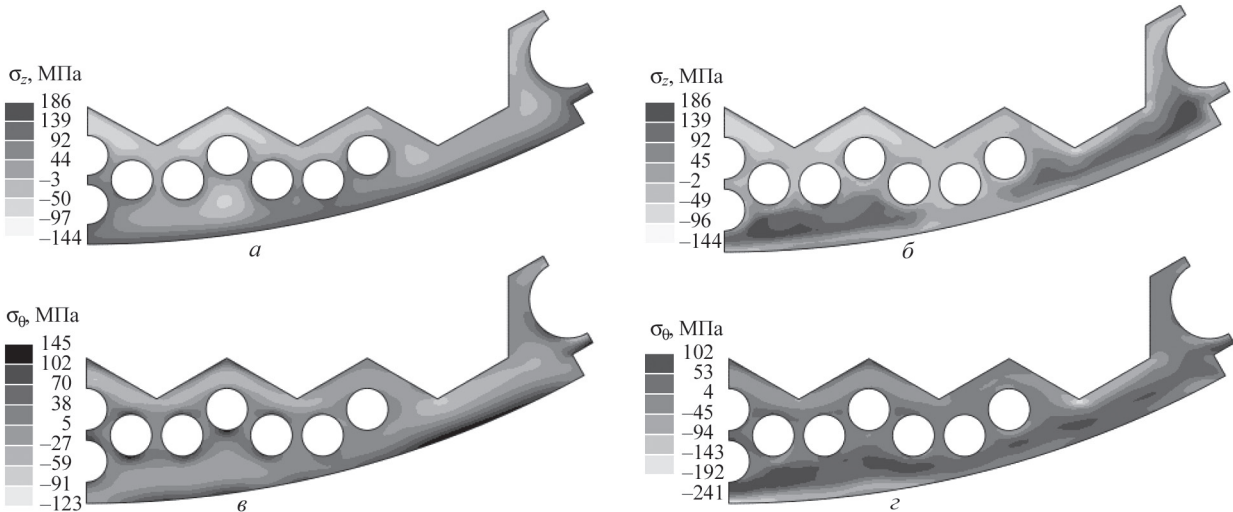


Рис. 3. Розподіли напружень у вигородці на 60-му році експлуатації з максимальною накопиченою дозою 95 зна: а – осьова компонента без урахування ЗТН; б – осьова компонента з урахуванням ЗТН; в – окружна компонента без урахування ЗТН; г – окружна компонента з урахуванням ЗТН

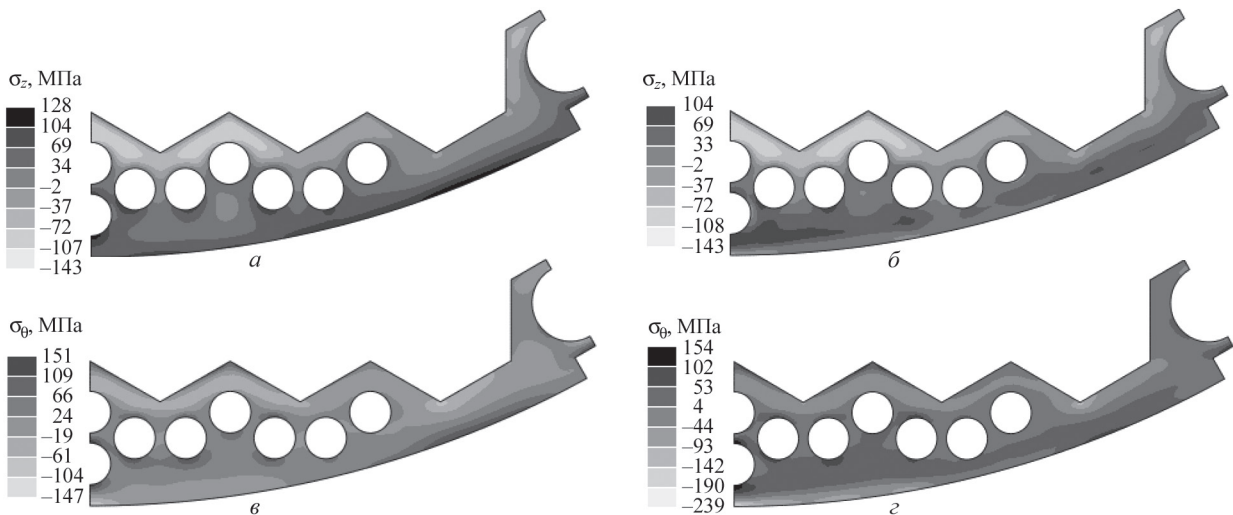


Рис. 4. Розподіли напружень у вигородці на 60-му році експлуатації з максимальною накопиченою дозою 118 зна: а – осьова компонента без урахування ЗТН; б – осьова компонента з урахуванням ЗТН; в – окружна компонента без урахування ЗТН; г – окружна компонента з урахуванням ЗТН

На рис. 3, 4 спостерігається помітна відмінність розподілів напружень в осьовому і окружному напрямках залежно від урахування ЗТН. З урахуванням ЗТН зони високих розтягуючих напружень із зовнішньої стінки вигородки переходять у внутрішній об'єм, а їх площа збільшується. Також варто відзначити вплив рівня пошкоджуючої накопиченої дози на рівень напружень у процесі експлуатації вигородки.

Як видно з даних на рис. 3, 4, ЗТН мало впливають на розподіл напружень на внутрішній поверхні вигородки в області охолоджувальних каналів. Тому для аналізу було вибрано 5 характерних перерізів ближче до зовнішньої поверхні, де вплив ЗТН на НДС вигородки найбільш суттєвий. Схему їхнього розташування показано на рис. 5.

На рис. 6, 7 представлено розрахункові розподіли осьових та окружних напружень у перерізах № 1 і № 5 відповідно на 60-у році експлуатації в залежності від накопиченої пошкоджуючої дози та врахування ЗТН.

Врахування ЗТН може сприяти зниженню рівня напружень в осьовому напрямку в процесі експлуатації (рис. 6, а), а ближче до зовнішньої поверхні вигородки в перерізі №1 напруження навіть переходять у стискаючі.

З даних на рис. 7, які відносяться до перерізу № 5, видно, що врахування ЗТН незалежно

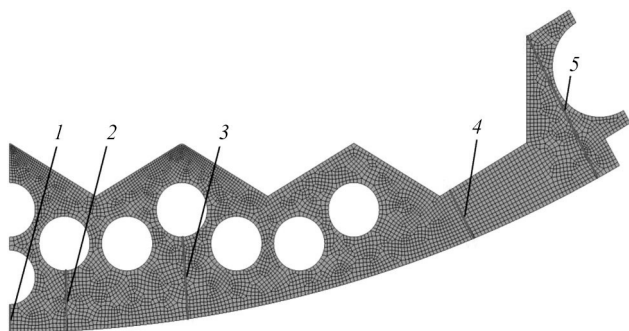


Рис. 5. Схема розташування характерних перерізів для оцінки впливу ЗТН на НДС вигородки у процесі довгострокової експлуатації

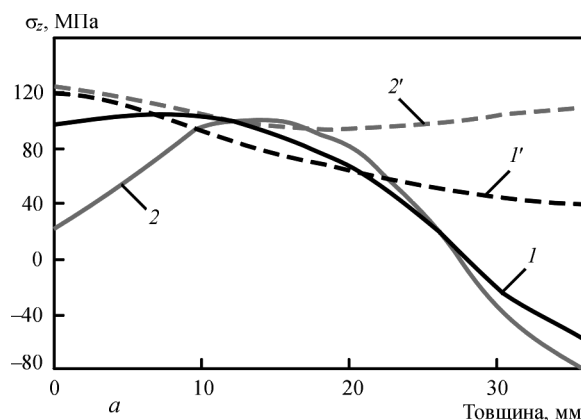


Рис. 6. Розподіл осьових σ_z (а) та окружних σ_θ (б) напружень у перерізі №1 в залежності від накопиченої пошкоджуючої дози та врахування ЗТН: 1' – при $D_{\max} = 118$ зна, 2' – при $D_{\max} = 95$ зна без урахування ЗТН; 1 – при $D_{\max} = 118$ зна, 2 – при $D_{\max} = 95$ зна з урахуванням ЗТН

від рівня накопиченої пошкоджуючої дози істотно впливає на розподіл напружень, а саме, утворюються зони високих напружень розтягу (до 180 МПа) в осьовому напрямку (рис. 7, а).

Варто зазначити, що окружні напруження (рис. 6, б і рис. 7, б) у порівнянні з осьовими відносно низькі в розглянутих перерізах (до 50 МПа) і в більшості випадків урахування ЗТН не викликає суттєвого впливу на їх розподіл.

Також визначено, що в перерізах №№ 2–4 осьові напруження у разі врахування ЗТН істотно вищі у внутрішньому об'ємі вигородки, тоді як на внутрішній та зовнішніх поверхнях стають нижчими порівняно з розрахунковим випадком, де ЗТН не враховувалися.

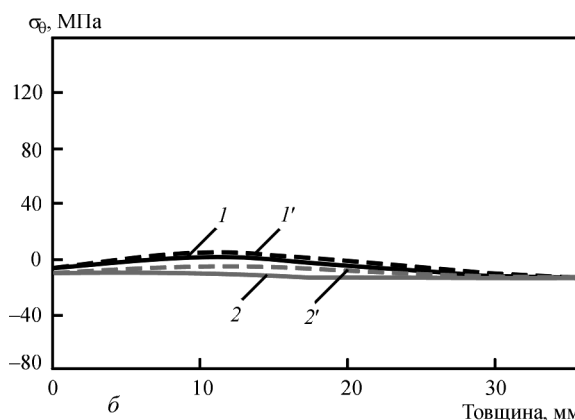
Методика розрахунку ОКР. Відповідно до існуючих вимог [4] при розрахунковому обґрунтуванні безпечної експлуатації ВКП одним з необхідних розрахунків на міцність є розрахунок ОКР, який виконується відповідно до вимог діючої в Україні нормативної документації [8], а також необхідно враховувати рекомендації зарубіжних документів [6, 9]. Опір крихкому руйнуванню ВКП забезпечується, якщо за всіх умов експлуатації виконується умова:

$$K_1 \leq [K_1], \quad (3)$$

де K_1 – розрахункове значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) на контурі постульованої тріщини; $[K_1]_i$ – допустиме значення КІН, яке визначається для умов нормальної експлуатації (НУЕ) ($i = 1$) з коефіцієнтом безпеки $n_k = K_{1c}/[K_1]_1 = 2$, K_{1c} – критичне значення КІН матеріалу.

У якості постульованої тріщини розглядаються як еліптична підповерхнева тріщина з великою піввіссю c та меншою піввіссю a (рис. 8, а), так і напівеліптична поверхнева тріщина (рис. 8, б). Відповідно до ПНАЕ [8] співвідношення півосей $a/c = 2/3$, а відповідно до [4] $a/c = 1/3$, максимальна постульована глибина $2a$ дефекту не може перевищувати чверть товщини основного матеріалу.

Варто зазначити, що елементи ВКП працюють в умовах інтенсивного нейтронного опромінення.



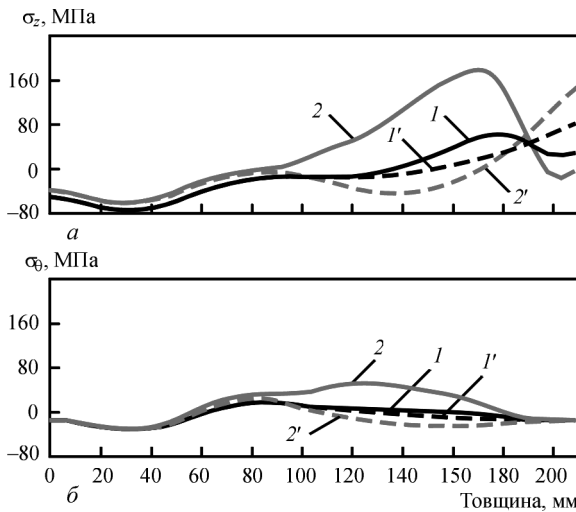


Рис. 7. Розподіл осевих σ_z (а) та окружних σ_θ (б) напружень у перерізі № 5 в залежності від накопиченої пошкоджуючої дози та врахування ЗТН: 1' – при $D_{\max} = 118$ зна, 2' – при $D_{\max} = 95$ зна без урахування ЗТН; 1 – при $D_{\max} = 118$ зна, 2 – при $D_{\max} = 95$ зна з урахуванням ЗТН

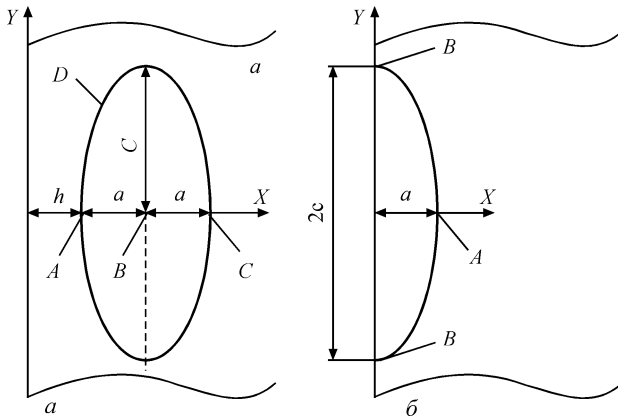


Рис. 8. Постульовані еліптична (а) та напівеліптична (б) тріщини

Це в процесі експлуатації призводить до деградації механічних властивостей основного металу. Тому критичні значення КІН у різних точках (об'ємах) основного металу залежатимуть як від рівня пошкоджуючої накопиченої дози, так і від температури опромінення, і можуть бути описані наступним законом [4]:

$$J_c(D, T, T_{irr}) = 2,5 \cdot 10^{-4} \sigma_y(D, T, T_{irr}) \times \left[1 - A_{J(e)} \sqrt{1 - \exp(-0,2D)} \right], \quad (4)$$

де σ_y – межа плинності матеріалу, МПа; D – накопичена пошкоджуюча доза, зна; $A_{J(e)} = 0,93$.

Для визначення критичних значень КІН за допомогою значень J-інтеграла використовувалася формула переходу [1]:

$$J = \frac{K_I^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (5)$$

Розрахунок значень КІН для постульованих тріщин проводився за трьома різними методиками – згідно з ПНАЕ [8], VERLIFE [6] та РД ЕО [9].

Метод згідно з ПНАЕ. Відповідно до вимог ПНАЕ [8] КІН для циліндричних елементів, що навантажуються внутрішнім тиском та температурним впливом, допускається визначати за формулою:

$$K_I = \eta (\sigma_p M_p + \sigma_4 M_4) \sqrt{\left(\pi \frac{a}{10^3} \right)} / Q \quad (6)$$

де η – коефіцієнт, що враховує вплив концентрації напружень; σ_p – складова напружень розтягування, МПа; σ_4 – складова згинальних напружень, МПа; $M_p = 1 + 0,12(1 - a/c)$, $M_q = 1 - 0,64a/h$; a – глибина тріщини, мм; c – напівдовжина тріщини, мм; h – довжина зони, у межах якої складова згинальних напружень зберігає позитивне значення, мм;

$$Q = \left[1 + 4,6(a/2c)^{1,65} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Складову розтягуювальних напружень (кільцевих або осевих) визначають за формулою:

$$\sigma_{jp} = \frac{1}{s} \int_s \sigma_j dx, \quad (8)$$

де j – координата θ або Z ; σ_j – функція зміни напружень по товщині стінки; s – товщина стінки в розрахунковому перерізі.

Значення складової згинальних напружень визначають за формулою:

$$\sigma_{jq} = \sigma_{jn} - \sigma_{jp}, \quad (9)$$

де σ_{jn} – значення функції зміни напружень за товщиною стінки в точці n .

Варто зазначити, що у документі ПНАЕ [8] не зазначено, для якого типу тріщиноподібних дефектів (підповерхневих, еліптичних або поверхневих напівеліптичних) використовується методика визначення КІН.

Метод згідно з VERLIFE. Відповідно до рекомендацій VERLIFE [6] коефіцієнт інтенсивності напружень K_I визначається із співвідношення:

$$K_I = \sigma_K Y \sqrt{a}, \quad (10)$$

де σ_K – напруження, приведені до рівномірного, МПа; Y – коефіцієнт форми тріщини; a – мала піввісь тріщини.

Коефіцієнт форми тріщини Y визначається залежно від типу тріщини та розташування точки на її контурі. Для підповерхневої еліптичної тріщини характерні такі вирази:

$$Y_A = \frac{1,79 - 0,66 \cdot a/c}{[1 - \beta^{1,8}(1 - 0,4(a/c) - \gamma^2)]^{0,54}} \quad (11)$$

$$Y_C = \frac{1,79 - 0,66 \cdot a/c}{[1 - \beta^{1,8}(1 - 0,4(a/c) - 0,8\gamma^{0,4})]^{0,54}}$$

де $\beta = \frac{a}{b+a}$; $\gamma = 0,5 - \frac{b+a}{s}$; s – товщина основного металу, мм.

Для поверхневої напівеліптичної тріщини коефіцієнти форми визначаються відповідно до наступних виразів:

$$Y_A = \frac{2 - 0,82 \cdot a/c}{\left\{ 1 - \left[0,89 - 0,57(a/c)^{1/2} \right]^3 (a/s)^{1,5} \right\}^{3,25}}$$

$$Y_B = \left[1,1 + 0,35 (a/s)^2 \right] (a/c)^{1/2} \cdot Y_A \quad (12)$$

Для підповерхневої еліптичної тріщини напруження, наведені до рівномірного, визначалися з наступних співвідношень, які описують їх розподіл за параболічним законом:

$$\sigma_{KB} = \frac{\sigma_B + \sigma_C}{2} + \frac{a}{c} \cdot \frac{4\sigma_B - 3\sigma_C - \sigma_A}{30}$$

$$\sigma_{KB} = \frac{\sigma_B + \sigma_C}{2} + \frac{a}{c} \cdot \frac{4\sigma_B - 3\sigma_C - \sigma_A}{30} \quad (13)$$

При постулюванні поверхневої напівеліптичної тріщини в перерізі 4 напруження по товщині стінки розподіляються за лінійною залежністю:

$$\sigma_{KB} = 0,18 \sigma_A + 0,82 \sigma_B \quad (14)$$

Варто зазначити, що в методиці VERLIFE визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для підповерхневої еліптичної тріщини відсутні методи завдання складного закону розподілу напружень, а в результаті опису довільного розподілу напружень за параболічним законом значення K_I можуть бути отримані з істотними похибками.

Метод згідно з РД ЕО. Метод визначення КІН згідно з РД ЕО 1.1.2.05.0330-2012 [9], схожий на методику VERLIFE [6], однак пропонує вирази для розрахунку КІН при більш складному законі розподілу напружень. Так, коефіцієнти форми тріщини визначаються за наступними залежностями:

$$Y = \left[1 - \left(\frac{a}{h+a} \right)^{1,8} \left(1 - 0,4 \frac{a}{c} - \gamma \right) \right]^{-0,54} \times$$

$$\times \left[\frac{\pi}{1 + 1,464(a/c)^{1,65}} \right]^{0,5}, \quad (15)$$

при $a \leq c; a \leq 9h; h+a \leq s/2$;

$$\gamma_A = \left(0,5 - \frac{h+a}{s} \right)^2, \quad \gamma_C = 0,8 \left(0,5 - \frac{h+a}{s} \right)^{0,4}. \quad (16)$$

Для розподілу напружень, заданих у довільній формі (у вигляді апроксимуючої функції), обчислюється координата $x_j = h + a/10$, де $j = 0, 1, 2, \dots, 20$. У кожній точці x_j визначаються напруження $\sigma_j = \sigma_K(x_j)$. Значення приведених до рівномірного напружень $\sigma_K(A)$ та $\sigma_K(C)$ обчислюються за формулами:

$$\sigma_K(A) = \sum_{j=0}^{20} \left(A_j + \frac{a}{c} B_j \right) \sigma_j, \quad (17)$$

$$\sigma_K(C) = \sum_{j=0}^{20} \left(A_{20-j} + \frac{a}{c} B_{20-j} \right) \sigma_j,$$

де A_j і B_j — табличні значення.

З трьох розглянутих вище методів визначення КІН точнішим є останній, описаний в РД ЕО 1.1.2.05.0330-2012 [9], так як враховує глибину залягання тріщини, а напруження можна описувати законом довільної форми (у вигляді апроксимуючої функції). Методику, описану у VERLIFE [6], доцільно використовувати для експрес-оцінок на опір крихкому руйнуванню, а також для тріщин, які постулюються в зонах з лінійним та параболічним розподілом напружень.

Результати розрахункової оцінки ОКР. Як зазначалося раніше, було розглянуто два варіанти рівня накопиченої пошкоджуючої дози. Отже, для кожного з варіантів механічні властивості матеріалу вигородки та відповідні критичні значення КІН будуть різні. На рис. 9 показано розподіли межі плинності матеріалу вигородки на 60-у році експлуатації, а також критичних значень КІН для різних входних даних.

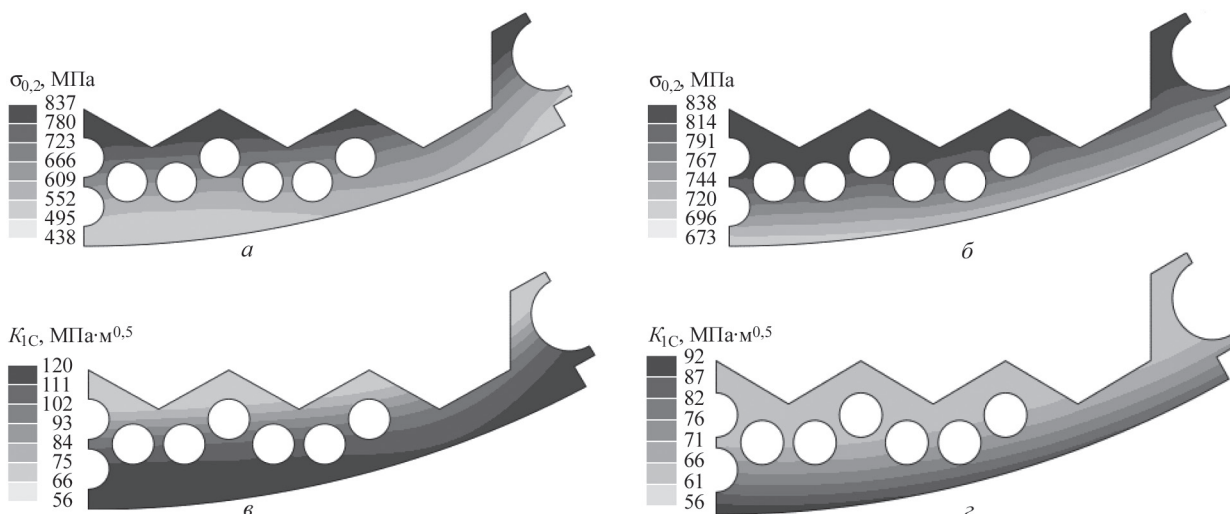


Рис. 9. Розподіли межі плинності $\sigma_{0.2}$ матеріалу вигородки при накопиченій пошкоджуючій дозі 95 зна (а) і 118 зна (б) та критичного значення K_{Ic} при 95 зна (в) і 118 зна (г)

Як видно з рис. 9, рівень межі плинності матеріалу залежно від накопиченої дози змінюється. Так, при максимальному значенні накопиченої пошкоджуючої дози 95 зна межа плинності знаходиться в діапазоні 438...837 МПа, а при 118 зна становить 673...838 МПа (рис. 9, а, б), що відповідно впливає і на критичне значення КІН (рис. 9, в, г).

У результаті математичного моделювання процесів зварювання, термообробки та подальшої експлуатації елементів ВКП протягом 60-и років було визначено, що максимальні напруження розтягу утворюються в осьовому напрямку. Таким чином, з точки зору консерватизму при визначенні КІН розглядалися підповерхневі еліптичні тріщини, які були розташовані в окружному напрямку. Схему розташування перерізів вигорідки, в яких постулювалися дефекти, показано на рис. 5.

Для перерізу № 5 (рис. 5), який знаходиться в зоні найбільшого впливу ЗТН на НДС конструкції вигорідки, результати порівняння значень КІН, отриманих згідно з трьма описаними вище методиками [8, 9] після 30-и і 60-и років експлуатації для двох варіантів рівня накопиченої пошкоджуючої дози і тріщин з різним a/c , представлено в табл. 1 без урахування ЗТН та в табл. 2 з урахуванням ЗТН.

Найбільш консервативними є значення КІН, отримані за допомогою методики РД ЕО [9], яку доцільно використовувати для аналізу ОКР із довільним розподілом напружень в зоні розташування тріщин. Методи, що описані в ПНАЕ [8] та VERLIFE [6], варто використовувати для оцінок КІН у найменш наван-

тажених ділянках з лінійним або параболічним законом розподілу напружень. Максимальні значення КІН у більшості випадків знаходяться в точці А контуру тріщин (рис. 8), що постулюються, а їх значення корелюють з результатами кожної методики.

Згідно з результатами визначення КІН у перерізі № 5 урахування ЗТН в одному перерізі може чинити як позитивний, так і негативний вплив. Наприклад, урахування ЗТН підвищує консервативність розрахунку КІН на 30-у році експлуатації в 2,2 рази (з 20,6 до 44,7 МПа·м^{0,5}).

Також було розглянуто перерізи №№ 1–4 вигорідки (рис. 5). Розрахунок КІН виконувався згідно з РД ЕО [9]. Порівняльний аналіз у перерізах проводився для постульованих дефектів у вигляді підповерхневих еліптичних тріщин у залежності від терміну експлуатації, накопиченої пошкоджуючої дози та врахування ЗТН. Геометричні розміри тріщин (полуосі a і c) вибиралися в залежності від розмірів зон розтягуючих напружень і могли змінюватися для одного і того ж перерізу в залежності від рівня пошкоджуючої накопиченої дози і врахування ЗТН. Глибина розташування дефектів h визначалася в залежності від її допустимих меж.

У перерізі № 1 отримано нижчі значення КІН при врахуванні ЗТН, ніж у моделі без урахування ЗТН. Для порівняння розглянуто розрахунковий випадок на 30-му році експлуатації для варіанту більш високого рівня накопиченої пошкоджуючої дози, де співвідношення між малою і великою півосями постульованої тріщини при-

Таблиця 1. КІН для тріщин з різним a/c в перерізі №5 без урахування ЗТН

a/c	Макс. накопич. доза, зна	K_A , МПа·м ^{0,5}		K_C , МПа·м ^{0,5}		K_D , МПа·м ^{0,5}		K , МПа·м ^{0,5}
		РД ЕО	VERLIFE	РД ЕО	VERLIFE	РД ЕО	VERLIFE	ПНАЕ
30 років експлуатації								
1/3	47,5	25	24,7	6,5	7,7	16,5	16,2	25,7
	59	15,3	15,1	4,4	5,5	10,5	10,3	14,9
2/3	47,5	20,6	20,8	4,6	5,9	14,9	13,3	21,7
	59	19,8	19,6	4,6	6,1	15,4	12,9	16,0
60 років експлуатації								
1/3	95	24,1	23,8	6,6	8,0	16,1	15,5	24,5
	118	15,5	15,3	5,6	7,4	11,3	11,4	13,8
2/3	95	19,8	20,0	4,7	6,1	14,5	12,4	20,7
	118	19,9	19,7	5,9	8,5	16,5	14,1	14,7

Таблиця 2. КІН для тріщин з різним a/c в перерізі №5 з урахуванням ЗТН

a/c	Макс. накопич. доза, зна	K_A , МПа·м ^{0,5}		K_C , МПа·м ^{0,5}		K_D , МПа·м ^{0,5}		K , МПа·м ^{0,5}
		РД ЕО	VERLIFE	РД ЕО	VERLIFE	РД ЕО	VERLIFE	ПНАЕ
30 років експлуатації								
1/3	47,5	39,5	38,8	25,1	34,7	30,9	36,7	37,2
	59	19,8	19,3	10,2	15,8	14,2	17,6	16,0
2/3	47,5	44,7	44,0	22,0	28,7	39,3	36,3	40,7
	59	16,7	16,4	7,8	13,2	13,7	14,8	11,7
60 років експлуатації								
1/3	95	34,6	33,9	21,3	29,7	26,7	31,6	32,4
	118	11,5	11,1	5,0	8,2	7,9	9,6	11,0
2/3	95	39,3	31,5	17,6	25,6	33,4	29,1	35,4
	118	14,7	14,1	5,5	9,8	11,7	11,9	11,7

ймається рівним $a/c = 1/3$, а їх розміри за рахунок великої зони напружень розтягу відповідають максимально допустимим згідно з ПНАЕ [8] значенням $a = 9$ мм; $c = 27$ мм при товщині основного металу $S = 36$ мм, глибині залягання тріщини $h = 3$ мм. На підставі всіх вищевказаних вхідних параметрів визначено, що без урахування ЗТН отримано максимальне значення $K_I = 17,2$ МПа·м^{0,5}, а з урахуванням ЗТН $K_I = 12,6$ МПа·м^{0,5}, тобто врахування ЗТН у даному випадку дозволяє знизити консервативність оцінки ОКР на 27 %. Однак найбільше зниження КІН (на 58 %) при врахуванні ЗТН було визначено в перерізі №4 з $K_I = 41,4$ МПа·м^{0,5} до 17,5 МПа·м^{0,5}.

За результатами розрахунку також спостерігається зростання КІН зі збільшенням розміру постульованого дефекту. Для порівняння розглянуто розрахунковий випадок перерізу № 2 на 60-му році експлуатації з максимальною накопиченою дозою 118 зна та врахуванням ЗТН з різними співвідношеннями $a/c = 1/3$ [4] та $a/c = 2/3$ [8]. Їх розміри за рахунок великої зони розтягувальних напружень відповідають максимально допустимим, згідно з ПНАЕ [8], значенням $a = 19,5$ мм; $c = 58,5$ мм (при $a/c = 1/3$) та $c = 29,25$ мм (при $a/c = 2/3$) при товщині основного металу в перерізі $S = 78$ мм, глибині залягання тріщини $h = 2$ мм. На підставі всіх вхідних параметрів визначено, що у розрахунковому випадку, де $a/c = 1/3$ $K_I = 21,4$ МПа·м^{0,5}, а при $a/c = 2/3$ $K_I = 17,5$ МПа·м^{0,5}, тобто врахування існуючих вимог [4] у даному випадку дозволяє підвищувати консервативність оцінки КІН у перерізі № 2 на 18 % порівняно з вимогами ПНАЕ [8]. Однак у разі, коли геометрія перерізу вигородки обмежується розміром великої півосі, збільшення площі постульованого дефекту проводиться за рахунок збільшення малої півосі a . На прикладі перерізу № 5 було визначено, що найбільш консервативна оцінка КІН виконується за вимогами співвідношення півосей $a/c = 2/3$ згідно з ПНАЕ [8].

Результати розрахунку показали, що на рівень значення КІН впливає розмір постульованої тріщини, вибір якого визначається розмірами зони напружень розтягу, які в свою чергу можуть залежати від урахування ЗТН. Також вищий рівень опромінення (накопиченої дози) матеріалу вигородки знижує вплив ЗТН на напружений стан і, відповідно, на оцінку ОКР конструкції.

Крім підповерхневої еліптичної тріщини також було розглянуто поверхневу напівеліптичну тріщину. Так як при врахуванні ЗТН максимальний рівень напружень спостерігається не на поверхні вигородки, як у випадку без урахування ЗТН, а в її об'ємі, то і значення КІН для поверхневого дефекту будуть нижчими. Тому була розглянута тріщина тільки в одному перерізі з найбільшим значенням осьових напружень у зазначеній області. Згідно з даними на рис. 3 найвищі напруження в осьово-

му напрямку без урахування ЗТН знаходяться в зоні перерізу № 4 (рис. 5), а відповідно до отриманих даних найвищі значення КІН визначаються на 30-у році експлуатації для варіанту більш низького рівня накопиченої пошкоджуючої дози. За методикою згідно з документом VERLIFE [6] були визначені максимальні КІН для випадку без урахування ЗТН ($K_I = 26,6$ МПа·м^{0,5}), а з урахуванням ЗТН значення зменшується ($K_I = 7,1$ МПа·м^{0,5}). Таким чином, урахування ЗТН дозволяє значно знизити консервативність при визначенні КІН для дефекту на зовнішній поверхні вигородки.

До НУЕ крім стаціонарного режиму роботи також відносяться режими розігріву і охолодження під час виходу на робочий режим і останови реактора, а також режим гідровипробувань. Враховуючи низьку швидкість нагріву і охолодження при НУЕ негативного впливу цих процесів на ОКР вигородки не визначено. У холодному стані за рахунок відсутності температурного градієнту рівень напружень у вигородці суттєво знижується відносно розігрітого стану в робочому режимі. Підвищення тиску теплоносія на всі поверхні вигородки під час гідровипробувань викликає додаткове рівномірне стискання (на – 8 МПа) і, відповідно, зниження напружень розтягу в об'ємі вигородки у порівнянні з умовами навантаження в робочому режимі, що також сприяє виконанню умови забезпеченню ОКР.

Таким чином, за результатами розрахунків був визначений істотний вплив ЗТН на оцінку ОКР вигородки ВКП реактора ВВЕР-1000 за НУЕ. В умовах аварійної ситуації рівень J -інтеграла для поверхневих напівеліптичних тріщин може досягати близьких до критичних значень [1]. Однак у роботі не враховували ЗТН, що могло суттєво вплинути на результати оцінки ОКР. Тому наступною актуальною задачею є розрахункова оцінка ОКР вигородки реактора ВВЕР-1000 в умовах аварійної ситуації з урахуванням визначених ЗТН [1].

Висновки

1. Урахування ЗТН істотно впливає на розподіл напружень у вигородці реактора ВВЕР-1000 в робочому режимі за НУЕ, а саме, утворюються зони високих осьових напружень розтягу (до 180 МПа). При цьому осьові напруження є істотно вищими у внутрішньому об'ємі вигородки, тоді як на внутрішній та зовнішніх поверхнях стають нижчими порівняно з розрахунковим випадком, де ЗТН не враховувалися. Окружні напруження відносно низькі (до 50 МПа) і урахування ЗТН не викликає суттєвого впливу на їх розподіл.

2. При проведенні розрахункової оцінки ОКР вигородки за НУЕ в якості постульованого дефекту з точки зору максимального консерватизму розглядалися підповерхневі еліптичні тріщини, розташовані в окружному напрямку, під дією високих розтягуючих осьових напружень. Результати розрахунків

у різних перерізах вигородки показали, що з урахуванням ЗТН консервативність оцінки ОКР може підвищуватись, але значення КІН K_{I1} для постульованих тріщин не перевищують критичного значення K_{Ic} з урахуванням коефіцієнта безпеки $n_k = 2$, тобто умова забезпечення ОКР виконується, а протягом довгострокової експлуатації значення коефіцієнту запасу ОКР $\eta = K_{I1}/[K_{I1}]$ збільшується за рахунок релаксації напружень у процесі радіаційної повзучості.

3. Найнебезпечнішим з точки зору ОКР за НУЕ є переріз №5 вигородки (в зоні великого охолоджуючого каналу), де максимальні значення КІН для окружної підповерхневої еліптичної тріщини досягають на 30-му році експлуатації $K_{I1} = 45 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$, а на 60-му році – $K_{I1} = 39 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$ при допустимих значеннях КІН $[K_{I1}]_1 = 58 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$ і $[K_{I1}]_1 = 53 \text{ МПа}$ відповідно, тобто протягом експлуатації мінімальне значення коефіцієнту запасу ОКР збільшується до $\eta = 1,36$.

4. Вищий рівень накопиченої пошкоджуючої дози матеріалу вигородки в процесі експлуатації сприяє зниженню рівня максимальних напружень у вигородці за рахунок впливу радіаційної повзучості. Відповідно зменшується вплив ЗТН на напружений стан і оцінка ОКР конструкції стає менш консервативною.

5. Урахування ЗТН дозволяє значно знизити консервативність при оцінці ОКР вигородки за НУЕ для поверхневих напівеліптичних тріщин, розташованих на зовнішній поверхні вигородки, де в процесі виготовлення утворюються залишкові напруження стискання.

Список літератури/ References

1. Pištora, V., Švrček, M., Ferko, P., Mirzov, I. (2018). Fracture Mechanical Assessment of VVER Reactor Internals. *Proceedings of the ASME. 2018 10.1115/PVP2018-84589*
2. Ориняк А.І. (2021) Методи розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень з врахуванням геометричної

нелінійності та довільної форми тріщини: дис. канд. техн. наук: 05.02.09, Київ.

- Oryniak, A.I. (2021) *Methods of calculation of stress intensity coefficient taking into account geometrical nonlinearity and arbitrary shape of crack*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree, 05.02.09, Kyiv [in Ukrainian].
3. Makhnenko, O., Kandala, S., Basistyuk, N. (2021) Influence of the heat transfer coefficient on the level of residual stress after heat treatment of the VVER-1000 reactor baffle. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(2), 254–259. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.2.245074>
4. ПМ-Т.0.03.333-15. Типовая программа по оценке технического состояния и продления срока эксплуатации внутренних корпусных устройств ВВЭР-1000. ПМ-Т.0.03.333-15. Standard program for assessing of technical condition and extension of service life of WVER-1000 internals.
5. Махненко О.В., Кандаля С.М., Савицька О.М. (2021) Порівняльний аналіз моделей радіаційного розпухання для розрахункового визначення НДС вигородки ВВЕР-1000. *Проблеми міцності*, 5, 13–22.
- Makhnenko, O.V., Kandala, S.M., Savitska, O.M. (2021) Comparative analysis of models of irradiation-induced swelling for calculated determination of SSS of WVER-1000 baffle. *Problemy Mitsnosti*, 5, 13–22 [in Ukrainian].
6. (2013) *Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WVER Nuclear Power Plants (VERLIFE)*. Vienna: Int. At. Energy Agency.
7. Chirkov, A.Yu., Kharchenko, V.V. (2020) Special features of computational assessment of the change in shape of WVER-1000 reactor core baffle in view of irradiation-induced swelling. *Strength Mater.*, 52, 339–352.
8. ПНАЭ Г-7-002-86 (1989) *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Москва, Энергоатомиздат.
- PNAE G-7-002-86 (1989): *Norms for strength calculation of equipment and pipelines of nuclear power plants*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
9. (2012) *Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭП на стадии эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы*. РД ЕО 1.1.2.05.0330-2012.
- RD EO 1.1.2.05.0330-2012: *Guidelines for strength calculation of equipment and pipelines of RBMK, WVER and EPG reactor plants at the stage of service beyond the design life*.

EVALUATION OF BRITTLE FRACTURE RESISTANCE OF WVER-1000 REACTOR ENCLOSURE DURING LONG-TERM SERVICE, TAKING INTO ACCOUNT THE RESIDUAL TECHNOLOGICAL STRESSES

O.V. Makhnenko, S.M. Kandala

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua, st_kan@ukr.net

The need to take into account the residual technological stresses (RTS) in the material of the enclosure of reactor internals (RI) of NPP power units of WVER-1000 type, resulting from technological processes of welding and postweld heat treatment at extension of safe service period beyond the design life is substantiated. The influence of RTS on the stress-strain state of the enclosure, as well as brittle fracture resistance (BFR) of the material in service was determined. It is shown that an essential redistribution of axial and hoop stresses in the enclosure is observed due to allowing for RTS, namely of the zone of high tensile stresses, which under normal operation conditions (NOC) move into the internal volume of the enclosure from its outer surface, while the area of these zone becomes larger. Such a redistribution of stresses has an essential influence on the level of stress intensity coefficient on the contour of the cracklike defects. The most critical areas, in terms of brittle strength, form in the inner volume of the enclosure, whereas the dimensions of subsurface elliptical crack, which is postulated, can be increased due to widening of the tensile stress zone, thus promoting greater conservatism of BFR assessment. Moreover, taking RTS into account allows a significant lowering of conservatism at assessment of enclosure BFR under NOC for surface semielliptical cracks, located on the enclosure outer surface, where residual compressive stresses arise during manufacture. Obtained results allow more precise determination of enclosure zones, prone to brittle fracture of the material under NOC that is important for improvement of the approaches to determination of RI of WVER-1000 type reactor. Ref. 9, Tabl. 2, Fig. 9.

Keywords: WVER-1000, reactor internals, enclosure, residual technological stresses, brittle fracture resistance, postulated cracks, stress intensity coefficient, normal operating conditions

Надійшла до редакції 30.05.2022

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДЕФЕКТІВ В ЕЛЕМЕНТАХ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ ШИРОГРАФІЇ

Л.М. Лобанов¹, В.Я. Знова², В.В. Савицький¹, І.В. Киянець¹, О.П. Шуткевич¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: shutkevich1996@gmail.com

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

Розроблено методику виявлення дефектних ділянок в елементах авіаційних конструкцій методом електронної широкографії. Виконано неруйнівний контроль якості натурних елементів авіаційних конструкцій ДП «Антонов»: частин лопаті гвинтокрила та тримерів руля висоти літака Ан-74. Бібліогр. 14, рис. 8.

Ключові слова: неруйнівний контроль якості, широкографія, авіаційні конструкції

Гарантування технологічної безпеки в основних галузях промисловості, запобігання виникненню аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру є складовою частиною безпечних умов життєдіяльності суспільства. Через високу вартість і трудомісткість заміни основних фондів зростає спрацьованість конструкцій, підвищується ймовірність виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Тому особливої актуальності набуває питання управління експлуатаційним часом надійного та безпечного використання конструкцій шляхом визначення залишкового ресурсу і встановлення нових термінів експлуатації, що перевищують передбачені проектною та експлуатаційною документацією, а також обов'язкових умов здійснення контролю та діагностики в цей період.

У провідних галузях сучасної промисловості, особливо в автомобіле- та суднобудуванні, енергетичному та авіаційно-космічному машинобудуванні при виготовленні тонколистових конструкцій широко використовуються нові конструкційні матеріали. Здебільшого вони працюють у складних механічних і температурних умовах, тому навіть незначна концентрація напружень, що виникає через дефекти у зварних швах або елементах конструкцій, призводить до їх руйнування.

Однією з головних причин, що знижують якість виробів авіаційної промисловості, є приховані дефекти, тобто дефекти, які не виявлено на підприємстві під час виконання діагностики. Значна частина відмов виробів на початковому етапі їх використання пов'язана з проявленням саме прихованих дефектів. Ними ж обумовлені в більшості випадків й руйнування літальних апаратів при їх подальшій експлуатації. У зв'язку з цим для вирішення проблеми підвищення якості та надійності авіаційних виробів важливим є неруйнівний контроль якості – дефектоскопія [1–8].

Забезпечення належної якості, працездатності та надійності виробів авіа- та машинобудування, підвищення їх конкурентоздатності на світовому ринку вимагає широкого використання методів і засобів неруйнівного контролю. Нерідко такі об'єкти потребують стовідсоткового контролю якості. При цьому слід зазначити, що жоден з відомих методів неруйнівного контролю не може задовольняти всім вимогам практики. Тому нагальною проблемою є розробка та впровадження комплексних систем і методів неруйнівного контролю.

Метод широкографії для неруйнівного контролю якості. Новим методом неруйнівного контролю, який інтенсивно розвивається, є лазерна широкографія, яка зі стадії лабораторного застосування перейшла на етап практичного використання і зайняла надійне місце не тільки в дослідних лабораторіях, але і в ряді галузей промисловості [9–11].

Метод зсувної спекл-інтерферометрії, або метод широкографії, не потребує особливого захисту від вібрацій, оскільки в цьому методі безпосередньо реєструються похідні від переміщень, тобто деформації. Метод широкографії не чутливий також до переміщення об'єкту як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації.

Важливою характерною особливістю методу електронної широкографії [9] є те, що він дозволяє отримати динамічну картину інтерференційних смуг, а також інтерференційну фазу смуг, які відповідають рівням деформування досліджуваного об'єкта, на екрані дисплею [12]. Відносна простота цього методу дозволяє застосовувати його для вирішення складніших задач, що пов'язані з аналізом деформацій та контролем якості конструкцій у промислових умовах.

Метод електронної широкографії полягає у порівнянні зображень поверхні досліджуваного об'єкта в двох його станах — початковому та навантаженому [13]. При цьому поверхня досліджуваного

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Шуткевич О.П. – <https://orcid.org/0000-0001-5758-2396>,

Киянець І.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2559-8200>, Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>

© Л.М. Лобанов, В.Я. Знова, В.В. Савицький, І.В. Киянець, О.П. Шуткевич, 2022

об'єкта освітлюється когерентним лазерним випромінюванням. Розсіяне дифузною поверхнею об'єкта світло, що утворює спекл-структуру, потрапляє на зсувний елемент та фокусується на матриці цифрової камери, де формується пара зсунутих у поперечному напрямку зображень поверхні об'єкта. Ці два зображення інтерферують одне з одним та створюють хаотичну інтерференційну картину, яка за допомогою цифрової камери вводиться до комп'ютера. Такі інтерференційні картини отримують для початкового стану об'єкта та після його навантаження на певну величину, що залежить від самого об'єкта і типу очікуваних дефектів. Далі введені до комп'ютера інтерференційні картини для двох станів об'єкта опрацьовуються в ньому до одержання широграми.

У випадку, якщо освітлення спрямовано перпендикулярно поверхні до об'єкта, величини $\partial w / \partial x$ і $\partial w / \partial y$, що спричиняються навантаженням досліджуваних об'єктів, розраховують за залежностями [13]:

$$\Delta\varphi_x = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \delta_x \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_y = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y} \delta_y \quad (2)$$

де $\Delta\varphi_x$ та $\Delta\varphi_y$ – відносна різниця фаз між променями, що інтерферують у випадку, коли напрямок широзсуву збігається з напрямками ОХ і ОУ відповідно; δ_x та δ_y – величини широзсуву уздовж напрямів ОХ і ОУ відповідно; $\partial w / \partial x$ і $\partial w / \partial y$ – часткові похідні від переміщень точок досліджуваної поверхні уздовж напрямків широзсуву відповідно ОХ і ОУ.

Широзсув визначає напрямок оптичного диференціювання величин переміщень досліджуваної поверхні та дає можливість отримати параметри її деформування, що виникли під дією прикладеного навантаження.

Вимірювання методом ширографії значень фази $\Delta\varphi_x$ або $\Delta\varphi_y$ у кожній точці зображень дозволяє обчислити деформування поверхні досліджуваних об'єктів внаслідок прикладеного навантаження та визначити місця розташування внутрішніх дефектів.

Для проведення експериментів з неруйнівного контролю якості авіаційних елементів застосовувалась ширографічна система, що базується на інтерферометрі Майкельсона та чутлива до деформацій, які є ортогональними до площини об'єкту (рис. 1). Ширографічна система включає такі основні компоненти: лазерну освітлювальну систему (1, 2), об'єкти (3), інтерферометр (4), цифрову камеру (12), ноутбук або комп'ютер з монітором (13), фазозсувну систему (7, 8, 11). Зовнішній вигляд ширографічного інтерферометра наведено на рис. 2.

Програмне забезпечення, встановлене на комп'ютері, використовується для обробки зображень. Воно дозволяє отримати інтерференційні картини смуг, які виникають при навантаженні досліджуваних об'єктів контролю, фільтрувати зображення, будувати поле фаз та тривимірне зображення деформування поверхні об'єкту, записувати отримані результати в файл.

Ширографічний контроль проводився з використанням системи, яка побудована за описаною вище блок-схемою та працює за наступним алгоритмом. Когерентне лазерне випромінюван-

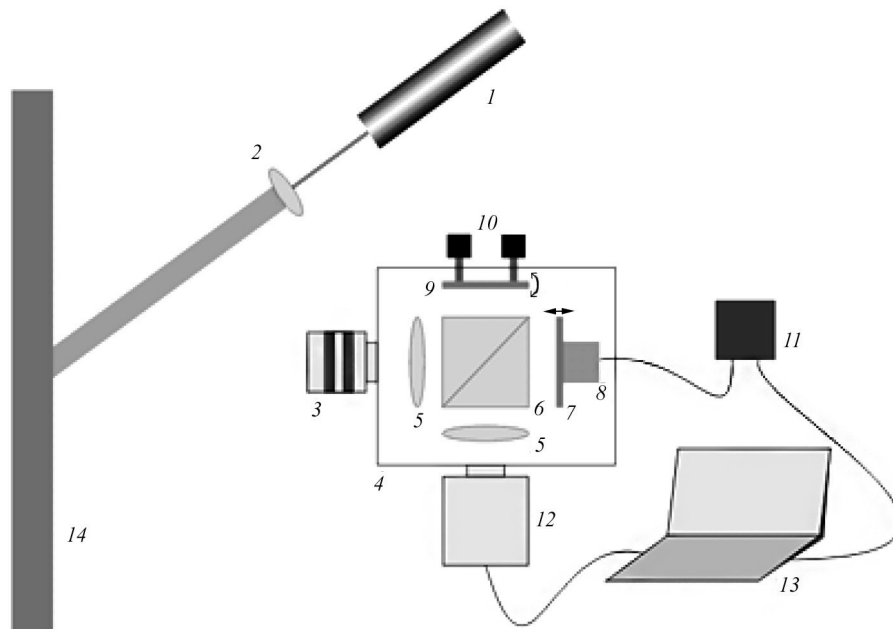


Рис. 1. Блок-схема ширографічної системи: 1 – джерело когерентного випромінювання; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – об'єкти; 4 – ширографічний інтерферометр, який включає в себе лінзи 5; світлоподільний кубик 6; дзеркало 7, закріплене на п'єзoelementі 8; дзеркало 9, яке створює зсув зображення за допомогою гвинтів 10; 11 – контролер для керування п'єзoelementом 8; 12 – цифрова камера; 13 – ноутбук; 14 – досліджуваний об'єкт



Рис. 2. Зовнішній вигляд широкографічного інтерферометра

ня, що освітлює досліджуваний об'єкт, створює спекл-картину, яка реєструється за допомогою цифрової камери. Потім об'єкт навантажують і знову записують спекл-картину. За допомогою програми, що розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, отримують широкограму або фазову картину на основі опрацювання серії зображень, які записані до та після навантаження досліджуваного об'єкту. Така широкограма відображає собою зображення зі змінними чорними та білими смугами, яка потребує додаткового опрацювання. В опрацювання зображення входять деякі основні операції, такі як: зниження рівня спекл-шуму, підвищення контрасту картини смуг тощо. Попередні експерименти [1, 13] показали, що для проведення неруйнівного контролю оптимальною величиною широзсуву є значення 5...15 мм. Було також визначено оптимальні параметри фільтрів та послідовності обробки для зменшення спекл-шуму в інтерферограмі.

Неруйнівний контроль якості елементів конструкцій авіакосмічної техніки. При виробництві сучасних конструкцій авіакосмічної техніки широко застосовують металеві та композитні стільникові панелі, що дозволяє значно зменшити вагу виробів. Композиційні матеріали широко використовуються в авіаційних конструкціях завдяки їх досить високій міцності та невеликій питомій вазі, а також завдяки більшим можливостям проектування, пов'язаним з легкістю надання їм складної форми.

У той же час ці матеріали схильні до появи в них складних для виявлення пошкоджень, що виникають внаслідок ударів та можуть значно зменшити їх міцність. Це призводить до виникнення різноманітних дефектів, таких як розшарування

або розрив волокон. На відміну від металевих матеріалів ці пошкодження непомітні на поверхні композиційних елементів, що може призвести до значного послаблення конструкції та в результаті може спричинити аварію. Тому важливим є проведення періодичного контролю та обстеження композиційних конструкцій. Сучасні методи неруйнівного контролю якості, такі як електронна широкографія, дають можливість здійснювати моніторинг технічного стану композиційних елементів [1, 7, 8, 12–14].

Стільникові конструкції, які нами досліджувались, відносяться до класу композитних матеріалів. Ці матеріали мають досить високу тріщиностійкість, яка залежить від границі міцності на розрив волокна, границі міцності матриці та міцності з'єднань при зсуві. Міцність зв'язку між матрицею та волокном визначає стійкість матеріалу до виникнення тріщини. Ці та інші унікальні властивості композитів забезпечуються правильним вибором волокна, кількістю волокон, орієнтацією шарів тощо. Використання композитних матеріалів зменшує вагу, наприклад, пасажирських літаків на 20...40 %, а також зменшує вартість багатьох інженерних конструкцій.

Досить розповсюджені композитні матеріали, які отримують шляхом склеювання. При такому способі з'єднання сусідні краї з нанесеним шаром клею можуть знаходитись у стані «прилипання» (непрорізані). В умовах статичних або динамічних навантажень на ділянці такого дефекту спостерігається розкриття крайок, що в таких матеріалах може призвести до руйнування вузлів і конструкцій в процесі їх експлуатації. Проте контроль якості таких конструкцій викликає ряд ускладнень при застосуванні традиційних методів контролю.

Стільникові композити складаються з двох зовнішніх обшивок, між якими знаходиться стільниковий наповнювач, який з'єднано з зовнішніми листами за допомогою зварювання, пайки або склеювання. Зовнішні листи обшивок можуть бути виготовлені як з металів, так і з пластиків або композитів.

Стільникова конструкція має високу жорсткість при вигині та високу міцність. До дефектів стільникової конструкції, які зменшують міцність при вигині та при стисканні, відносять: ушкодження наповнювача, дефекти поверхні, відсутність суцільності, невірно сформоване з'єднання, геометричні концентратори напружень.

Широкографічна методика неруйнівного контролю застосовувалась для кількох типів натурних елементів стільникових конструкцій з різними геометричними розмірами, які виготовлено з різних матеріалів. Результати застосування методу широкографії для неруйнівного контролю якості стільникових елементів з вуглецевого композиту, що були

виготовлені методом склеювання та мали розміри $300 \times 250 \times 10$ мм з попередньо закладеними дефектами у вигляді локального непоклеювання діаметром 5...15 мм, наведено на рис. 3. У якості навантаження застосовували обдув гарячим повітрям температурою близько 100°C впродовж 4...8 с. Запис широграм здійснювався з півторакратним збільшенням як на стадії нагріву, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОХ дорівнювала 5 мм. Деформування поверхні стільникової панелі внаслідок термічного навантаження підтверджує наявність дефектів, внесених досліджуваних зразків (рис. 3). Розподіл похідної $\partial w / \partial x$ уздовж обраного перерізу відображає деформування від площини поверхні в контрольованій зоні поверхні зразка. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектних зон (позначені стрілками). Наявність невеликих періодичних мінімумів і максимумів відповідає шорсткому стану досліджуваної поверхні елемента.

Експерименти з неруйнівного контролю методом ширографії у поєднанні з термічним навантаженням було виконано для натурного тримера руля висоти (РВ) літака Ан-74. Тример являв собою металеву стільникову конструкцію клиновидної форми розмірами $800 \times 180 \times 60$ мм (найширша частина). Дослідження було проведено з використанням термічного навантаження за допомогою обдуву

гарячим повітрям з температурою близько 100°C впродовж 3...15 с. Запис широграм здійснювався на стадії нагріву та охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОХ складала 1 мм. Результати, що характеризують наявність внутрішніх дефектів у досліджуваному елементі, наведено на рис. 4. Розподіл похідної $\partial w / \partial x$ уздовж обраного перерізу відображає деформування з площини поверхні в контрольованій зоні поверхні елемента. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектних зон (позначені стрілками).

Оскільки на ділянці 2 (рис. 4) було виявлено велику кількість дефектів, стрілками позначені лише дефекти, що розташовані уздовж проведеного перерізу. Виявлені дефекти були спричинені деформуванням і руйнуванням внутрішнього стільникового наповнювача та мали розміри від одного до п'яти стільникових елементів.

Одним з відповідальних елементів авіатранспорту є лопаті гвинтів. Внаслідок механічного пошкодження поверхні лопатей можливе зниження їх характеристик міцності. Тому важливим є неруйнівний контроль якості лопатей після певного періоду їх експлуатації. На рис. 5 наведено зображення розробленої ширографічної системи при неруйнівному контролі якості лопатей гвинтів у промислових умовах.

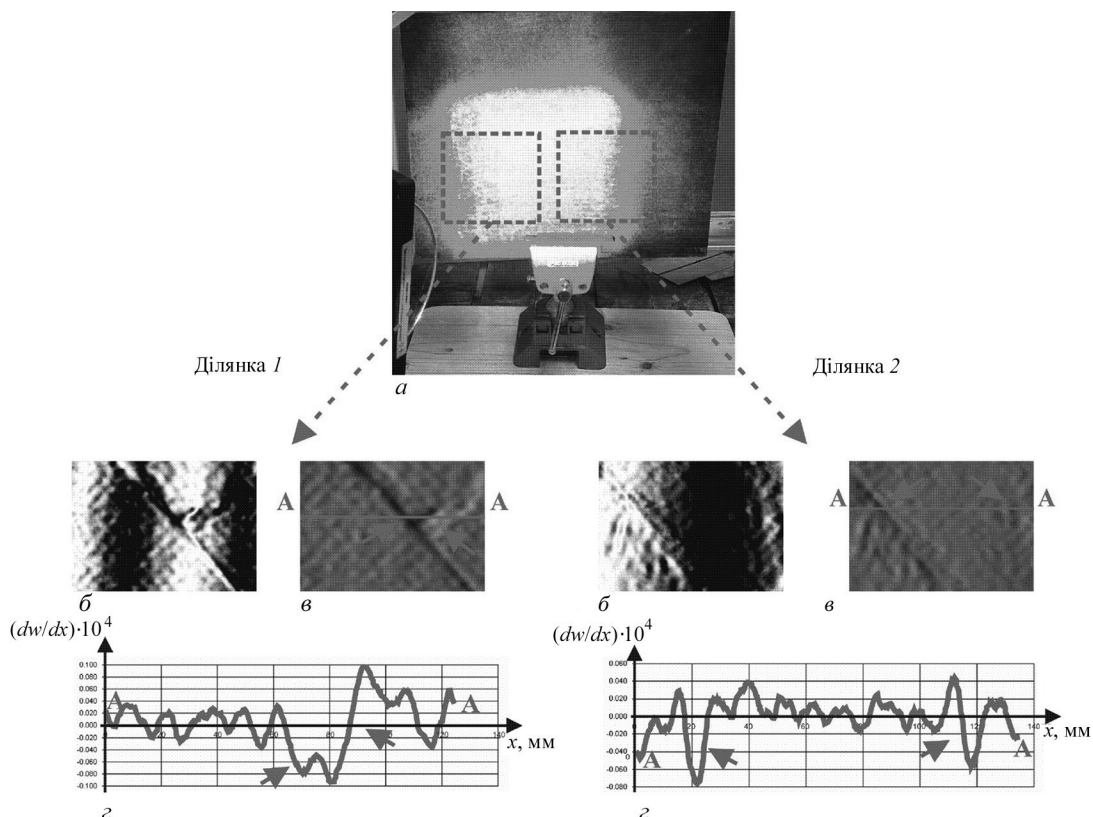


Рис. 3. Ширографічний контроль елемента композитної стільникової панелі (ділянки 1 і 2) під дією термічного навантаження гарячим повітрям температурою 100°C впродовж 5 с, величина широзсуву 5 мм уздовж осі ОХ: а – загальний вид елемента; б – широграми контрольованих ділянок; в – поверхні розподілу похідної $\partial w / \partial x$ на досліджуваній ділянці з нанесеним досліджуваним перерізом; з – криві зміни похідної $\partial w / \partial x$ уздовж обраного перерізу А-А (місце дефекту позначено стрілкою)

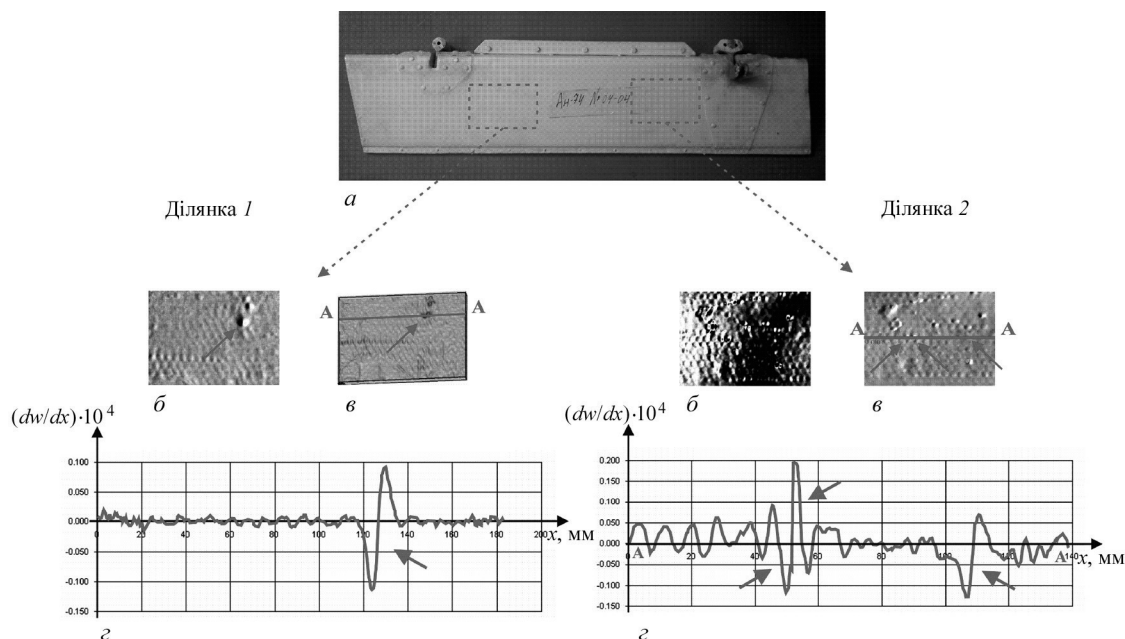


Рис. 4. Ширографічний контроль тримера РВ літака Ан-74 (ділянки 1 і 2) під дією термічного навантаження гарячим повітрям температурою 100 °С впродовж 5 с, величина широзсуву 1 мм уздовж осі ОХ: а – загальний вигляд елемента; б – широграма контрольованої ділянки; в – поверхня розподілу похідної dw/dx на досліджуваній ділянці з нанесеним досліджуваним перерізом; г – крива зміни похідної dw/dx уздовж обраного перерізу на ділянці з дефектом А-А (місця дефектів позначені стрілками)

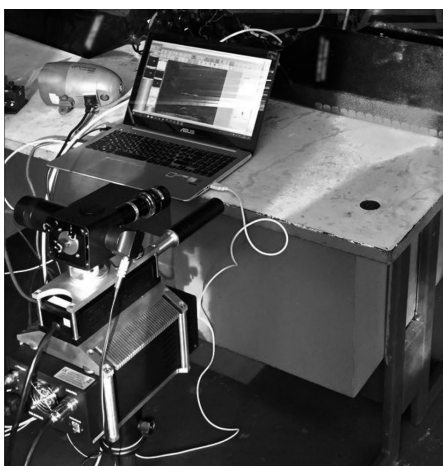


Рис. 5. Неруйнівний контроль якості лопатей авіаційних гвинтів

Чутливість методу ширографії залежить від величини широзсуву (1), (2). Дефекти, у залежності від виду та розташування, по різному проявляються при налаштуванні ширографічного інтерферометра з різним напрямком широзсуву. Тому доцільно проводити контроль якості однієї ділянки досліджуваного об'єкта при використанні широзсуву у горизонтальному та у вертикальному напрямках (рис. 6).

На рис. 6 зображено результати контролю якості методом ширографії окремої ділянки лопаті. Оскільки товщина лопаті змінюється у вертикальному напрямку та практично є постійною у горизонтальному напрямку, результати контролю якості, що отримані за різних напрямків широзсуву, відрізняються. При застосуванні вертикального широзсуву чіткіше про-

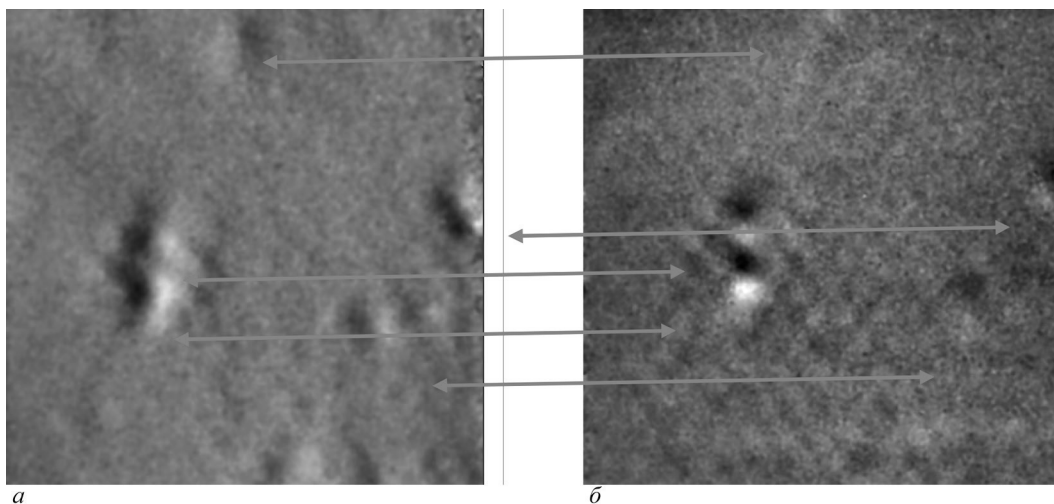


Рис. 6. Поле деформацій внаслідок термічного навантаження ділянки лопатей 200×200 мм при використанні широзсуву в горизонтальному (а) та вертикальному (б) напрямках

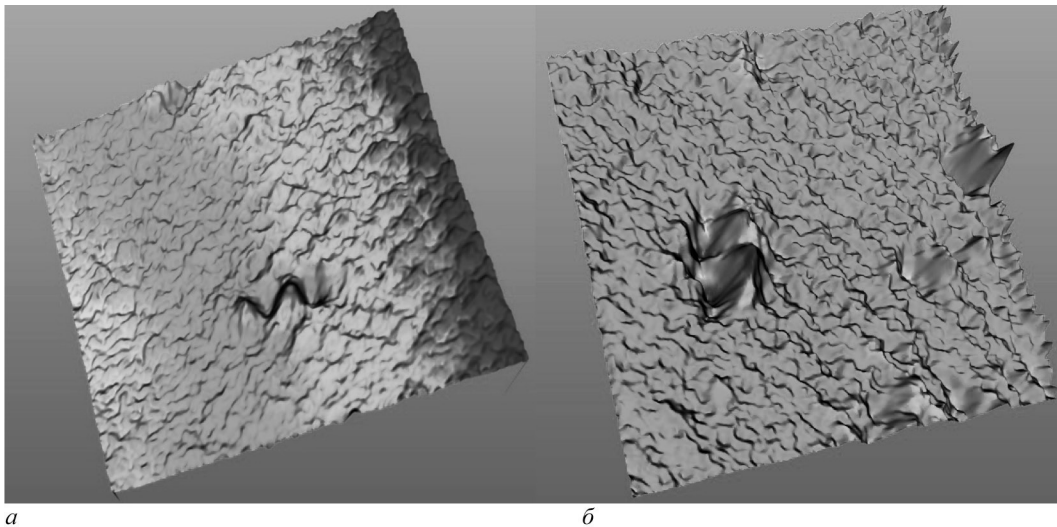


Рис. 7. Тривимірні поверхні деформування ділянки лопаті внаслідок її термічного навантаження при використанні широзсуву у вертикальному (а) та горизонтальному (б) напрямках

являється стільниковий наповнювач, проте в обох випадках на фоні рівномірного деформування можна виділити зони, у яких деформування точок поверхні є суттєвим. Найчіткіше проявляються два дефекти, які розташовані в лівій частині ділянки.

Наглядніше дефекти візуалізуються при побудові під різними кутами спостереження тривимірної поверхні деформування лопаті (рис. 7). Проте, як і на рис. 6, наповнювач проявляється при застосуванні широзсуву у вертикальному напрямку, тоді як деформування поверхні в деяких дефектних ді-

лянках майже не відрізняється від деформування в бездефектних. При використанні широзсуву у горизонтальному напрямку виявляються чотири дефектні ділянки. Аналогічні результати було отримано при дослідженні інших ділянок лопаті.

Методом електронної ширографії було проведено експериментальні дослідження фрагмента лопаті гвинтокрила розмірами $500 \times 250 \times 10$ мм, що являє собою композиційну конструкцію, з використанням термічного навантаження шляхом обдуву гарячим повітрям з температурою близько 150°C

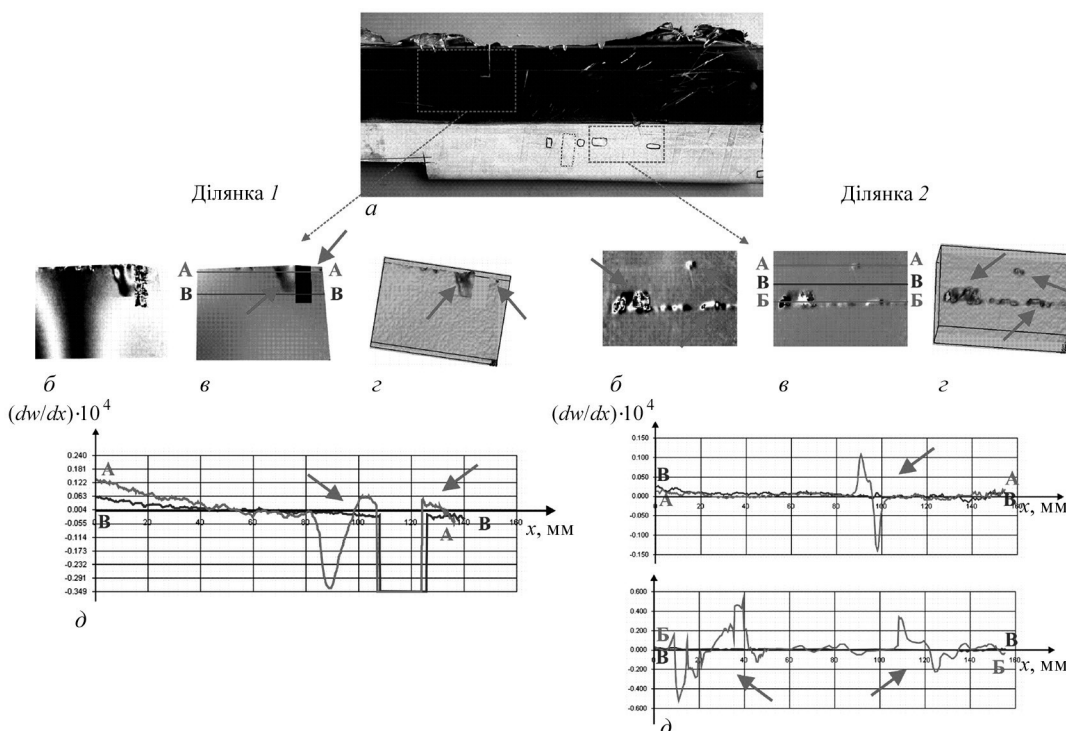


Рис. 8. Ширографічний контроль фрагмента лопаті гвинтокрила (ділянки 1 і 2) під дією термічного навантаження гарячим повітрям температурою 150°C впродовж 10 с, величина широзсуву 5 мм уздовж осі ОХ: а – загальний вигляд елемента; б – широграма контрольованої ділянки; в – поверхня розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці з нанесеним досліджуваним перерізом; г – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці поверхні елемента на стадії охолодження; д – крива зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраного перерізу на ділянці з дефектом А-А і Б-Б та бездефектній ділянці В-В (місця дефектів позначені стрілками)

впродовж 3...15 с. Запис широгам здійснювався з півторакратним збільшенням як на стадії нагріву, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОХ складала 5 мм. Результати, що характеризують наявність внутрішніх дефектів у досліджуваному фрагменті, наведено на рис. 8. Розподіл похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраного перерізу відображає деформування з площини поверхні в контрольованій зоні поверхні елемента. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектних зон (позначені стрілками).

На рис. 8 (ділянка 1) поміж позначеними дефектами на поверхні досліджуваного фрагменту знаходилася конструкційна вставка, що не потребувала контролю і тому була видалена з процесу опрацювання ширографічної картини, аби не «зашумлювала» її.

Висновки

1. Розроблено методику взначення методом ширографії зон концентрації деформацій, що проявляються у вигляді дефектів, в елементах авіаційних конструкцій, виготовлених з металевих і композиційних матеріалів.

2. Доведено ефективність метода електронної ширографії для виявлення в клеєних елементах вуглецевих стільникових авіаційних панелей внутрішніх дефектів з мінімальним розміром 5 мм.

3. Виконано неруйнівний контроль якості натурних елементів авіаційних конструкцій ДП «Антонов», а саме: частини лопаті гвинтокрила та тримера РВ літака Ан-74.

Список літератури/References

1. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкая Е.М. и др. (2011) Оперативный контроль качества сварных панелей из сплава ВТ-20 с использованием метода электронной ширографии. *Автоматическая сварка*, **11**, 28–33. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitskaya, E.M., Kyianets, I.V., Lysak, V.V. (2011) In-process quality control of welded panels of alloy VT20 using method of electron shearography. *The Paton Welding J.*, **11**, 22–27.
2. Gupta, R., Mitchell, D., Blanche, J. et al. (2021) A Review of Sensing Technologies for Non-Destructive Evaluation of Structural Composite Materials. *J. Compos. Sci.*, **5**, 319. DOI:https://doi.org/10.3390/jcs5120319
3. Fahr, A. (2014) *Aeronautical Applications of Non-destructive Testing*. Canada, 82–85.
4. (2001) *Неруйнівний контроль і технічна діагностика*. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, Фіз.-мех. ін-т.

- (2001) *Non-destructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, PMI [in Ukrainian].
5. Муравський Л.І., Вороняк Т.І., Кметь А.Б. (2014) *Лазерна інтерферометрія поверхні для потреб технічної діагностики*. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, СПОЛОМ. Muravsky, L.I., Voronyak, T.I., Kmet', A.B. (2014) *Laser surface interferometry for the needs of technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
6. Nazarchuk, Z.T., Muravsky, L.I., Kuts, O.G. (2022) Nondestructive Testing of Thin Composite Structures for Subsurface Defects Detection Using Dynamic Laser Speckles. *Research in Nondestructive Evaluation*, **33**, 2, 59–77. DOI:https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2049407
7. Lai, W.L., Kou, S.C., Poon, C.S. et al. (2009) Characterization of flaws embedded in externally bonded CFRP on concrete beams by infrared thermography and shearography. *J. Nondestruct Eval*, **28**(1), 27–35.
8. Vandenrijt, J.F., Xiong, H., Lequesne, C. et al. (2019) Shearography inspection of monolithic CFRP composites: finite element modeling approach for assessing an adequate strategy of artificial defects representing delamination. In: *Lehmann, P., Osten, W., Gonsalves, Jr. A.A. (eds) «Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI»*, Vol 11056, pp 107–113. SPIE.
9. Hung, Y.Y., Taylor, C.E. (1974) A speckle-shearing interferometer: a tool for measuring derivatives of surface displacement. *Exp. Mech.*, **4**, 169.
10. Zhao, Q., Dan, X., Sun, F. et al. (2018) Digital Shearography for NDT: Phase Measurement Technique and Recent Developments. *Appl. Sci.*, **8**, 2662.
11. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Ткачук Г.И. и др. (2005) Оперативный контроль качества и определение остаточных напряжений в сварных конструкциях методами электронной ширографии и спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, **8**, 39–44. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I., Kyianets, I.V. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **8**, 35–40.
12. Лобанов Л.М., Савицкий В.В., Киянець І.В. и др. (2021) Неруйнівний контроль елементів титанових стільникових панелей методом ширографії з використанням вакуумного навантаження. *Техн. діагностика та неруйнівн. контроль*, **4**, 19–24. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.02 Lobanov, L.M., Savitskyi, V.V., Kyianets, I.V., Shutkevich, O.P., Shyian, K.V. (2021) Non-destructive testing of elements of titanium honeycomb panels by shearography method using vacuum load. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **4**, 19–24. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.02 [in Ukrainian].
13. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Олейник Е.М., Киянець І.В. (2004) Методика, технология и аппаратура ширографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций. *Техн. диагностика и неразр. контроль*, **3**, 25–28. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Oleinik, E.M., Kyianets, I.V. Procedure, technology and instrumentation of shearographic non-destructive testing of materials and elements of structures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 25–28 [in Russian].
14. Shearography Technique on Inspection of Advanced Aircraft Composite Material. *Mohd Yusnisyam Yusofetal 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 554 012009.

VISUALIZATION OF DEFECTS IN AIRCRAFT STRUCTURE ELEMENTS BY ELECTRON SHEAROGRAPHY METHOD

L.M. Lobanov¹, V.Ya. Znova², V.V. Savitskyi¹, I.V. Kyianets¹, O.P. Shutkevych¹

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

E-mail: shutkevich1996@gmail.com

²SC «Antonov». 1 Acad. Tupolev str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@antonov.com

A procedure was developed to detect defective areas in aircraft structure elements by electron shearography method. Nondestructive testing of the quality of full-scale elements of SC «Antonov» aircraft structures was performed: parts of helicopter blade and AN-74 aircraft elevator trimmer. Ref. 14, Fig. 8.

Keywords: nondestructive testing, shearography, aircraft structures

Надійшла до редакції 13.07.2022

СПОСІБ ТЕРМОГРАФУВАННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ ДИМОВИХ ТРУБ ДИСТАНЦІЙНИМ ПАСИВНИМ ТЕПЛОВІЗІЙНИМ МЕТОДОМ

О.Г. Бондаренко, В.Ю. Глуховський

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: glukhovskyy@gmail.com

У роботі розглянуто принцип реалізації способу термографування зовнішньої поверхні димових труб дистанційним пасивним тепловізійним методом із застосуванням лазерно-термографічного пристрою. Наведено алгоритм розрахунку геометричних параметрів внутрішньої несущільності, яка виявляється у вигляді поверхневої аномалії температурного поля. Наведений алгоритм є основою при вирішенні оберненої задачі пасивної термографії, що дає змогу підвищити достовірність оцінки технічного стану димових труб та інших важкодоступних промислових об'єктів. Бібліогр. 1, рис. 3.

Ключові слова: димові промислові труби, діагностування технічного стану, інфрачервона техніка, тепловізор, лазерний далекомір, пасивний тепловізійний метод, термографія, дефектометрія, геометричні параметри несущільності

Можливості дистанційного обстеження та діагностування технічного стану димових труб значно розширилися з використанням інфрачервоної техніки, серед якої найбільше розповсюдження отримали різні типи тепловізорів. Ці прилади дозволяють оперативно фіксувати аномалії температурного поля на зовнішній поверхні димової труби у вигляді термограм. Такі аномалії формуються під дією потенціалу температури газів при наявності несущільності або зміні теплофізичних характеристик в елементах конструкції труби. Але встановити зв'язок між зареєстрованими тепловізором аномаліями температурного поля на поверхні труби та параметрами її внутрішньої структури до сьогоднішнього часу ще не вдалося у зв'язку з відсутністю універсальної обробки термограм. Це пов'язано в першу чергу з тим, що кожен тип труби має свої особливості аномального розподілення температури на її поверхні, які залежать від конструкції труби, теплофізичних властивостей матеріалів, умов теплопередачі та теплообміну на зовнішніх межах тощо.

Для отримання інформації про температурні аномалії на зовнішній поверхні димової труби та визначення за їх допомогою геометричних розмірів, товщини та глибини залягання несущільності шляхом застосування оберненої задачі було розроблено спосіб термографування зовнішньої поверхні димової труби дистанційним пасивним тепловізійним методом [1].

Суть способу полягає в тому, що процес термографування зовнішньої поверхні димової труби доповнено пристроєм для дистанційного вимірювання відстані, за допомогою якого фіксується значення дистанції термографування та кут візування локальної температурної аномалії. Одночасно фіксуються кути поля зору тепловізора, яким здійснюється процедура термографування зазначеної температурної аномалії на поверхні труби. У якості пристрою для вимірювання відстані використовується лазерний

далекомір. Принцип застосування способу з наведенням тепловізора та далекоміра на зону термографування на поверхні димової труби наведено на рис. 1, де: 1 – стовбур димової труби; 2 – напрямок високотемпературного потоку газів, що рухається каналом димової труби; 3 – напрямок високотемпературного потоку газів, що взаємодіє з поверхнею стовбура димової труби; 4 – внутрішній дефект стінки стовбура димової труби (зменшення товщини стінки труби внаслідок впливу агресивного середовища); 5 – теплове випромінювання; 6 – зона формування локальних температурних аномалій на зовнішній поверхні труби; 7 – далекомір; 8 – фотографічний штатив; 9 – тепловізор; L – відстань до локальної температурної аномалії; α – кут візування; θ – кут поля зору тепловізора за координатою y .

Блок-схему лазерно-термографічного пристрою та однобічної реєстрації локальних температурних аномалій на зовнішній поверхні димової труби наведено на рис. 2, де: 1 – стінка димової труби; 2 – несущільність стінки; 3 – температурна аномалія над несущільністю; 4 – лазерний далекомір; 5 – тепловізор; 6 – жорстка основа; 7 –

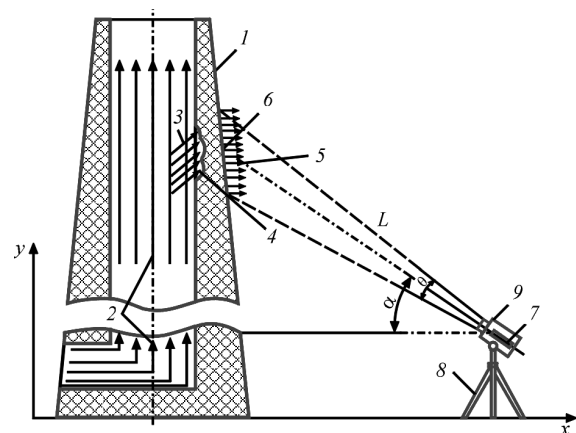


Рис. 1. Принцип застосування способу з наведенням тепловізора та далекоміра на зону термографування на поверхні димової труби

канал передачі інформації з тепловізора; 8 – блок обробки тепловізійної інформації; 9 – персональний комп'ютер; 10 – канал передачі інформації від лазерного далекоміра; β – кут поля зору тепловізора за координатою x . Для виконання процесу термографування кожної температурної аномалії 6 димової труби тепловізор 5 та лазерний далекомір 4 закріплюють на жорсткій основі (платформі) 6. Інформація про локальну температурну аномалію 3 з тепловізора 5 каналом 7 передачі інформації крізь блок 8 обробки тепловізійної інформації потрапляє до персонального комп'ютера 9. Інформація про відстань до димової труби з далекоміра 4 потрапляє до персонального комп'ютера 9 напряму.

Для зручності наведення тепловізора та лазерного далекоміра на контрольовану поверхню та надійної фіксації необхідної інформації платформа з тепловізором та лазерним далекоміром закріплюється на вузлі просторової орієнтації фотографічного штативу (див. рис. 1), який дає змогу рухатись у різних просторових напрямках відносно центральної, нерухомої точки. У процесі термографування локальної температурної аномалії інформація про кути θ та β поля зору тепловізора визначається параметрами його оптичного блоку, а відстань L до неї та кут відхилення α від нормалі, відповідно, вимірами лазерного далекоміра. Із зафіксованого тепловізором термографічного

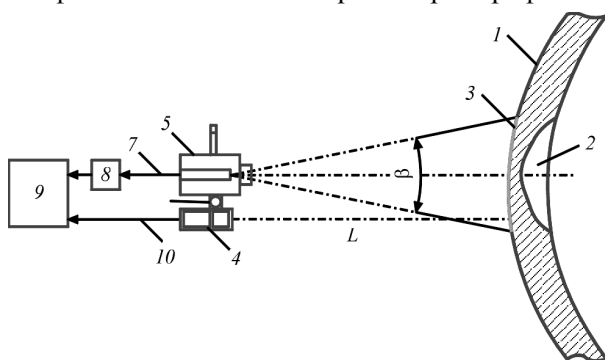


Рис. 2. Блок-схема лазерно-термографічного пристрою та однієї реєстрації локальних температурних аномалій на зовнішній поверхні димової труби

зображення температурної аномалії на зовнішній поверхні димової труби персональний комп'ютер за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення формує термограму температурного поля аномалії над несучільністю димової труби.

Під час термографування аномалії температурного поля над несучільністю на зовнішній поверхні димової труби тепловізор та далекомір встановлюються у вибраній точці.

Схему отримання наведеної інформації та представлення аномалії температурного поля у вигляді кадру термограми прямокутної форми наведено на рис. 3 [1].

Наведені на рис. 3 зв'язки дозволяють обґрунтувати алгоритм вирішення оберненої задачі пасивної термографії шляхом розрахунку площі S аномалії температурного поля над несучільністю, що буде відповідати її розмірам (a , b) відповідно за координатами (x , y). Для реалізації алгоритму застосовується спеціалізоване програмне забезпечення, яке входить до складу персонального комп'ютера.

Алгоритм розрахунку геометричних параметрів (a , b) несучільності викладемо в наступній послідовності.

Прийmemo:

$$a = DE; b = AC; L = BP; AB = BC = b/2 \quad (1)$$

Тоді відстань від місця встановлення тепловізора та далекоміра до поверхні димової труби за координатою x визначається за виразом:

$$OP = BP \cdot \cos \alpha = L \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

Вираз для розрахунку параметра a кадру термограми за координатою x можна записати наступним чином:

$$a = DE = 2PB \cdot \tan \beta/2 \quad (3)$$

Остаточно значення параметра a буде дорівнювати:

$$a = 2L \cdot \tan \beta/2 \quad (4)$$

Вираз для визначення параметра b кадру термограми за координатою y можна записати у вигляді:

$$b = AC = CO - AO \quad (5)$$

Запишемо значення CO та CA з використанням тригонометричних функцій:

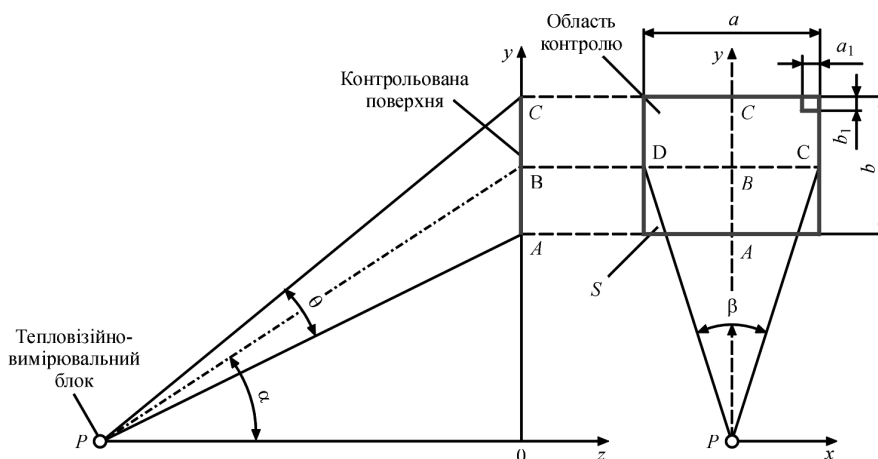


Рис. 3. Схема отримання інформації в процесі термографування та представлення аномалії температурного поля у вигляді кадру термограми прямокутної форми: P – точка встановлення тепловізора та далекоміра; S – площа контрольованої ділянки аномалії; a , b – геометричні параметри кадру термограми; a_1 , b_1 – геометричні параметри одиничного пікселя термограми

$$\begin{aligned} CO &= OP \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) = BP \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) \\ AO &= OP \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right) = BP \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

Підставивши значення CO та AO виразів (6) до виразу (5), отримаємо остаточну формулу для розрахунку параметру b кадру термограми:

$$b = L \cdot \cos \alpha \left[\operatorname{tg}\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) - \operatorname{tg}\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (7)$$

За значеннями лінійних параметрів a та b кадру термограми та за кількістю пікселів балометричної матриці тепловізора відповідно за горизонталлю (k_a) та вертикаллю (k_b) розміри пікселів будуть дорівнювати:

$$\text{за горизонталлю: } \alpha_1 = \frac{a}{k_a}, \text{ за вертикаллю: } b_1 = \frac{b}{k_b} \quad (8)$$

Тоді площа одного пікселя для кожної температурної аномалії буде визначатись за виразом:

$$S_n = a_1 \cdot b_1 = \frac{a \cdot b}{k_a \cdot k_b} \quad (9)$$

У залежності від значень температурних діапазонів $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ для відповідних температурних профілів буде розрахована відповідна кількість пікселів: N_1, N_2, N_3 .

Тоді площі кожного температурного профілю будуть визначатись за виразами:

$$\begin{aligned} \text{для } \Delta t_1: S_1 &= \sum_1^{N_1} \frac{a \cdot b}{k_a \cdot k_b}, \text{ для } \Delta t_2: S_2 = \sum_1^{N_2} \frac{a \cdot b}{k_a \cdot k_b}, \\ \text{для } \Delta t_3: S_3 &= \sum_1^{N_3} \frac{a \cdot b}{k_a \cdot k_b} \end{aligned} \quad (10)$$

Обґрунтування та розробка алгоритму оберненої задачі шляхом визначення геометричних параметрів несучільностей димової труби вирішує задачу теплової дефектометрії в пасивній термографії. Збільшення розмірів несучільностей у зв'язку зі зростанням амплітуди розподілення аномалії температурного поля в пасивній термографії дозволяє підвищити достовірність дистанційної оцінки технічного стану димових труб, інших важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів

пасивним тепловізійним методом без виведення їх з експлуатації.

У зв'язку з тим, що несучільності димової труби в її шарах починають розвиватись з внутрішньої поверхні труби, амплітуди аномалій розподілення температурного поля над ними дозволяють робити висновок про їх розміри за товщиною та розпізнавати контури несучільностей у різних шарах димової труби, що може хоча б опосередковано свідчити про вирішення задачі теплової томографії в пасивній термографії. Запропонований алгоритм вирішення оберненої задачі пасивної термографії встановлює зв'язок між зареєстрованими аномаліями температурного поля на зовнішній поверхні об'єкта діагностування та параметрами його внутрішньої структури з використанням пасивного дистанційного тепловізійного методу контролю.

Висновки

Розроблено спосіб термографування зовнішньої поверхні димової труби дистанційним пасивним тепловізійним методом, суть якого полягає в тому, що процес термографування зовнішньої поверхні димової труби доповнено процедурою визначення дистанції контролю та куту візування тепловізійного пристрою.

Наведено алгоритм розрахунку геометричних параметрів (a, b) несучільності, яка виявляється у вигляді аномалії температурного поля на поверхні контрольованого об'єкту.

Розроблені науково-методичні аспекти дистанційного діагностування технічного стану тришарових цегляних димових труб також можуть бути застосовані для оцінки технічного стану багат шарових бетонних димових труб (наприклад чотиришарових), інших важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів з використанням пасивного тепловізійного методу контролю.

Список літератури

1. Троїцький В.О., Бондаренко О.Г., Глуховський В.Ю. (2018) *Спосіб дистанційної пасивної теплової діагностики важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів*. Патент на винахід № 122355. Заявл. 27.06.2018. Опубл. 26.10.2020. Бюл. № 20. Troitskiy, V.O., Bondarenko, O.G., Glukhovskiy, V.Yu. *Method of passive thermal diagnostics of difficult-to-access and potentially dangerous industrial objects*. Patent for invention 122355, fill. 27.06.2018, publ. 26.10.2020 [in Ukrainian].

METHOD OF THERMOGRAPHY OF THE OUTER SURFACE OF CHIMNEYS BY REMOTE PASSIVE THERMAL VISION TECHNIQUE

O.G. Bondarenko, V.Yu. Glukhovskiy

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: glukhovskyy@gmail.com

The work deals with the principles of realization of the method of thermographing of the outer surface of chimneys by remote passive thermal vision method with application of a laser-thermographic device. An algorithm for calculation of the geometrical parameters of inner discontinuity is given. It is manifested in the form of surface anomaly of the temperature field. The given algorithm is the base for solving the inverse problem of passive thermography, allowing an improvement of the reliability of assessment of the technical condition of chimneys, and other difficult-of-access industrial facilities. Ref. 1, Fig. 3.

Keywords: industrial chimneys, diagnosing of the technical condition, infrared technology, thermal imager, laser distance meter, passive thermal vision technique, thermography, defectometry, geometrical parameters of discontinuity

Надійшла до редакції 06.06.2022

АВТОГЕНЕРАТОРНІ ВИХРОСТРУМОВІ ДЕФЕКТОСКОПИ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В.М. Учанін¹, С.А. Бичков², О.І. Семенець², В.Я. Дереча², С.А. Александров³

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: derecha@antonom.com

³ДП «Івченко-Прогрес». 69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2

Однією з причин порушень льотної придатності та аварійних руйнувань літаків в експлуатації є зародження та розвиток дефектів втомного і корозійного походження. Періодичний неруйнівний контроль відповідальних вузлів на всіх етапах життєвого циклу літаків є надзвичайно важливим фактором забезпечення їх безпечної експлуатації. Вихрострумівий метод має низку переваг порівняно з іншими методами контролю авіаційних конструкцій через високу чутливість до дефектів різного походження, продуктивність та можливість виявлення дефектів без безпосереднього контакту з поверхнею об'єкта контролю (ОК) або навіть через різні покриття без їх видалення. Метод використовують для виявлення експлуатаційних дефектів елементів авіаційних конструкцій, зокрема таких, як фюзеляж, крила, колісні диски, лопатки та турбіни авіаційних двигунів, кронштейни тощо. Вихрострумівий дефектоскопію з використанням високих робочих частот застосовують для безконтактного виявлення неглибоких поверхневих тріщин, зокрема таких, що виникають внаслідок втоми. Метод не має альтернативи за необхідності виявити тріщини у важкодоступних місцях, зокрема на бічних стінках заклепкових отворів. У статті представлено вітчизняні автогенераторні вихроструміві дефектоскопи сімейства ЛЕОТЕСТ з двоконтурною коливальною системою, які працюють у режимі переривчастої генерації. Дефектоскопи пройшли державні випробування та включені в регламент з технічного обслуговування літаків ДП «Антонов» і авіаційних двигунів ДП «Івченко-Прогрес» і ПАТ «Мотор-Січ». Наведено загальні методичні рекомендації та приклади застосування дефектоскопів для контролю вузлів літаків і деталей авіаційних двигунів в умовах їх експлуатації. Подано пропозиції щодо подальшого вдосконалення автогенераторних дефектоскопів з метою зменшення впливу на достовірність контролю суб'єктивних факторів, пов'язаних з кваліфікацією оператора-дефектоскопіста. Бібліогр. 15, рис. 11.

Ключові слова: вихрострумівий дефектоскоп, автогенератор, авіаційна конструкція, двигун, чутливість, достовірність контролю, алюмінієвий сплав, титановий сплав

Вступ. Експлуатаційні дефекти втомного і корозійного походження є однією з причин порушень льотної придатності та аварійних руйнувань літаків [1–3]. Прикрим прикладом може бути розгерметизація та аварійна посадка літака Боїнг 737-300 авіакомпанії Southwest Airlines через руйнування фюзеляжу. Аналіз показав, що обшивка зруйнувалась у місці з'єднання заклепками двох зовнішніх панелей, де перед тим утворилися втомні тріщини. Авіакомпанія стверджувала, що літак проходив усі необхідні перевірки та профілактичні роботи. Цей та багато інших прикладів підкреслюють актуальність постійного покращення чутливості та достовірності при виявленні експлуатаційних дефектів авіаційних конструкцій (АК) засобами неруйнівного контролю (НК) та важливість оптимізації процедур підтримання льотної придатності в цілому. Надійний періодичний НК на всіх етапах життєвого циклу літаків є важливим фактором їх безпечної експлуатації. Різні фізичні методи НК, що використовують для технічного обслуговування літаків, мають свої переваги та обмеження, пов'язані з чутливістю до дефектів різного типу, простотою та

продуктивністю процедур контролю, вартістю апаратури та витратних матеріалів тощо [4–7].

Вихрострумівий метод НК широко використовується для виявлення дефектів електропровідних матеріалів ще з 50-х років минулого століття [8–13]. Метод ґрунтується на взаємодії електромагнітного поля вихрострумівого перетворювача (ВСП) з матеріалом об'єкта контролю (ОК), яка призводить до утворення вихрових струмів. Порушення суцільності матеріалу (дефект) призводить до перерозподілу вихрових струмів і відповідної зміни сигналу ВСП. Метод має низку переваг порівняно з іншими методами НК авіаційних конструкцій через високу чутливість контролю до дефектів різного походження, продуктивність і можливість виявлення дефектів без безпосереднього контакту з поверхнею ОК або навіть через різні покриття без їх видалення. Вихрострумівий метод зазвичай використовують для виявлення втомних тріщин та корозійних пошкоджень елементів АК, зокрема таких, як фюзеляж, крила, колісні диски, лопатки та турбіни авіаційних двигунів (АД), кронштейни тощо [9, 11]. При цьому

Учанін В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9664-2101>, Семенець О.І. – <http://orcid.org/0000-0002-9117-2494>,

Дереча В.Я. – <http://orcid.org/0000-0003-1773-912X>

© В.М. Учанін, С.А. Бичков, О.І. Семенець, В.Я. Дереча, С.А. Александров, 2022

вихрострумова дефектоскопія з використанням високих робочих частот понад 1 МГц застосовується для безконтактного виявлення неглибоких поверхневих тріщин (наприклад тих, що виникають внаслідок втоми) у конструкціях літака (у тому числі через лакофарбове покриття). Цей метод не має альтернативи за необхідності виявити тріщини у важкодоступних місцях, зокрема розташованих на бічних стінках заклепкових отворів [12, 13].

У 90-х роках минулого століття виникла необхідність розробки вітчизняного вихрострумового дефектоскопа (ВД) з покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками для заміни застарілих приладів російського виробництва. Головною вимогою при цьому було підвищення чутливості до коротких і дрібних втомних тріщин у неферомагнітних матеріалах з різною питомою електропровідністю (ПЕП) і у феромагнітних сталях, а також досягнення високої локальності контролю, необхідної для контролю деталей з криволінійною поверхнею, зокрема в зоні галтельних переходів та заклепок або на внутрішній поверхні отворів. Сучасні вимоги до ВД для контролю АК передбачають вирішення комплексу наступних задач:

- реалізувати можливість ефективного відстроювання від змін зазору між ВСП та поверхнею ОК, так як контроль в експлуатації часто проводиться через шар захисного покриття;
- забезпечити можливість роботи в польових і аеродромних умовах;
- забезпечити невелику вагу і розміри, захищеність від пилу та вологи, автономне живлення, просту індикацію наявності дефектів;
- ВД повинен працювати з ВСП різного типу (олівцеві, Г-подібні, для контролю отворів, пазів, різьб тощо).

Додатковою вимогою було подолання недоліків відомих автогенераторних ВД, серед яких – недостатня чутливість і нестабільна робота під час дефектоскопії деталей із титанових сплавів.

Поставлені завдання завершилися створенням автогенераторних ВД типу ВД 3.03Н, ВД 3.01Н, ВД 3.02Н, ВД 4.01Н, ВД 4.02Н, ВД 4.03Н (ЛЕОТЕСТ ВД), основним завданням яких є виявлення поверхневих дефектів у різних конструкційних електропровідних сплавах. Дефектоскопи пройшли державні випробування і внесені в державний реєстр засобів виміральної техніки. У цих ВД використано параметричні ВСП, питання оптимізації конструкції яких наведено в [13, 14]. Для побудови ВД використано автогенератор (АГ) з двоконтурною коливальною системою, що працює в режимі переривчастої генерації. Під час розробки ВД запатентовано низку нових технічних рішень, серед яких: схема АГ на польовому транзисторі з ізольованим затвором; схема керування

частотою генерації і схема регенерації коливальних автогенератора (СРКА). Дослідження особливостей цих схем наведено в [15], де також показано їх переваги порівняно з традиційними схемами.

У цій статті розглянуто особливості побудови та основні технічні характеристики розроблених автогенераторних ВД, а також результати їх використання для вихрострумової дефектоскопії авіаційної техніки.

1. Високочастотні автогенераторні вихрострумові дефектоскопи типу ЛЕОТЕСТ ВД. Функціональну схему ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД з елементами комутації, керування та індикації представлено на рис. 1, на якій контуром виділено функціональні блоки, що розміщено на платі. За межами контурної лінії показано елементи комутації, керування та індикації, що розташовано переважно на передній і задній панелях ВД. Для настроювання ВД шляхом зміни резонансної частоти АГ передбачено два змінних резистори «НАСТРОЮВАННЯ»: $VR1$ «ТОЧНО» і $VR2$ «ГРУБО» [15]. Грубе настроювання виконують зміною постійної напруги на варикапі, який входить у коливальну систему АГ. Точне настроювання досягається незначною зміною добротності робочого контуру шляхом регулювання опору шунтувального змінного резистора $VR1$. Вибір робочої частоти для контролю матеріалів з високопровідних (ВП), низькопровідних (НП) і феромагнітних матеріалів (ФМ) проводять за допомогою перемикача режиму $S2$ «ВП»–«НП»–«ФМ» шляхом підключення до робочого контуру конденсатора C . Друга група контактів перемикача $S2$ комутує конденсатори зворотного зв'язку АГ (на рис. 1 не показано). Робочий контур складається з обмотки L ВСП і розподіленої ємності кабелю, який підключається за допомогою з'єднувача $X1$ «ДАТЧИК» [14]. Для перевірки чутливості ВД за допомогою перемикача $S1$ «ІМІТАТОР» до робочого контуру підключається додатковий резистор імітації порогового дефекту. Автогенератор зв'язаний з СРКА двома лініями, стрілки на яких показують напрямки впливу. По одній лінії на СРКА коливальний надходить сигнал з АГ. По іншій лінії на АГ надходить напруга живлення, що використовується для поновлення його коливальності після їх зриву шляхом збільшення напруги живлення [15]. Крім того, СРКА формує із сигналів, що надходять із АГ, сигнали керування світловою і звуковою індикаціями [15]. Світлова індикація дефекту здійснюється за допомогою червоного світлодіода $VD1$ «ДЕФЕКТ», на який надходить сигнал з розширювача імпульсу, який збільшує тривалість імпульсу від дефекту до 60 мс (у 25 разів), що робить його помітним для оператора. Одночасно про дефект сигналізує стрілочний індикатор PV ,

стрілка якого переходить із зеленої зони шкали в червону. Сигнал керування звуковим індикатором з СРКА надходить на підсилювач струму звукового індикатора, з виходу якого звуковий сигнал через регулятор гучності *VR3* надходить через змінний резистор *X2* «ЗВУК» на головні телефони. Дефектоскопи включають за допомогою тумблера *S3* «ВКЛ». Живлення ВД здійснюється від вбудованого акумулятора *GB* напругою 9 В через стабілізатор, який створює стабілізоване живлення напругою 6 В. Для контролю заряду акумулятора *GB* використано компаратор. Після включення ВД за напруги живлення більше 7 В світлодіод *VD2* «ВКЛ» світиться зеленим світлом. При зменшенні напруги нижче 7 В компаратор спрацьовує і світлодіод *VD2* «ВКЛ» світиться червоним світлом, що сигналізує про необхідність заряду акумулятора. Для заряду акумулятора *GB* від зовнішньої мережі 220 В використовується зовнішній зарядний пристрій з вихідною постійною напругою 12 В, який підключається через з'єднувач *X2*

«ЗП». Для стабілізації зарядного струму в схемі передбачено стабілізатор. Час безперервної роботи ВД від вбудованого акумулятора ємністю 220 мА·год за струму споживання 5 мА без підзарядки складає 44 год.

Розроблено низку автогенераторних ВД (рис. 2). Дефектоскоп типу ВД 3.03 (рис. 2, а) є універсальним, так як призначений для контролю виробів із алюмінієвих, титанових сплавів і феромагнітних сталей. Дефектоскопи типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.01Н і ВД 3.02Н призначені для контролю тільки алюмінієвих сплавів та низькопровідних сплавів і феромагнітних сталей відповідно. У цих ВД відсутній перемикач режиму S_2 (див. рис. 1). Розроблено спрощені варіанти ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 4.01Н, ЛЕОТЕСТ ВД 4.02Н і ЛЕОТЕСТ ВД 4.03Н для контролю окремо тільки алюмінієвих, титанових сплавів і феромагнітних сталей відповідно, у яких відсутні стрілочні індикатори PV , перемикачі S_2 контрольованого матеріалу та імітатори дефекту S_1 (рис. 2, б).

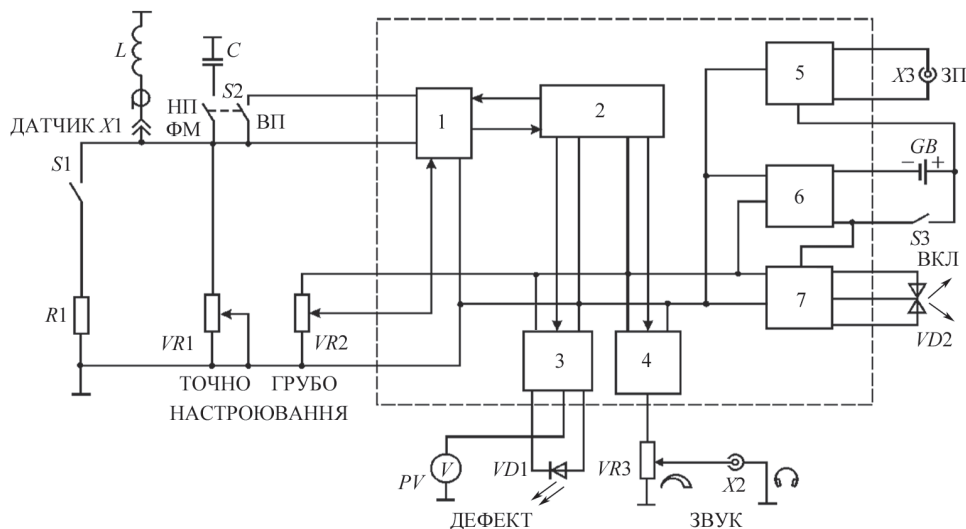


Рис. 1. Функціональна схема ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД з елементами комутації, керування та індикації: 1 – АГ; 2 – СРКА; 3 – розширювач імпульсу; 4 – підсилювач звукового індикатора; 5 – стабілізатор зарядного струму; 6 – стабілізатор напруги 6 В; 7 – компаратор контролю розряду акумулятора; *L* – параметричний ВСП; *S*1 – кнопка імітатора дефекту; *S*2 – перемикач вибору матеріалів; *S*3 – тумблер включення; *R*1 – резистор імітації дефекту; *V*1 – змінний резистор налаштування «ТОЧНО»; *R*2 – змінний резистор налаштування «ГРУБО»; *V*3 – змінний резистор регулятора гучності; *X*1, *X*2, *X*3 – з’єднувачі підключення ВСП, головних телефонів і зарядного пристрою відповідно; *V*Д1 – світлодіод індикації «ДЕФЕКТ»; *V*Д2 – світлодіод включення «ВКЛ» і розряду акумулятора; *GB* – акумулятор

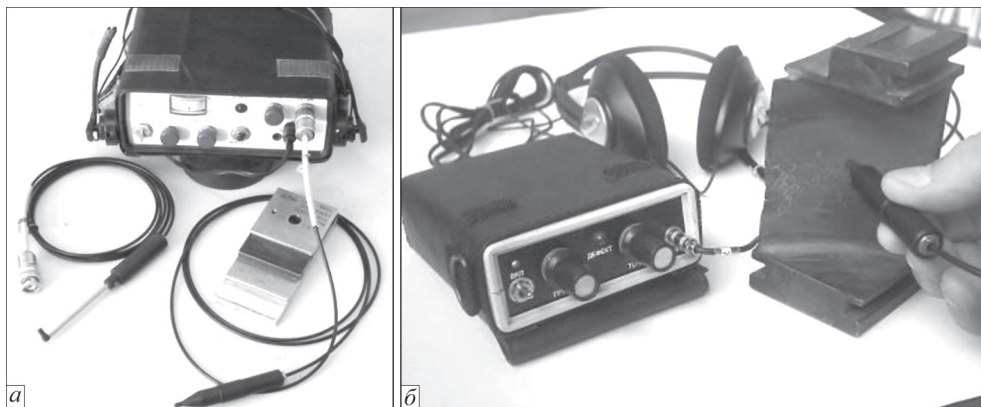


Рис. 2. Зовнішній вигляд ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.03Н з підключеним «олівцевим» ВСП і Г-подібним ВСП (а) і ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 4.01Н з ВСП «олівцевого» типу (б)

Основні технічні характеристики дефектоскопів типу ЛЕОТЕСТ ВД:

1. Поріг чутливості ВД забезпечує виявлення поверхневих дефектів, еквівалентних за можливістю виявлення штучному поверхневому дефекту типу прорізу з наступними розмірами:

1.1 Дефектоскопи типу ВД 3.01Н і ВД 4.01Н – у високопровідних неферомагнітних матеріалах (наприклад, алюміній та його сплави) – з розмірами: довжина 2 мм; ширина 0,1 мм; глибина 0,2 мм.

1.2 Дефектоскоп ВД 3.02Н і ВД 4.02Н – у низькопровідних неферомагнітних матеріалах (наприклад, сплави титану та аустенітні сталі) – з розмірами: довжина 2 мм; ширина 0,1 мм; глибина 0,5 мм.

1.3 Дефектоскоп ВД 3.03Н:

– у високопровідних неферомагнітних матеріалах (наприклад, алюміній та його сплави) – з розмірами: довжина – 2 мм; ширина – 0,1 мм; глибина – 0,2 мм;

– у низькопровідних неферомагнітних матеріалах (наприклад, сплави титану та аустенітні сталі) – з розмірами: довжина 2 мм; ширина 0,1 мм; глибина 0,5 мм;

– у феромагнітних сплавах (наприклад, конструкційні сталі типу Ст45): довжина 2 мм; ширина 0,1 мм; глибина 0,5 мм.

2. Сигналізація при виявленні дефекту здійснюється:

- звуковим способом головними телефонами;
- світловим індикатором (червоним світлодіодом);
- стрілковим індикатором.

3. Конструкція ВД повинна забезпечувати виконання наступних додаткових функцій:

- електронну імітацію наявності дефекту;
- контроль ступеня розряду акумулятора.

4. Електричне живлення ВД здійснюється від вмонтованого акумулятора з номінальною напругою 9 В.

5. Габаритні розміри електронного блоку не більше ніж 90×200×200 мм.

6. Маса ВД не більше ніж 2,5 кг.

7. Дефектоскопи забезпечують відстроювання від змін зазору між ВСП та поверхнею ОК під час сканування.

2. Методичні рекомендації та досвід використання високочастотних ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД для контролю вузлів літаків ДП «Антонов».

Успішному впровадженню автогенераторних ВД передували заходи щодо забезпечення контролепридатності АК, реалізація яких передбачена на етапі конструювання кожного з літаків ДП «Антонов». При цьому ретельно враховують можливості та обмеження кожного з методів НК, у тому числі реалізованих за допомогою представлених ВД. Дефектоскопи типу ЛЕОТЕСТ ВД використовують для контролю літаків в експлуатації, зокрема під час робіт по продовженню ресурсу. Ними контролюють обшивки фюзеляжу і крила, силові панелі крила і центроплана, барабани коліс, кронштейни тощо (рис. 3). Підтверджено їх високу чутливість і можливість реалізації на їх основі типових методик контролю вузлів АТ. Це дозволило ввести ці ВД в регламент з технічного обслуговування літаків ДП «Антонов». На відміну від інших приладів ці ВД ефективні під час контролю вузлів із титанових сплавів, що дало можливість вперше контролювати зокрема деталі шасі (кронштейни, важелі, траверси тощо) літаків АН-72.

Методики вихрострумowego контролю АК передбачають розділення поверхні ОК на окремі зони контролю. В окремі зони зокрема виділяють [8]: торці ребер жорсткості, лапок, полиць; радіусні (галтельні) переходи; дно проточок, колодязів, пазів; стінки колодязів, пазів; стінки наскрізних та глухих отворів; крайові ділянки; ділянки з однаковою кривизною; ділянки, що прилягають до феромагнітних елементів; ділянки з різною товщиною лакофарбового покриття.

Залежно від геометричних характеристик зон контролю та доступу до них вибирають відповід-



Рис. 3. Вихрострумний контроль обшивки фюзеляжу в зоні відкидної рампи літака АН-12 (а) та кронштейнів літака АН-124 (б) за допомогою дефектоскопа ЛЕОТЕСТ ВД 3.01Н

ний тип ВСП. Настроювати ВД необхідно, встановивши ВСП на ОК по нормалі до поверхні кожної зони перед її контролем; під час переходу до контролю деталей, виготовлених із матеріалу з іншою електропровідністю та зі зміною типу ВСП. Нахил осі ВСП відносно нормалі до поверхні не повинен перевищувати $\pm 10^\circ$. Після настроювання ВД перевіряють на бездефектній ділянці, переміщуючи ВСП у межах зони контролю по довільному трикутнику зі сторонами в кілька міліметрів. Якщо показники індикатора практично не відхиляються, вважається, що настроювання проведено на бездефектній ділянці. Перед контролем радіусного переходу проводять настроювання, встановивши ВСП на відстані 1,0...1,5 мм від осі переходу. Перед контролем стінки отвору таку перевірку виконують, обертаючи ВСП навколо осі на $20...30^\circ$ в обидва боки. Якщо показники індикатора не змінились, то настроювання проведено на бездефектній ділянці. Надалі проводять контроль, переміщуючи ВСП (скануючи) по всій зоні контролю. Під час сканування вісь обмотки ВСП повинна бути перпендикулярною до поверхні ОК у кожній точці траєкторії сканування. Швидкість переміщення ВСП не повинна переви-

шувати 50 мм/с. Під час контролю плоских поверхонь проводять сканування, переміщуючи ВСП у двох взаємно перпендикулярних напрямках з кроком 2 мм (рис. 4, а). Для контролю радіусних переходів ВСП зигзагоподібно переміщують у напрямку, перпендикулярному осі переходу (рис. 4, б).

Під час контролю крайових зон (стики обшивок, зони отворів, пазів, заклепок тощо) ВСП переміщують вздовж краю на відстані 2 мм від нього до осі ВСП, як це подано на рис. 5.

Характерним прикладом реалізації технологій контролю за допомогою ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД є контроль кронштейнів кріплення гідроциліндрів керування переднім трапом і гермотрапом преднього грузопілка літаків АН-124 та АН-124-100, які виготовляють з алюмінієвого сплаву ВАЛ-10, В93пчТ1 або В16чТ (рис. 6). Тут контролюють зони навколо болтового з'єднання, пересуваючи ВСП на відстані 3...4 мм від краю шайби, та торці проушин, переміщуючи ВСП вздовж кутових кромки на відстані 2 мм від краю (рис. 6, а). Аналогічно контролюють зони навколо болта основи кронштейна. Крім того, зону основи кронштейна контролюють шляхом переміщення ВСП вздовж краєвих кромки на відстані 2 мм від кромки або по центру (рис. 6, б).

Вище зазначалось, що відомі автогенераторні ВД мали недостатню чутливість до дефектів і стабільність під час дефектоскопії вузлів із титанових сплавів. Це можна пояснити їх низькою питомою електропровідністю, яка для основних титанових сплавів лежить у діапазоні приблизно від 0,5 до 1,5 МСм/м, що приблизно у 40 разів менше електропровідності алюмінієвих сплавів. Представлені ВД показали кращу чутливість, що дозволило розширити перелік вузлів, які контролюють вихрострумовим методом. Характерним прикладом є контроль качалки керування ступками передньої опори шасі літака АН-72 з титанового сплаву ВТ-22. Схему сканування критичних зон качалки під час контролю параметричним ВСП подано на рис. 7. Періодичному експлуатаційному контролю підлягають зокрема зони отворів (А, В і Г) і крайові зони (Б і Д) (рис. 7).

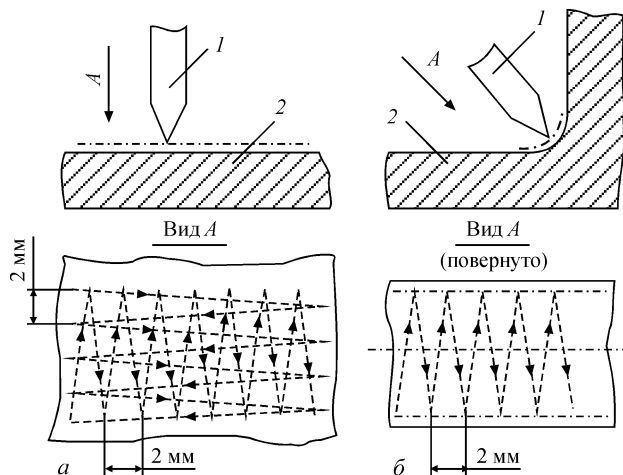


Рис. 4. Схеми сканування ділянок плоских поверхонь (а) і радіусних переходів (б): 1 – ВСП; 2 – ОК

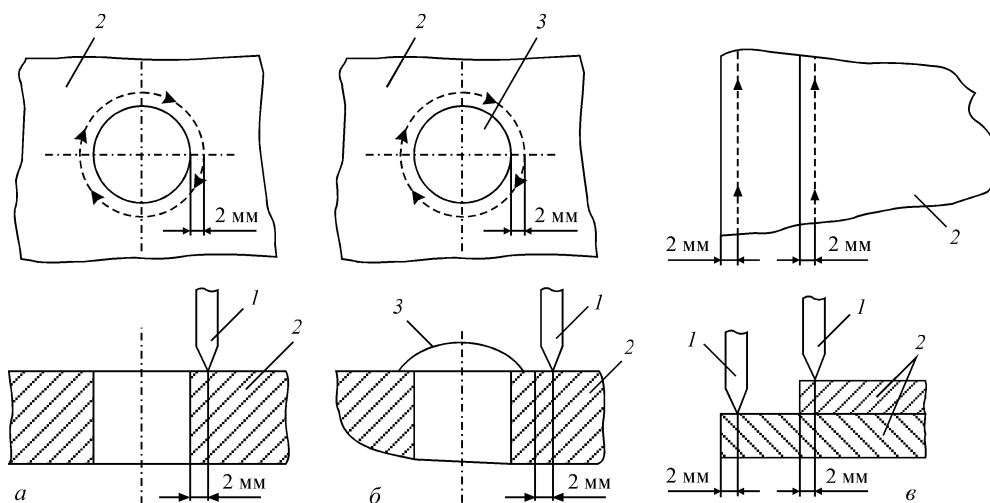


Рис. 5. Типові схеми сканування крайової зони отворів (а); зони заклепок (б) та стиків обшивок (в): 1 – ВСП; 2 – ОК; 3 – заклепка

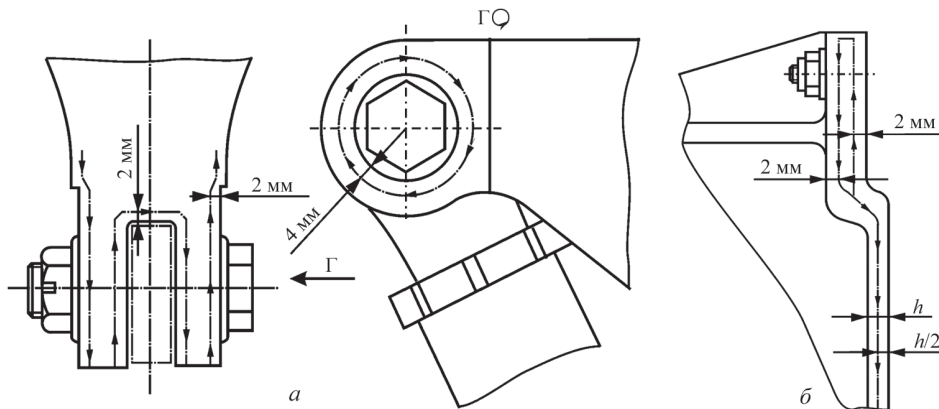


Рис. 6. Зони контролю кронштейнів кріплення літаків АН-124 та АН-124-100

З титанового сплаву ВТ-22 виготовлені також навіски закінцівки крила по першому і другому лонжеронах літаків АН-124 і АН-124-100, зони ви-

хрострумового контролю яких показано на рис. 8. Тут перед контролем необхідно демонтувати закінцівки крила, очистити поверхню від забруднень та видалити механічні пошкодження (риски, забоїни).

3. Використання високочастотних ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.01Н для контролю авіаційних двигунів. Дефектоскопи використовують для виявлення тріщин у деталях двигунів ПАТ «Мотор-Січ» і ДП «Івченко-Прогрес» (рис. 9). Під час тривалої експлуатації або після нештатних ситуацій (наприклад, попадання стороннього предмета) на хвостовику (рис. 10, а) і антивібраційних полицях (рис. 10, б) робочих лопатей вентилятора можлива поява і розвиток тріщин. Контроль здійснюють без демонтажу АД і додаткової підготовки поверхні. Даний контроль лопатей застосовують і під час капітальних ремонтів АД. Капілярний метод не завжди дозволяє виявити тріщини на таких лопатях. В одному з випадків капілярний метод (виконаний неодноразово) не підтвердив наявності дефекту, який впевнено виявляли за допомогою ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.03Н. Дослідження показали, що тріщина була «затиснутою» і практично не мала розкриття.

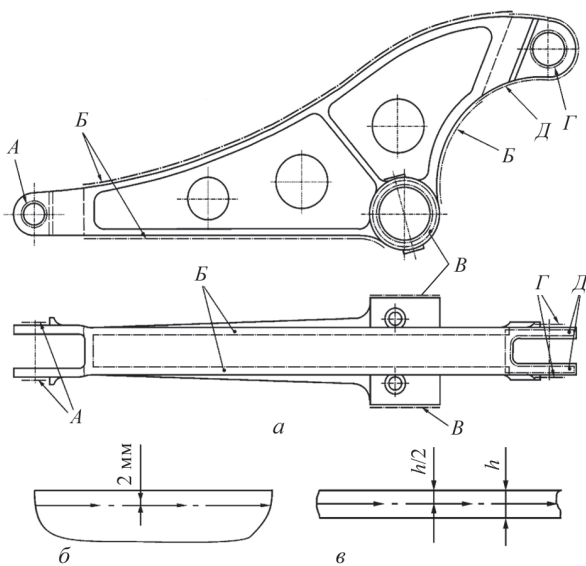


Рис. 7. Схема вихрострумового контролю качалки керування ступками передньої опори шасі літака АН-72 (а) та схеми сканування зони Б (б) і зони В і Д (в)

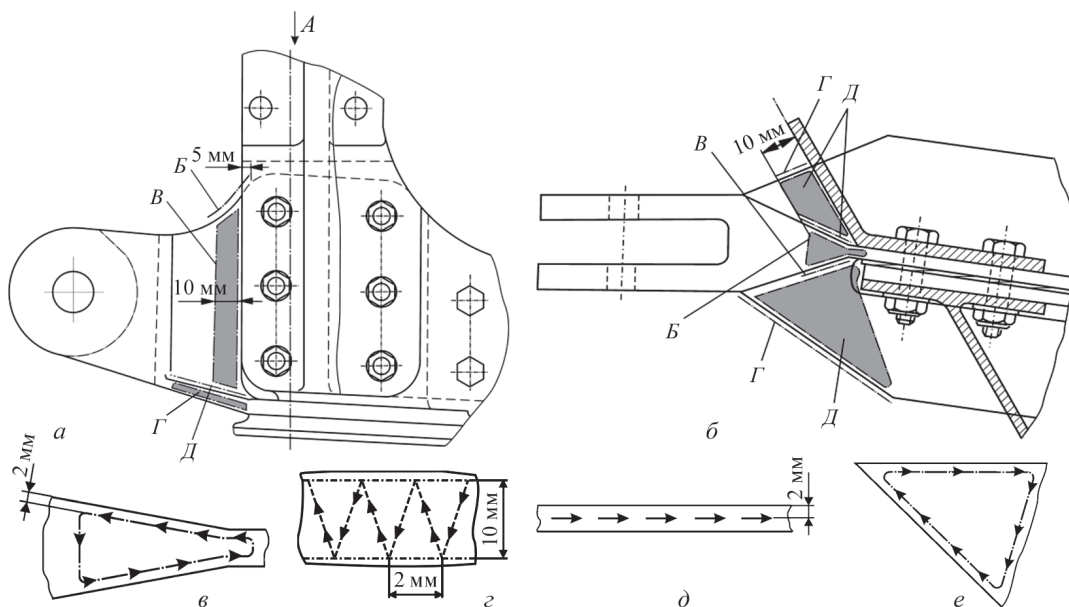


Рис. 8. Зони вихрострумового контролю (заштриховано) навіски закінцівки крила літаків АН-124 і АН-124-100: загальний вигляд (а) і вигляд по А (б), а також схеми сканування в зонах Б (в), В (г), Г (д) і Д (е)



Рис. 9. Контроль деталей АД дефектоскопом ЛЕОТЕСТ ВД 3.03Н



Рис. 10. Лопать вентилятора з зонами контролю хвостовика (а) і антивібраційних полиць (б)

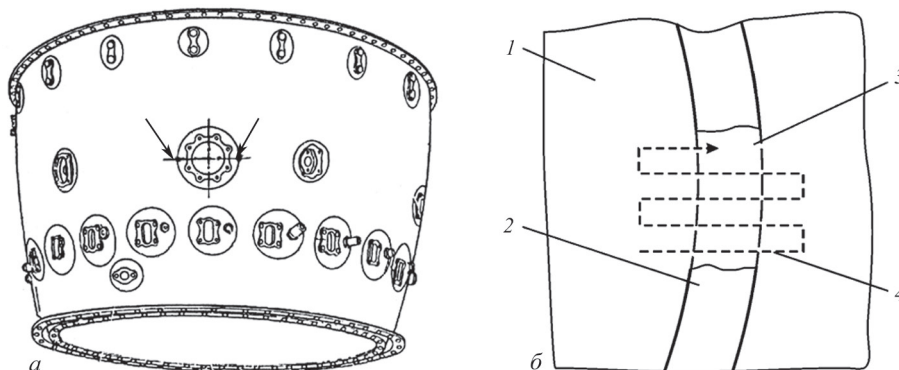


Рис. 11. Корпус камери згоряння (а) і схема контролю зварних швів (б): 1 – корпус камери; 2 – зварний шов; 3 – зона зачистки і контролю; 4 – схема сканування

Під час експлуатації та ремонту АД виникає необхідність виявляти втомні тріщини, що утворюються в зоні зварного з'єднання литої арматури (на рис. 11, а показано стрілками) з основним матеріалом корпусу камери згоряння. Зварювані деталі виконані зі сплавів типу ВЖ. Тріщини, як і в попередньому прикладі, практично не мали розкриття, так як після зупинки АД корпус камери охолоджується і стискається. Завдання ускладнюється також малою товщиною корпусу (близько 2 мм), великою шорсткістю поверхні, наявністю нагару і складною геометрією зони зварного з'єднання. Ці фактори повністю виключають можливість застосування капілярного і ультразвукового контролю. Дефектоскоп типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.03Н дозволив вирішити задачу. При цьому для виключення інших чинників, що заважають проводити якісний контроль, виконується механічна зачистка валика підсилення зварного шва (рис. 11, б).

Для контролю внутрішніх порожнин АД за допомогою спеціальних маніпуляторів використа-

но мініатюрний ВСП. Крім того, останніми роками виникла необхідність виявлення в лопатях АД експлуатаційних тріщин завдовжки більше 1 мм. Для вирішення цієї задачі розроблено локальний ВСП параметричного типу з обмотками на феритових осердях діаметром 0,75 мм [14].

Висновки і напрямки подальшого вдосконалення автогенераторних ВД. Представлено автогенераторні ВД сімейства ЛЕОТЕСТ з двоконтурною коливальною системою, що працюють у режимі переривчастої генерації, у яких є нові технічні рішення, зокрема: схема двоконтурного АГ на польовому транзисторі з ізолюваним затвором, схема керування робочою частотою АГ і СРКА. Дефектоскопи пройшли державні випробування і включені в регламент з технічного обслуговування літаків ДП «Антонов» та авіаційних двигунів ДП «Івченко-Прогрес» і ПАТ «Мотор-Січ». Подано загальні методичні рекомендації із застосування ВД для дефектоскопії АК, а також характерні методики контролю вуз-

лів літаків ДП «Антонов» та деталей АД в умовах їх експлуатації.

Досвід використання ВД типу ЛЕОТЕСТ для контролю АТ підтвердив ефективність технічних рішень, закладених в їх основу. У той же час з метою зменшення впливу суб'єктивних факторів, пов'язаних з кваліфікацією оператора, актуальним є інтелектуалізація ВД шляхом автоматичного налаштуванням ВД на заданий оператором (або методикою контролю) рівень чутливості. Це буде реалізовано за допомогою процесорного керування режимом роботи АГ дефектоскопа. Відсутність таких можливостей у представлених вище ВД зменшує достовірність і повторюваність результатів ВК, особливо за його проведення операторами різної кваліфікації. У результаті запропоновано і реалізовано в макеті концепцію побудови автогенераторного ВД з автоматичним налаштуванням на заданий рівень чутливості і додатковою індикацією чутливості. Проведені випробування макета вдосконаленого ВД підтвердили його ефективність.

Список літератури/References

1. https://www.bbc.com/russian/international/2011/04/110404_us_plane_fatigue
2. Campbell, G.S., Lahey, R. (1984) A survey of serious aircraft accidents involving fatigue fracture. *Intern. Journal of Fatigue*, **6**(1), 25–30.
3. https://ru.wikipedia.org/wiki/Авиакатастрофы_в_СССР. https://ru.wikipedia.org/wiki/Авиакатастрофы_в_СССР.
4. Hagemai, D.J. (1991) Nondestructive testing developments in the aircraft industry. *Materials Evaluation*, **49**(12), 1470–1478.
5. Hagemai, D.J. (1991) Application of crack detection to aircraft structures. In «*Fatigue crack measurement: techniques and applications*» (Eds K.J. Marsh, R.A. Smith and R.O. Ritchie). Warley (UK), EMAS, 419–455.
6. Ball, D.L. (2003) The Role of Nondestructive Testing in Aircraft Damage Tolerance. *Materials Evaluation*, **61**(7), 814–818.
7. Riegert, G., Pfeiderer, K., Gerhard, H., Solodov, I., Busse, G. (2006) Modern Methods of NDT for Inspection of

- Aerospace Structures. 9th Europ. Conf. on Non-destructive Testing, Berlin. <https://www.ndt.net>
8. Федосенко Ю.К., Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Останин Ю.Я. (2003) *Неразрушающий контроль. Справочник. Ключев В.В. (ред.). Т. 2 (Книга 2). Вихретоковый контроль*. 340–687. Fedosenko, Yu.K., Gerasimov, V.G., Pokrovsky, A.D., Ostanin, Yu.Ya. (2003) *Non-destructive testing: Refer. book. Ed. by V.V. Klyuev. Vol.2, Book 2. Eddy-current control*, 340–687 [in Russian].
 9. Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic flaw detection*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 10. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, **11**, 2525–2565. DOI:<https://doi.org/10.3390/s110302525>
 11. Глазков Ю.А., Беда П.И. (1997) Задачи эксплуатационной дефектоскопии, решаемые на этапе проектирования и изготовления объектов, *Дефектоскопия*, **4**, 3–11. Glazkov, Yu.A., Beda, P.I. (1997) Objectives of operational flaw detection, solved at the stage of design and fabrication of objects. *Defektoskopiya*, **4**, 3–11 [in Russian].
 12. Беда П.И., Сапунов В.М. (2000) Опыт вихретокового контроля крепежных отверстий в конструкциях авиационной техники. *Там же*, **4**, 3–9. Beda, P.I., Sapunov, V.M. (2000) Experience of eddy current control of clamping holes in aviation engineering. *Ibid.*, **4**, 3–9 [in Russian].
 13. Uchanin, V. (2021) Enhanced eddy current techniques for detection of surface-breaking cracks in aircraft structures. *Transactions on Aerospace research*, **1**(262), 1–14. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2021-0001>
 14. Uchanin, V.M. (2022) Optimization of the design of eddy current probe of parametric type to detect surface cracks. *The Paton Welding J.*, **3**, 54–64. DOI:<https://doi.org/10.37434/trwj2022.03.08>
 15. Учанін В.М. (2022) Аналіз роботи двоконтурного автогенераторного вихреструмового дефектоскопа в режимі переривчастої генерації. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 24–34. DOI:<https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.04>
 - Uchanin, V.M. (2022) Analysis of operation of a dual-circuit autogenerator eddy current flaw detector in intermittent generation mode. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **2**, 24–34. [in Ukrainian] DOI:<https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.04>

SELF-GENERATOR EDDY CURRENT FLAW DETECTORS FOR OPERATIONAL CONTROL OF AIRCRAFT STRUCTURES

V.M. Uchanin¹, S.A. Bychkov², O.I. Semenets², V.Ya. Derecha², S.A. Aleksandrov³

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

²SC «Antonov». 1 Acad. Tupolev str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: derecha@antonov.com

³SC «Ivchenko-Progress». 2 Ivanova str., 69068, Zaporizhzhia, Ukraine

Initiation and propagation of defects of fatigue and corrosion origin is one of the causes for violation of airworthiness and emergency damage of aircraft in service. Periodical nondestructive testing of critical components at all the stages of aircraft life cycle is an extremely important factor to ensure their safe service. The eddy current technique has a number of advantages, compared to other methods of aircraft structure testing, owing to high sensitivity to defects of different origin, productivity and ability to detect defects without direct contact with the surface of the tested object (TO) or even through different coatings without removing them. The method is used to detect service defects in aircraft structure elements, in particular such as fuselage, wings, wheel discs, blades and turbines of aircraft engines, brackets, etc. Eddy current flaw detection using high operational frequencies is applied for contactless detection of shallow surface cracks, in particular those, arising as a result of fatigue. The method has no alternative, when it is necessary to detect cracks in difficult-of-access places, in particular on side walls of rivet holes. The paper presents local self-generator eddy current flaw detectors of LEOTEST family with double-circuit oscillatory system, operating in the mode of intermittent generation. The flaw detectors have passed state trials and have been included into the maintenance regulations for aircraft of SC «Antonov» and aircraft engines of SP «Ivchenko-Progress» and PJSC «Motor-Sich». The paper gives general procedural recommendations and examples of application of flaw detectors for in-service testing of aircraft components and aircraft engine parts. Proposals were submitted as to further improvement of self-generator flaw detectors in order to lower the influence of subjective factors related to the qualifications of flaw detector operator on the reliability of control. Ref. 15, Fig. 11.

Keywords: eddy current flaw detector, self-generator, aircraft structure, engine, sensitivity, control reliability, aluminium alloy, titanium alloy

Надійшла до редакції 06.06.2022

TIGHTNESS TESTING OF AVIATION SYSTEMS (Review)

M.L. Kazakevych¹, V.M. Kazakevych¹, She Xiangyu²

¹State Enterprise «KOLORAN» L.V. Pisarzhevsky Institute of Physical Chemistry of NASU. 31, Nauky Ave., 03028, Kyiv, Ukraine. E-mail: m_kazakevich@ukr.net

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: 398118509@qq.com

The proposed publication includes a review of contemporary methods in the field of detection of leaks of test and working media, which are intended for the functioning of systems responsible for the trouble-free operation of aircraft. A new approach to preserving the viability of modern aviation structures allows for a progressive technological cycle of leak detection and protection of aircraft from damage. Currently there are elaborated number of methods for leak detection of aircraft. Each of this approach has own peculiarities and can detect defects with different sensitivity. In this paper we compare possibilities of leak testing technologies and describe their usage for control of aviation systems. Ref. 13, Tabl. 1, Fig. 5.

Keywords: methods of leak testing, defect, nondestructive testing

Introduction. Ensuring the requirements of tightness is a necessary condition for the functioning of assemblies and systems, responsible for safety of aviation flights. These include fuel tanks and pipes, hydraulic systems, the fuselage and other elements of the aircraft [1].

All major aircraft systems are monitored for leaks during production and operation. An example is the fuel system leak testing. The design of contemporary plane tanks has large volume. As a result the place of leakage («exit» of leak) may be located at a considerable distance from the «entrance» of a leak. Therefore to determine the topology and repair the defect specialists have to remove sealant and dismantle part of the structure [2].

The process of leak testing in fuel tanks-caissons make it possible to ensure the operability of aircraft and are highly sensitive. The requirements for them are due to the flammability of the fuel components, their high penetrating ability and the need to store large reserves of fuel for flight. And ensuring of their tightness is a complex technical task [3].

The kerosene-chalk method (KCM) is traditionally used to test the tightness of aviation fuel systems. It consists in determining the locations of leaks by spots of kerosene on a chalk coating. For example, the kerosene-chalk method is defined as the stage of testing in the Directive technology for monitoring the tightness of fuel tanks-caissons of the plane AN-124 («Ruslan»). The effectiveness of the application of this method is determined by the high penetrating ability of kerosene. The kerosene-chalk method is a variant of the penetrant testing (PT) [4], but unfortunately this material is flammable. Therefore, other materials are being developed, such as colored and luminescent penetrants to replace kerosene [5].

Then ultrasonic testing is used before carrying out the KC control to detect large leaks. The acoustic method is simple and reliable in operation, do not violate technological processes and it is safe for the health of the personal [6].

A few main leak detection techniques are known [7]. A description of the leak detection thresholds of different methods is presented in the Table.

Leak detection thresholds of different methods (mbarl/s)	10	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²
Bubble test (soap painting)	----	----	----	----	----	---->							
Bubble test (air, water)	----	----	----	---->									
Bubble test (He, alcohol)	----	----	----	----	---->								
He sniffer	----	----	----	----	----	----	----	----	---->				
Halogen sniffer	----	----	----	----	----	----	----	---->					
Pressure decay	----	----	----	---->									
Acoustical	----	----	----	----	---->								
Vacuum decay	----	----	----	----	---->								
Spark tester	----	----	----	---->									
Thermal conductivity	----	----	----	----	----	----	---->						
Radioisotope	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---->	
Halogen detector	----	----	----	----	----	----	----	---->					
Mass spectrometer	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---->
Dye penetrant	----	----	----	----	----	----	---->						

Kazakevych, M.L. <https://orcid.org/0000-0002-8182-6976>
© M.L. Kazakevych, V.M. Kazakevych, She Xiangyu, 2022

Overpressure methods can be performed by fluid or gas with which the tested element must be filled. As a fluid usually the water is used. Observing the outside surface the wetted areas show us great leaks and smaller. We observe small flows with a rate greater than 1 mbarl/s. Testing with gas, the vessel is subjected to overpressure of some bars (depending on material and wall thickness) and immersed into the water. At leaks the gas bubbles begin to escape. In this manner the leaks up to $1 \cdot 10^{-3}$ mbarl/s can be detected. If the vessel is too great for immersion, the suspected points should be painted by soap solution and again we can see the bubbles escaping, if there is a leak. This method is usable also for very large systems.

Halogen leak detectors are used in the detector-probe mode, requiring that the system be pressurized with a gas containing an organic halide, such as one of the freons. The exterior of the system is then scanned with a sniffer probe sensitive to traces of the halogen – bearing gas. The principle is based on the increased positive ions (K or Na) emission because of sudden halide composition presence. The ion current is the measure for a leak size. Halogen detectors can be used also in turned mode: evacuated vessel is connected to detecting instrument and is sprayed by freon.

Mass spectrometers as leak detectors are used as most sensitive instruments for stating leak existence and presence in vacuum systems. They are adjusted on the atom respectively molecular weight of tracer gas. It is usually helium because of its small mass and atom volume assures good supply of gas through a leak, relative great mass distance from neighbor mass enables greater sensitivity and its partial pressure in air is low. The next suitable gas for leak detection purposes would be H_2 , but it is dangerous and residual atmosphere in vacuum systems always contains this gas. There are also spectrometers adjustable to other gases e.g. argon.

Ensuring the tightness of the aircraft structure is inextricably linked with the control of the integrity of critical parts. To check the performance of aviation equipment, other methods of nondestructive testing are also used. As an example of the search for surface and subsurface defects or microdefects, one can cite a technology that can lead to damage to fasteners (bolts for fastening propeller blades). Destruction of these elements can lead to a decrease in engine lift, which is equivalent to loss of tightness of the aircraft. In rapidly rotating and vibrating highly loaded engine parts, destruction, loss of structural integrity and safety can occur. Therefore, flight stability mainly depends on regular checks of critical aircraft constructions. For this purpose, magnetic luminescent particle testing (MPI) is used (Fig. 1) [8].

Review of authors' researches on methods of leak control. As an implementation option in aircraft in-



Fig. 1. Schematic indication of cracks on a propeller mounting bolt
Рис. 1. Індикація (сліди) тріщин на болті кріплення повітряного гвинта.

dustry of the «PT» method the so-called «bubble» method is also wide used. In the places of through defects they form the foam in the emulsion, based on surfactants. It is available for use and therefore has been long time applied for the control of tightness. Foam indicators are widely used in aviation (Fig. 2).

The sensitivity of the bubbles control is comparable to the tightness test with kerosene in the absence of a fire hazard. The use of vacuum appliance makes it possible to test the unclosed objects too. Therefore, the standard aviation fuel system test consists of a leak testing, using a foam emulsion, followed by the kerosene testing. Reserves of air are practically unlimited and available. If the defect is new or well cleaned, it contains an air only. And the operation of filling leaks by penetrants is excluded from the technology cycle. As a result the air is one of the most widely used testing substances, which is completely harmless. These benefits are the reason of traditional usage an air for implementation of «bubble» method for leak detection. This method is the oldest and most widely used for technical object's control.

Another example (Fig. 3) of the penetrant control is luminescent testing (LT) [9], in which a solution of phosphors in liquids with high penetrating ability (for example, environmentally neutral ethanol) are used. LT control differs from another leak testing methods by super high sensitivity.

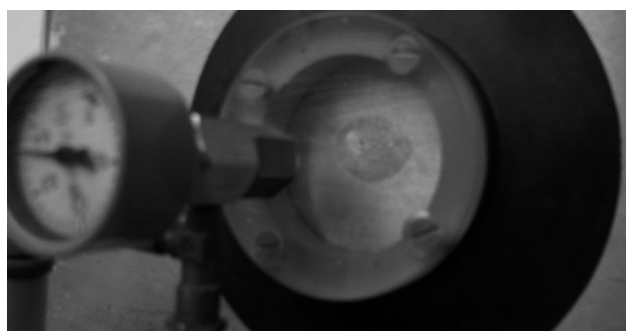


Fig. 2. Leakage detection by means air foam. In the center of vacuum appliance there is a place of defect (bubble)
Рис. 2. Виявлення витоку за допомогою повітряної піни. У центрі вакуумного приладу є місце дефекту (бульбашка)



Fig. 3. Luminescent penetrant testing of aircraft constructions with vacuum appliance

Рис. 3. Люмінесцентний капілярний контроль конструкцій літальних апаратів вакуумною установкою

Unique features of luminescent capillary control (Fig. 3) allow to detect defects with the opening width less, than a micron. It is one of an evolving nondestructive methods through the use of new test materials, which improve the characteristics of penetrant control and allow diagnosing damage to aircraft skin, searching for initial centers of corrosion under paint coatings.

Today, the capabilities of penetrant testing are not exhausted. The further development of penetrant testing may be possible by new approaches. For instance, when checking the tightness of fuel tanks-caissons, it is important to determine the topology of the leak, because the inlet and outlet of the leak may not coincide due to the leakage of the working medium under the sealed internal lining of the caisson. And only fluorescent flaw detection can identify fuel leaks and simplify the technology to local repair by replacing certain fastening connections of tank parts [3].

As one of these approaches can be pointed colored penetrant «IPC-KOLOR» [10, 11], synthesized from medical raw material. It prevent corrosion, is fully un-dangerous and can be solved in water and ethanol. Many years it is produced in Ukraine.

Among the options for testing the tightness of aviation fuel systems the chemical method should too be mentioned. During its implementation the controlled volume is filled with a test medium, for example, air under excess pressure. During testing the air or liquid inside of controlled objects are enriched with chemically active additives, for example, 1 % ammonia admixture. And the outer surface is examined by using chemical indicators, that react with additives and form brightly colored or luminescent products (Fig. 4). The development of the chemical control method is the catalymetric method of leak testing. It is based on the use of micro-additives of catalytic substances in the composition of the penetrant. This approach dramatically expands the possibilities of the chemical method, since the catalyst is not consumed during

the reaction. The number of elementary acts of the indicator reaction, initiated by the catalyst particle, is called the «circulation number».

Theoretically it plays the role of an amplification factor and determines the sensitivity limit of the method. The «kinetic methods» of chemical analysis are based on this principle. The use of kinetic methods makes it possible to increase the sensitivity of the analysis of substances by many times and to expand the list of penetrants. The reliability of the analysis also increases. Thus, at the locations of through defects, indicator «traces» are formed and visually determined.

Chemical control is among the most sensitive methods of nondestructive testing. It is connected with unique features of luminescent and color materials (LT, CT) and the properties of the eye, as universal tool for visual control.

These factors were contributed to the wide dissemination of the chemical luminescent and dye materials. The use of the chemical method opens up the possibility of directed synthesis and introduction of new materials including for testing such important parts as fuselage fasteners, turbine blades in engines, etc.

In contrast to the conventional luminescent method of leak control we proposed the use of chemical luminescent indicators that glow at the location of the defect as a result of the oxidation of the substrate with atmospheric oxygen without illuminating the structure. Liquid penetrants are widely used in industry for nondestructive testing. Currently, in order to increase efficiency (quantum yield) of luminescence we apply cascading composition of different phosphors. Despite the visible simplicity fluorescent flaw detection sensitivity has a record data that is not available by other NDT methods. It can detect surface defects, which have opening width, less than 1 μm .

As one of the most promising areas of the NDT penetrant method we studied the use of ultrasonic capillary effect (USCE) [9].



Fig. 4. Indication traces of leaks after chemical testing

Рис. 4. Сліди індикації витоків після хімічних досліджень

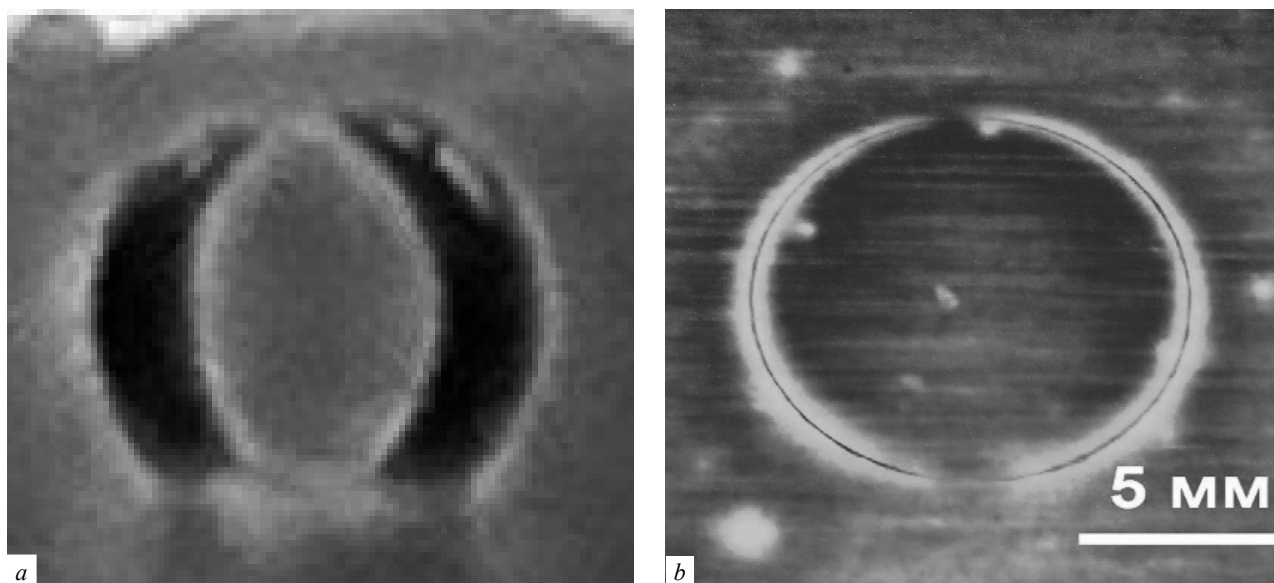


Fig. 5. Visualization of the defect: *a* – using a magnetic liquid; *b* – using a magnetic luminescent composition

Рис. 5. Візуалізація дефекту: *a* – за допомогою магнітної рідини, *b* – за допомогою магнітолюмінесцентної композиції.

USCE consists in an abnormal increase in the lifting height of the liquid in capillaries by the direct effects of ultrasound. Due to the energy of the ultrasound field (22 kHz), we received the rising of substances (colored penetrant «IPC-KOLOR» for instance) in capillaries by 10...20 times of magnitude according to capillary diameter. The dependence of USCE on the nature of the penetrant and other conditions of the experiment was investigated.

It was experimentally proved, that in this case the liquid is pushed up not only by capillary forces, but by standing ultrasonic waves. The main initiator of the physical and chemical processes occurring in the liquid under the influence of ultrasound is the formation of pulsing bubbles in the liquid, which after dramatically slam form the front of high pressure field. Due to the energy of the ultrasound field efficiency of penetration of liquid substances into the capillaries increases. This gives additional prospects for the development of capillary control.

Another promising integrated method for improving the tightness control is the way of using magnetic fluid in magnetic diagnostics of aircraft structures. It is shown that the use of magnetic-luminescent liquids in the magnetic method of nondestructive testing is characterized by high sensitivity. Magnetic fluids are sedimentation-stable colloidal solutions of magnetic particles with nano dimensions, the distinguishing feature of which is that the entire volume of the solution is drawn into the applied magnetic field [12, 13]. The combination of fluidity and a high value of magnetization allows the use of magnetization in various fields of modern technology. Due to the use of CoFe_2O_4 nanoparticles with sizes from 5 to 30 nm, the complex method makes it possible to detect smaller defects and reveal the fine structure of indicator «traces» in products made of ferromagnetic materi-

als. Varying the magnetization conditions and control technology makes it possible to obtain different configurations of the fine structure of the indicator «trace» of the same defect, which contains information about the behavior of the penetrant in the presence of a magnetic field.

The combined use of capillary and magnet luminescent methods makes it possible to control defects in nonmagnetic materials with using of the magnetic fluids and increases the sensitivity of the simple capillary method. It is known that the magnetic particle inspection method is used for nondestructive testing in aviation only for ferromagnetic parts. And the applicator of the proposed method expands the possibilities of testing nonmagnetic structures with high sensitivity. Invention of these technologies in aviation is developed.

Conclusions. The article contains an overview of existing methods in the field of detecting leaks of test and working environments, intended for the functioning of systems, responsible for the safe of aircraft. Traditional and new approaches to maintaining the operability of modern aircraft structures allow the implementation of technological cycles of detecting leaks and defects of individual responsible parts and systems. Currently, technologies for increasing the efficiency and sensitivity of leak detection methods are developed. The work confirms not only the possibility of using new and different test and working environments, but also complex leak detection methods. Algorithms for improving capillary, chemical, and magnetic powder control are proposed, which increase the effectiveness of these methods and allow identification of flow topology, detection of submicron-sized defects, expansion of the list of control objects, for example, diagnosis of damage to aircraft skin, search for initial corrosion under paint coatings, etc. The issue of

testing aircraft for tightness is relevant for use in aviation technology and requires further development of nondestructive testing technologies.

References

1. Zapunny, A.I., Feldman, L.S., Rogal, V.F. (1976) *Tightness control of constructions*. Kyiv, Technika. [in Russian].
2. Troitskiy, V.A., Karmanov, M.N., Troitskaya, N.V. (2014) Nondestructive quality control of composite materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 29–33 [in Russian].
3. Kazakevich, M.L., Semenets, A.I., Derecha, V.Ya., Kazakevich, V.M. (2015) Modern tasks of diagnostics of technical condition of aviation equipment by penetrant inspection. *Ibid*, **3**, 49–51 [in Russian].
4. Maslov, B.G. (1991) Penetrant flaw detection. Moscow, High School [in Russian].
5. Kisil, I.S., Kazakevich, M.L., Vitvitska, L.A. (2003) New generation of capillary testing materials. *Methods and Devises of Quality Control*, **10**, 36–40 [in Ukrainian].
6. Lyu Yanlin et al. (2021) An ultrasonic-based detection of air-leakage for the unclosed components of aircraft. *Aerospace*, **8**, 2, 55. DOI:https://doi.org/10.3390/aerospace8020055
7. Halmshaw, R. (2003) Nondestructive testing. In: *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Academic Press, Third Edition, 493–505. DOI:https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00482-8; https://www.sciencedirect.com/referencework/9780122274107/encyclopedia-of-physical-science-and-technology#book-info
8. Uludag Alper (2016) The Magnetic Particle Inspection Examination of Aircraft Propeller Mounting Bolts. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, **3**, 12, 6337–6341.
9. Kazakevych, M.L., Semenets, O.I., Derecha, V.Ya., Kazakevych, V.M. (2016) Development of tightness monitoring technologies of unclosed structures in aviation. *Proceedings of 19th The World Conference on Nondestructive Testing (WCNDT) 13–17 June, Munich, Germany*, https://www.wcndt2016.com/portals/wcndt/bb/Tu213.pdf.
10. Kazakevych, M.L., Semenets, O.I., Derecha, V.Ya. (2015) *Patent for the utility model «Indicator material for detecting defects in the surface layers of machine parts» № 100082, registered in the State Register of Patents on July 10, 2015*. https://uapatents.com/6-100082-indikatornij-material-dlya-viyavlennya-defektiv-v-poverkhnevikh-sharakh-detalejj-mashin.html [in Ukrainian].
11. Kazakevich, M.L. (2005) *Indicator penetrant for capillary flaw detection. № 74060*. MPK: G01N 21/91 [in Ukrainian].
12. Vasylenko, I.V., Kazakevych, M.L., Pavlishchuk, V.V. (2019) Design of Ferrofluids and Luminescent Ferrofluids Derived from CoFe₂O₄. Nanoparticles for Nondestructive Defect Monitoring. *Theoretical and Experimental Chemistry*, **54**, 6, 365–368. DOI:https://doi.org/10.1007/s11237-019-09582-w.
13. Vasylenko, I.V., Pavlishchuk, V.V., Kazakevych, M.L., Kolotilov, S.V. (2017) *Patent for the utility model «Magnetic liquid for magnetic powder flaw detection» № 116493, registered in the State Register of Patents on May 25, 2017*. DOI:https://iprop-ua.com/inv/4h96mh7u/ [in Ukrainian].

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТІ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ (Огляд)

М.Л. Казакевич¹, В.М. Казакевич¹, Ше Сянюй²

¹ДП «КОЛОРАН» Інституту фізичної хімії імені Л.В. Писаржевського НАН України. 03028, м. Київ, просп. Науки, 31.

E-mail: m_kazakevich@ukr.net

²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: 398118509@qq.com

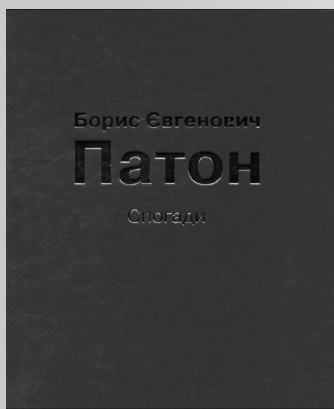
Пропонована публікація містить огляд сучасних методів у галузі виявлення витоків тестових і робочих середовищ, які призначені для функціонування систем, що відповідають за безаварійну роботу літальних апаратів. Новий підхід до збереження працездатності сучасних авіаційних конструкцій дозволяє реалізувати прогресивний технологічний цикл виявлення течі та захисту літальних апаратів від пошкоджень. У даний час розроблено ряд методів виявлення течі літаків. Кожен із цих підходів має свої особливості та може виявляти дефекти з різною чутливістю. У цій статті ми порівнюємо можливості технологій тестування на герметичність та описуємо їх використання для управління авіаційними системами. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: методи контролю на герметичність, дефект, неруйнівний контроль

Надійшла до редакції
05.07.2022

НОВА КНИГА

Борис Євгенович Патон. Спогади Київ: «Горобець», 2022. – 236 с., іл. ISBN 978-966-2377-69-9



Книга присвячена видатному ученому ХХ-ХХІ століття – академіку Борисі Євгеновичу Патону. Життя цього геніального ученого і чудової, непересічної людини вмістило великі наукові відкриття в галузі матеріалознавства, металургії, зварювання та споріднених технологій, їх блискучу реалізацію в інтересах економіки і оборони країни, новаторські звершення в галузі організації науки і освіти.

Основу книги складають рукописи академіка Б.Є. Патона: записки, листи, матеріали до книг про видатних учених – його колег і друзів. Другий розділ книги містить спогади співробітників Інституту електрозварювання, які мали велику честь працювати разом з цією видатною Людиною.

Книгу можна замовити в редакції журналу.

ПРОВЕДЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТРУБОПРОВІДІВ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ З МЕТОЮ ДОСЯГНЕННЯ ЗАДАНОЇ НАДІЙНОСТІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В.М. Тороп

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: v.torop@gmail.com

Проаналізовано фактори, що впливають на надійність експлуатації теплових мереж під час проведення періодичних гідравлічних випробувань (опресування) підвищеним тиском. Виконано аналіз пошкоджень трубопроводів теплових мереж м. Києва за 2002–2017 рр. та зазначено недоліки нормативних документів щодо процедури проведення періодичних гідравлічних випробувань підвищеним тиском. Розглянуто вплив дефектів та запропоновано підхід до призначення випробувального тиску опресування з метою досягнення заданої надійності експлуатації трубопроводів з дефектами. Бібліогр. 14, рис. 4.

Ключові слова: теплові мережі, трубопроводи, гідравлічні випробування, руйнування, корозія, дефекти, надійність

Грамотна технічна політика щодо забезпечення надійної експлуатації трубопровідної системи теплових мереж полягає в тому, щоб мінімізувати кошти, що виділяються на підтримку надійності технічної системи на заданому рівні. Очевидно, що кошти, витрачені на підтримку надійності, не повинні перевищувати витрати, пов'язані з ліквідацією наслідків руйнування (аварії, відмови, пошкодження).

Трубопровідна система теплових мереж, як і будь-яка технічна система, схильна до руйнування. Серед можливих порушень нормальних умов експлуатації велика увага приділяється порушенню цілісності труби, оскільки наслідки можуть призвести до суттєвих економічних витрат. Як показали проведені дослідження [1–4], причиною найпоширеніших випадків втрати цілісності є проростання по товщині стінки зовнішньої корозії.

Стосовно трубопровідних мереж можливі три основні стратегії підтримки їхньої надійної експлуатації, які в різних поєднаннях можуть реально застосовуватися на практиці:

1. Усунення руйнувань (аварій, відмов, пошкоджень) у міру їх виникнення. Незважаючи на принципову відсутність профілактики руйнувань, це є, можливо, найефективнішою в економічному плані стратегією для відносно нових ділянок теплових мереж, що характеризуються високою надійністю, руйнування яких не призводить до надмірних економічних наслідків. Даною стратегією, незважаючи на тривалий час експлуатації теплових мереж, користується переважна більшість комунальних підприємств України.

2. Проведення моніторингових діагностичних робіт з виявлення різних докритичних дефектів та

вжиття заходів щодо їх усунення. Ця стратегія відноситься до так званих превентивних стратегій. Вона є найпрогресивнішою, тим більше що методи моніторингу, діагностики, оцінки технічного стану та ремонту останнім часом досягли суттєвого прогресу. Однак без ретельного економічного аналізу та оптимізації обсягу, послідовності, періодичності, обґрунтування та проведення робіт вона може виявитися найзатратнішою. Крім того, специфіка прокладання трубопровідних мереж, їх розташування та конструктивні особливості виконання, використання різних матеріалів, діаметрів і товщин труб, наявність теплоізоляції, ділянок підтоплення, блукаючих струмів від довколишніх електрокабелів тощо часто ускладнює проведення діагностичних робіт, а отже й отримані дані не відповідають критеріям повноти та достовірності.

3. Проведення періодичних випробувань підвищеним тиском з метою одноразового виявлення та ремонту дефектів, які могли б у найближчому майбутньому призвести до руйнувань. Ця стратегія є найефективнішою для порівняно старих трубопроводів, де корозійні дефекти призводять до відносно частих порушень цілісності. Вона також використовується для демонстрації міцності та працездатності конструкцій, що навантажуються внутрішнім тиском, особливо при початковому пуску в експлуатацію або після тривалої перерви (простоя).

Як зазначалося вище, немає найоптимальнішої, єдиної на всі випадки життя стратегії управління надійністю теплових мереж. Вибір конкретної стратегії можливий лише на обмежений період і виходячи як з ретельного аналізу поточного технічного стану, так і з економічної доцільності.

Мета цієї статті полягає в обговоренні переваг та недоліків третьої стратегії та пошуку підходу для призначення випробувального тиску опресування.

сування з метою досягнення заданої надійності експлуатації трубопроводу з урахуванням економічної доцільності проведення гідростатичних випробувань (опресування) підвищеним тиском на міцність та герметичність (щільність).

Випробування підвищеним тиском мають два важливі значення: перше – підтвердження працездатності конструкції, друге – виявлення та ремонт дефектів, які можуть у період між випробуваннями призвести до аварій.

Проте існують певні обмеження для випробувань підвищеним тиском з метою підтвердження цілісності трубопроводу, які полягають у тому, що при прийнятому рівні тиску опресування може статися стільки руйнувань та що збитки від їх ремонту перевищуватимуть вигоду від безремонтної експлуатації протягом деякого визначеного періоду часу. З іншого боку, відсутність руйнувань ділянок трубопроводу в процесі випробувань свідчить про велику початкову (до випробувань) надійність трубопроводу. У цьому випадку випробування не призводять до поліпшення надійності, а можуть служити лише для демонстрації цілісності трубопроводу. Якщо при цьому існують ділянки, де швидкість розвитку початкових невеликих дефектів є суттєвою, проведення дорогих випробувань не є гарантією відсутності аварій (пошкоджень) у найближчому майбутньому.

Аналіз пошкодження трубопроводів теплових мереж м. Києва. За даними ПАТ «Київенерго» на 2016 р. експлуатувалося 2121,2 км магістральних (1237,5 км) та розподільчих (883,7 км) трубопроводів, виконаних у двотрубному виконанні (прямий та зворотний). При цьому термін експлуатації близько 70 % труб перевищував 30 років [1–3].

Поряд із широко використовуваними показниками надійності трубопроводів теплових мереж, таких як інтенсивність відмов (пошкоджень) та параметр потоку відмов [4], при зіставленні статистичних даних про пошкодження, виявлених

на різних теплових мережах у різний час, важливою кількісною характеристикою може стати коефіцієнт ефективності проведення гідравлічних випробувань, що визначається діленням числа пошкоджень, виявлених при проведенні гідравлічних випробувань, на число пошкоджень, виявлених при експлуатації за опалювальний сезон.

Для системи трубопроводів, які не мають пошкоджень (ідеальний варіант), цей коефіцієнт, як і самі гідравлічні випробування, не мають сенсу. Якщо пошкодження виявляються лише при гідравлічних випробуваннях, він дорівнює нескінченності. Природно, якщо пошкодження з тих чи інших причин неминуче, краще, щоб воно сталося під час проведення гідравлічних випробувань, оскільки наслідки для споживачів і трудовитрати на ремонтні роботи будуть мінімальними. Якщо пошкодження відбуваються як при гідравлічних випробуваннях, так і при експлуатації, цей коефіцієнт характеризує ефективність проведення гідравлічних випробувань. Тому для ефективної з точки зору проведення гідравлічних випробувань системи цей коефіцієнт повинен бути значно вищим за одиницю і прямувати до нескінченності.

З рис. 1 випливає, що коефіцієнт ефективності проведення гідравлічних випробувань, що дорівнює відношенню кількості пошкоджень при проведенні гідравлічних випробувань до кількості пошкоджень, виявлених при експлуатації, нижче за 1 і має тенденцію, принаймні до 2013 р., до зниження. Статистичний аналіз пошкоджень трубопроводів теплових мереж свідчить про суттєву зношеність трубопроводів та зниження ефективності періодичних гідравлічних випробувань.

Для підвищення ефективності експлуатації тепломереж ПАТ «Київтеплоенерго» за результатами проведених робіт [1–3] ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України пропонує виконати наступні роботи:

– розробити та впровадити експертну геоінформаційну систему «Міцність теплових мереж»

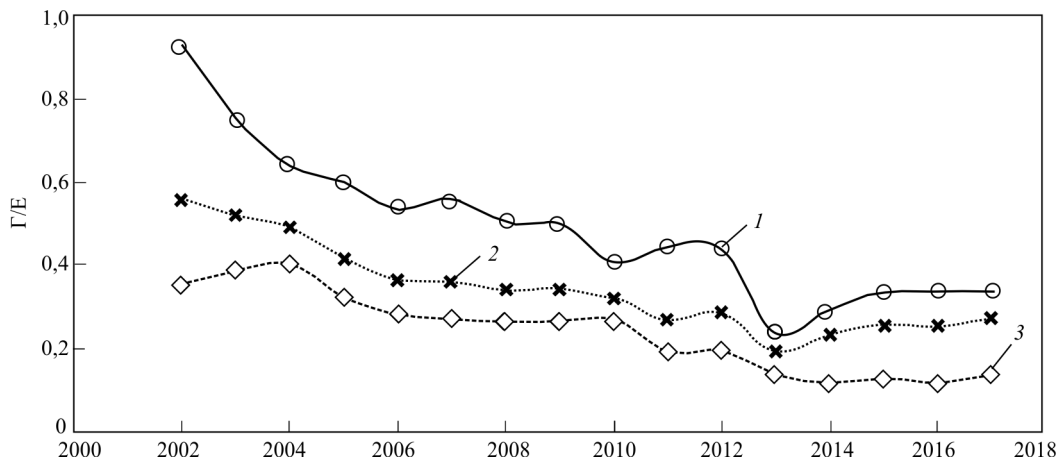


Рис. 1. Відношення кількості пошкоджень, виявлених при гідравлічних випробуваннях (Г) до кількості пошкоджень при експлуатації (Е) для магістральних (М) та розподільчих (Р) трубопроводів теплових мереж м. Києва за період від 2002 р. до 2017 р.: 1 – М; 2 – Р; 3 – М+Р

з метою фіксації та збору диференційованих даних щодо моніторингу пошкодження і старіння, оцінки технічного стану, прогнозу залишкового ресурсу, планування черговості та об'ємів проведення ремонтно-відновлювальних робіт для трубопроводів теплових мереж;

– розробити нову або переглянути існуючу нормативно-технічну документацію (НТД) [5–9], що регламентує існуючі процедури проведення гідравлічних випробувань і правила призначення випробувального тиску;

– оптимізувати розробку програм гідравлічних випробувань із використанням раціонального секціонування [10], з урахуванням даних про аварійність, реальні характеристики міцності та геометричні параметри і вартість ремонтно-відновлювальних робіт на основі впровадження сучасної геоінформаційної системи теплової мережі ПАТ «Київтеплоенерго»;

– оцінити вплив гідравлічних випробувань на властивості матеріалу трубопроводів теплових мереж;

– експериментально дослідити напружено-деформований стан під час експлуатації та гідравлічних випробувань для прийняття більш обґрунтованих рішень відносно призначення випробувального тиску опресування та верифікації результатів комп'ютерного моделювання.

У роботі [3] ми використали коефіцієнт ефективності проведення гідравлічних випробувань як відношення кількості пошкоджень, виявлених при гідравлічних випробуваннях (G), до загальної кількості виявлених пошкоджень при експлуатації та опресуванні ($E+G$), що дозволило зіставити статистичні дані проведення гідравлічних випробувань тепломереж у м. Рига та ін.

Таким чином, практична користь від проведення опресування залежить від початкового технічного стану (надійності), що характеризується зокрема кількістю та розмірами наявних дефектів, характеристиками металу, а також від швидкості перебігу пошкоджуючих процесів (для трубопроводів теплових мереж характеристики металу погіршуються порівняно повільно, більш актуальним є зростання кількості новоутворених дефектів і швидкості розвитку наявних корозійних дефектів у місцях локальних деформацій). Слід зазначити відсутність у літературі як кількісних, так і якісних підходів з метою оцінки технічних переваг під час проведення опресування залежно від перелічених параметрів. У цій статті вперше пропонується підхід, що заснований на розробленій ймовірнісній методології ризик-аналізу [11, 12] до оцінки цілісності трубопроводів теплових мереж.

Однак спочатку розглянемо кількісні детерміністичні підходи, що описують руйнування тру-

бопроводу з дефектом. Це важливо для розуміння того, які дефекти можуть залишитися після проведення опресування та яким є час їх розвитку до критичних розмірів за відомої швидкості їх підростання.

Вплив дефектів. Прийнемо, що дефекти мають глибину a , довжину l (в осьовому поздовжньому напрямку) та ширину b (в окружному напрямку). Теоретичний аналіз показує, що ослаблення нетто-перетину дефекту (місце концентрації напружень) при дії кільцевих напружень пропорційне глибині дефекту і залежить від його безрозмірної довжини $\lambda = \sqrt{l^2 / Rt}$, де R і t – зовнішній радіус і товщина стінки труби. При дії поздовжнього напруження ослаблення нетто-перетину залежить також від глибини та безрозмірної ширини дефекту $\eta = b/(2\pi R)$. Враховуючи, що при рівних l і b безрозмірна довжина набагато більша за безрозмірну ширину, а окружні напруження в трубопроводі зазвичай значно перевищують поздовжні, далі ми розглядаємо руйнування від впливу окружного напруження, що виникає під впливом внутрішнього тиску.

На ділянках локальних корозійних ушкоджень оцінка статичної міцності може бути здійснена з використанням рекомендацій [13]. На рис. 2 представлено результати розрахунку тиску руйнування трубопроводу 630×8 мм зі сталі 17Г1С за наявності корозійного пошкодження (дефекту). Кожна з кривих відповідає пошкодженню певної глибини, вказаної на графіку.

Як випливає з рис. 2, пошкодження з глибиною менше за 7,6 мм, незалежно від їхньої протяжності, не викликають руйнування зворотного трубопроводу при робочому тиску $P_p = 0,6$ МПа. Дефект на зворотному трубопроводі, параметри якого перевищать критичні значення 7,8×300 мм,

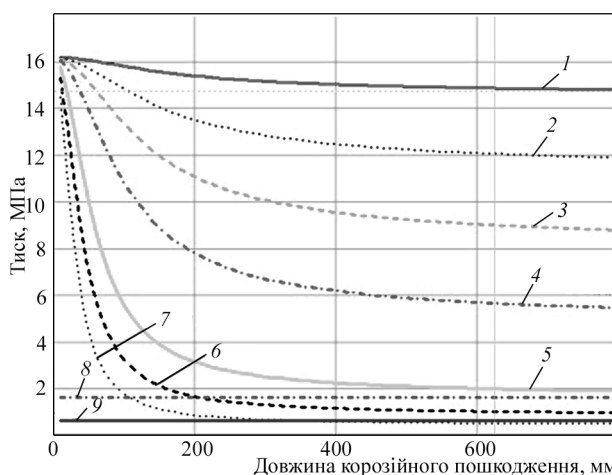


Рис. 2. Залежність руйнівного тиску від довжини та глибини корозійного пошкодження труби 630×8 мм зі сталі 17Г1С. Глибина пошкодження a : 1 – 0,8 мм; 2 – 2,4 мм; 3 – 4,0 мм; 4 – 5,6 мм; 5 – 7,2 мм; 6 – 7,6 мм; 7 – 7,8 мм; 8 – $P_p = 1,6$ МПа; 9 – $P_p = 0,6$ МПа

є неприпустимим, тобто спричинить руйнування. Для прямого трубопроводу з внутрішнім робочим тиском $P_p = 1,6$ МПа пошкодження з глибиною 7,2 мм не викликає руйнування незалежно від його протяжності. У цьому випадку найбільша довжина припустимого дефекту з глибиною 7,6 мм обмежена значенням 200 мм, а з глибиною 7,8 мм – довжиною 120 мм. Як бачимо, дефекти, розміри яких є припустимими для зворотного трубопроводу, є неприпустимими для прямого. При проведенні гідравлічних випробувань при $P_{гв} = 2,0$ МПа критичними значеннями довжини при глибинах пошкоджень 7,2, 7,6 та 7,8 мм будуть значення 600, 160 та 100 мм відповідно. Таким чином, проведення гідравлічних випробувань створює певний «запас міцності», причому вищий у разі зворотного трубопроводу.

Рис. 3 ілюструє граничні криві стосовно тріщиноподібних дефектів для різних фіксованих значень їх безрозмірних глибин для тестового трубопроводу (нормативні значення зовнішнього діаметра 355,6 мм і товщини стінки 7,92 мм зі сталі X46). При зменшенні довжини дефекту $2l$ або його глибини a до нуля граничний тиск наближається до значення руйнівного тиску для бездефектної труби. На цьому ж рисунку наведено граничну криву для наскрізного тріщиноподібного дефекту (свищ), що розділяє діаграму на дві області, в одній з яких реалізується ситуація течі перед руйнуванням, а інша відповідає катастрофічному руйнуванню. Це означає, що поверхневий дефект, що проріс наскрізь, може перейти в нестабільний стан (руйнування), якщо точка на діаграмі, що характеризує його довжину та прикладений тиск, лежить вище граничної кривої для наскрізного дефекту. І навпаки, його довжина не збільшиться та буде гарантовано виконання умови концепції «теча перед руйнуванням», якщо відповідна точка лежить нижче за згадану криву.

Імовірнісний аналіз впливу опресування. Нехай i -ділянка трубопроводу характеризується дея-

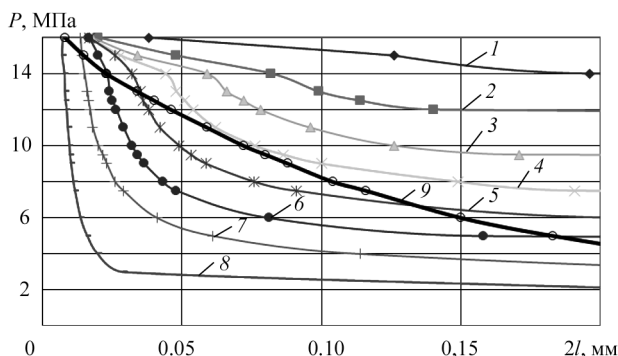


Рис. 3. Залежності граничного внутрішнього тиску від граничної довжини дефекту для тріщиноподібних поверхневих напівеліптичних дефектів (з різними безрозмірними глибинами) та наскрізного дефекту (свищ): 1 – $a/t = 0,2$; 2 – $0,3$; 3 – $0,4$; 4 – $0,5$; 5 – $0,6$; 6 – $0,7$; 7 – $0,8$; 8 – $0,9$; 9 – свищ

ким рівнем надійності n_i для максимально можливого внутрішнього тиску на цій ділянці. Як було показано в [14], надійність K_i майже однозначно залежить від кількості дефектів на цій ділянці (за умови, що вплив розкиду механічних властивостей металу та геометричних розмірів труби незначні) і від наявного статистичного розподілу розмірів дефектів. У цьому випадку ймовірність руйнування ділянки $f_i = (1 - n_i)$, а кількість очікуваних руйнувань N на всіх i -х ділянках трубопроводу є добутком f_i і K_i , тобто:

$$N = f_i \cdot K_i \quad (1)$$

З часом збільшується як кількість дефектів, так і їх розміри. Для відносно малого проміжку часу дефекти, що знову утворилися, через обмежену швидкість їх розвитку не будуть впливати на надійність трубопроводу. Тому, задаючи швидкість розвитку дефектів, у першому наближенні можна визначити зміну надійності в часі. Будемо вважати, що середня швидкість розвитку в глибину наявних дефектів дорівнює 0,17 мм за рік і що дисперсія швидкості дорівнює 0,1 мм за рік (це означає, що швидкість корозії 0,27 за рік є достатньо ймовірною), а швидкості та дисперсії швидкості розвитку корозійних дефектів за довжиною та шириною в 10 разів вищі. У цьому випадку можна визначити надійність як функцію часу та максимального тиску. На рис. 4, а наведено графіки залежності надійності для тестового трубопроводу (нормативні значення зовнішнього діаметра 355,6 мм та товщини стінки 7,92 мм зі сталі X46) з прогресуючим корозійним дефектом від часу експлуатації для різних рівнів максимального робочого тиску.

Проведення випробувань підвищеним тиском призводить до того, що частина дефектів може зруйнуватися. Вважаючи відремонтовані місця абсолютно надійними, тим самим збільшуємо подальшу розрахункову надійність трубопроводу. Прирівняємо величину надійності при підвищеному тиску в даний час (без урахування підростання дефектів) до величини надійності при максимальному робочому тиску (з урахуванням розвитку корозійних дефектів у часі). Таким чином можна визначити залежність проміжку часу, протягом якого буде реалізовано «покращувальний час» – у результаті опресування буде виявлено та усунуто ті дефекти, які можуть призвести до руйнування у вказаний час. Графіки на рис. 4, а та 4, б ілюструють суть запропонованого підходу. Так, виконання опресування на рівні тиску в 12 МПа, що відповідає надійності 0,9974, і подальший ремонт дефектів, що «виявили» себе, дозволяє забезпечити вихідну надійність, що дорівнює 1. З іншого боку, поступове погіршення стану конструкції за рахунок корозійного пошкодження

призведе до такої ж надійності 0,9974 тільки після закінчення експлуатаційного періоду в три роки при рівні максимального робочого тиску 6 МПа. Це означає, що дефекти, які мали б призвести до руйнування за ці три роки, будуть зруйновані в процесі опресування і таким чином протягом цього терміну буде досягнуто збільшення надійності трубопроводу.

Слід зазначити, що методологія ризик-аналізу заснована на ймовірнісних методах [11, 12], і тому проведення опресування не гарантує виключення локальних руйнувань протягом заданого терміну експлуатації. Так, для початкових дуже глибоких, але коротких дефектів проведення опресування може не призвести до виявлення дефекту, оскільки, як це впливає з рис. 2 і 3, залишкова міцність їх досить велика, у той час як при наявній швидкості росту поверхневих дефектів вони можуть стати наскрізними вже через невеликий час (порівняно з «покрашуючим часом») після проведення опресування. Однак тут позитивним моментом є те, що короткі дефекти призводять до відмов типу локальної течії, а не типу повномасштабного (гільйотинного) руйнування.

Наведений підхід, суть якого складають суміщені діаграми на рис. 4, а і 4, б, розраховані для тестового трубопроводу (нормативні значення зовнішнього діаметра 355,6 мм та товщини стінки 7,92 мм зі сталі Х46), дозволяє вирішувати дві задачі:

- перша, розглянута нами вище, полягає у визначенні терміну безаварійної експлуатації після проведення опресування, якщо відомо значення максимального робочого тиску трубопроводу. За прийнятим тиском опресування з графіка на рис. 4, б визначається надійність. За відомою надійністю та максимальним робочим тиском з графіка на рис. 4, а визначається термін безаварійної експлуатації, що забезпечується проведенням даного гідровипробування;

- друга полягає у визначенні рівня випробувального тиску опресування для гарантування не-

обхідного терміну безвідмовної роботи при заданому максимальному робочому тиску. Для цього на рис. 4, а вибирається необхідний термін безвідмовної експлуатації трубопроводу. Для вибраного терміну проводимо вертикальну лінію до перетину з кривою надійності заданого робочого тиску. Точка перетину вертикалі та кривої надійності визначає необхідну надійність. По ній з графіка на рис. 4, б легко визначити шуканий випробувальний тиск опресування.

Розроблений підхід може бути методологічною основою призначення випробувального тиску опресування. При цьому слід мати на увазі, що реальне підвищення надійності трубопроводу може досягатися тільки у випадках локальних руйнувань дефектних місць. Інакше випробування підвищеним тиском будуть лише дорогою демонстрацією цілісності трубопроводу. З іншого боку, запропонований підхід є ймовірнісним. Це означає, що руйнування в процесі випробувань можуть статися, якщо їхня ймовірність досить висока. При цьому ключовим параметром, що визначає доцільність проведення опресування, є очікуване число руйнувань у процесі випробувань, що визначається за формулою (1). Якщо це число дуже мале, то витрати на проведення опресування значно перевищуватимуть економічну вигоду від зменшення кількості руйнувань у процесі експлуатації. Математично вимога економічної доцільності проведення опресування записується як:

$$Z_{on} + \Pi \cdot N_1 < Z_{p1} \cdot N_1, \quad (2)$$

де Z_{on} – інтегральні витрати на проведення опресування, що включають не тільки прямі, але і непрямі витрати, пов'язані з простоем і втраченою від цього вигодою; N_1 – кількість руйнувань на 1-й ділянці трубопроводу; Π – вартість ремонту одного дефекту; Z_{p1} – прямі та опосередковані витрати, пов'язані з локальним руйнуванням та його ремонтом Π , що включають як моральні витрати (наприклад, негативні публікації в пресі, зменшення суспільної довіри споживачів до експлуату-

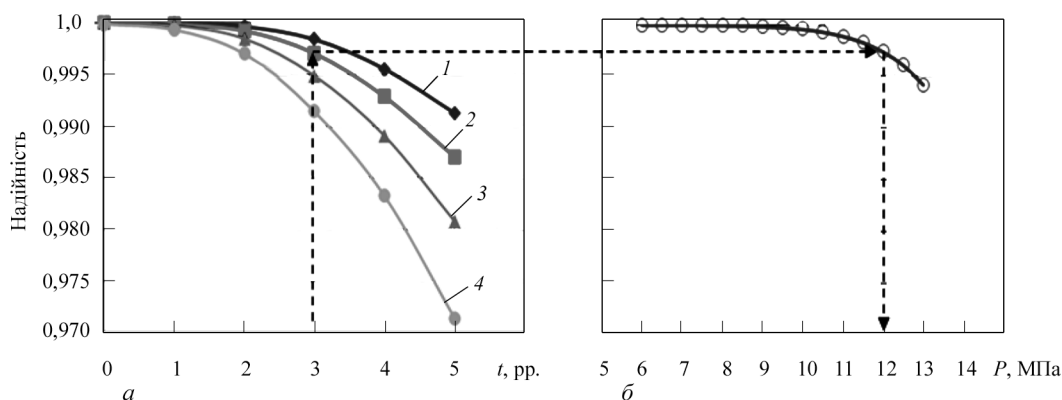


Рис. 4. Графіки зміни рівня надійності трубопроводу залежно від часу експлуатації за наявності корозійного дефекту (а) та зміни рівня надійності трубопроводу залежно від тиску опресування (б): 1 – $P = 5$; 2 – 6; 3 – 7; 4 – 8 МПа

ючої організації), так і витрати, пов'язані з відновленням екологічної ситуації. Розробка методології оцінки величин $Z_{\text{оп}}$, $Z_{\text{пл}}$ є необхідним завданням для розробки економічно ефективної методології проведення опресування. Як впливає з (2), така доцільність може мати місце, якщо число N_1 досить велике, що відповідно до (1) має місце, якщо ймовірність руйнування дефектної ділянки f_i і кількість наявних дефектів K_i досить великі.

Для вибору процедури опресування може виявитися корисним поняття питомих витрат ефективності, що дорівнює економії коштів від проведення гідравлічних випробувань, поділеної на кількість часу T , що «підвищує надійність» після проведення опресування:

$$E = \frac{(Z_{\text{пл}} - \Pi) \cdot N_1 - Z_{\text{оп}}}{T} \quad (3)$$

Очевидно, що формально збільшення тиску опресування призводить до збільшення N_1 , але при цьому збільшується час T , що «підвищує надійність». Зауважимо, що, як впливає з рис. 4, а і 4, б, N_1 збільшується набагато швидше, ніж T , тому формально з (3) випливає, що чим вищий тиск, тим ефективніше опресування. Насправді величина тиску обмежена «розумним» напруженням у металі трубопроводу, що не призводить до пошкодження металу, наприклад величиною, близькою до межі плинності. По-друге, максимальний час T також має обмеження, пов'язані з зародженням та розвитком нових дефектів, які не включені до вихідної статистики та врахування яких може в майбутньому істотно змінити прогнозовані параметри надійності.

Висновки

1. Виконано аналіз пошкоджень трубопроводів теплових мереж м. Києва за 2002–2017 рр. та наведено рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації тепломереж ПАТ «Київтеплоенерго».

2. Зазначено недоліки нормативних документів щодо процедури проведення періодичних гідравлічних випробувань підвищеним тиском та запропоновано підхід до призначення випробувального тиску опресування з метою досягнення заданої надійності експлуатації трубопроводів з дефектами.

3. Для обґрунтування економічної доцільності проведення гідравлічних випробувань запропоновано поняття питомих витрат ефективності, що дозволяє обґрунтувати прогнозовані параметри надійності експлуатації теплових мереж.

Список літератури

1. (2018) *Визначення впливу підвищеного тиску на властивості металу трубопроводів теплових мереж під час проведення гідравлічних випробувань з наданням рекомендацій щодо ве-*

личини рівнів пробного тиску у залежності від умов експлуатації. Технічний звіт. Київ, ІЕЗ ім. С.О. Патона НАНУ.

2. (2020) *Дослідження причин руйнування ділянки магістрального теплопроводу діаметром 1020 мм з місця аварії по вул. Антоновича, 176*. Технічний звіт. Київ, ІЕЗ ім. С.О. Патона НАНУ.
3. Дмитриенко Р.І., Юхимец П.С., Тороп В.М. и др. (2020) Повреждаемость и эффективность проведения гидравлических испытаний тепловых сетей города Киева. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 37–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.04>.
4. Чичерин С.В. (2022) *Совершенствование системы централизованного теплоснабжения при реконструкции и эксплуатации тепловых сетей*. Автореф. дис. канд. тех. наук. Омский государственный университет путей сообщения.
5. (2017) Інструкція №29 «Проведення випробувань тепломереж на гідравлічну щільність». Київ, ПАТ «Київенерго», СВП «Київські теплові мережі».
6. (2017) Програма випробувань водяних тепломереж РТМ «Печерськ» СВП «КТМ» на гідравлічну щільність ТМ-1, 2, 8 від ТЕЦ-5 в 2017 р.
7. (2007) *Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж*. Затв. 14.02.2007, № 71. Міністерство палива та енергетики України. Харків, Індустрія.
8. (2003) ГКД 34.20.507-2003 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила». Затв. 13.06.2003, № 296. Київ, Міністерство палива та енергетики України.
9. (1997) ГКД 34.20.504-94 «Теплові мережі. Інструкція експлуатації». Київ, НДІ Енергетики.
10. Муртазин И.И., Тимченко С.В. (2013) Опрессовки с колес. *Новости теплоснабжения*, 10(158). http://www.nts.ru/10_2013.html
11. Тороп В.М. (2005) Імовірнісний ризик-аналіз експлуатації трубопроводних систем, резервуарів та посудин тиску. Повідомлення 1. Алгоритм побудови імовірнісної моделі. *Проблеми міцності*, 2, 85–91.
12. Тороп В.М. (2005) Імовірнісний ризик-аналіз експлуатації трубопроводних систем, резервуарів та посудин тиску. Повідомлення 2. Метод оцінки функціональної придатності елементів конструкції за обмеженими статистичними даними. *Там само*, 3, 96–103.
13. (2004) Recommended practice for corroded pipelines DNV-RP-F101.
14. Kiefner, J.F. (2001) *Role of hydrostatic testing in pipeline integrity assessment*. Northeast Pipeline Integrity Workshop, Albany, New York, June 12.

References

1. (2018) *Determination of high pressure influence on metal properties in heating system pipelines during hydraulic tests with provision of recommendations concerning the value of test pressure levels depending on service conditions*. In: Technical report. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
2. (2020) *Investigation of causes of fracture in a section of main hot water system of 1020 mm diameter from the accident site at 176 Antonovych Str.*
3. Dmytrenko, R.I., Yukhymets, P.S., Torop, V.M. et al. (2020) Damageability and effectiveness of conducting hydraulic testing of heating systems of Kyiv city. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 1, 37–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.04> [in Ukrainian].
4. Chicherin, S.V. (2022) Improvement of centralized heating system at reconstruction and operation of heating networks. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*, OSTU [in Russian].
5. (2017) *Instruction No. 29: Testing of heating systems for hydraulic density*. Kyiv, PAT Kyivenergo, SVP Kyiv heating networks [in Ukrainian].
6. (2017) *Program of hydraulic density testing of water supply systems TM-1, 2, 8 of RTM Pechersk of SVP KTM from HPP-5 in 2017*.
7. (2007) *Rules of technical operation of heat plants and networks*. Appr. 14.02.2007, № 71. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Kharkiv, Industriya [in Ukrainian].

8. (2003) *GKD 34.20.507-2003: Technical operation of electric power plants and heating systems. Rules*. Approv. 13.06.2003, № 296. Kyiv, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine [in Ukrainian].
9. (1997) *GKD 34.20.504-94: Heating systems. Operating instructions*. Kyiv, Research Institute of Energy [in Ukrainian].
10. Murtazin, I.I., Timchenko, S.V. (2013) Pressure tests using vehicles. *Novosti Teplosnabzheniya*, **10**(158) [in Russian]. http://www.nts.ru/10_2013.html
11. Torop, V.M. (2005) Probabilistic risk-analysis of operation of pipeline systems, tanks and pressure vessels. Information 1: Algorithm for construction of the probabilistic model. *Problemy Mitsnosti*, **2**, 85–91 [in Ukrainian].
12. Torop, V.M. (2005) Probabilistic risk-analysis of operation of pipeline systems, tanks and pressure vessels. Information 2: Method of evaluation of fitness-for-purpose of structural elements using limited data. *Ibid.*, **3**, 96–103 [in Ukrainian].
13. (2004) *Recommended practice for corroded pipelines DNV-RP-F101*.
14. Kiefner, J.F. (2001) *Role of hydrostatic testing in pipeline integrity assessment*. Northeast Pipeline Integrity Workshop, Albany, New York, June 12.

PERFORMANCE OF HYDRAULIC TESTING OF PIPING OF HEAT NETWORKS TO ACHIEVE THE SPECIFIED RELIABILITY OF THEIR OPERATION

V.M. Torop

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: v.torop@gmail.com

Factors affecting the operational reliability of heat networks during periodical hydraulic testing (pressure testing) by higher pressure. Analysis of damage of Kiev heat network piping during 2002 – 2017 has been performed and deficiencies of normative documents have been noted as regards the procedure of performance of periodical hydraulic testing by higher pressure. Influence of defects has been considered and an approach has been proposed for determination of testing pressure, in order to achieve the specified reliability of operation of pipelines with defects. Ref. 14, Fig. 4.

Keywords: heat networks, piping, hydraulic testing, fracture, corrosion, defects, reliability

Надійшла до редакції 12.07.2022

КОНФЕРЕНЦІЇ, ВИСТАВКИ, СЕМІНАРИ

Назва заходу	Дата	Організатор, місце проведення
Image-Based Simulation for Industry (IBSim-4i 2022)	17.10.–20.10.2022	Swansea University, London, United Kingdom
International Conference on NDE 4.0	24.10.–27.10.2022	DGZfP, Berlin, Germany
Singapore International NDT Conference & Exhibition NDT for Sustainability New Energy, NDT for Additive Manufacturing, NDE 4.0, Qualification & Certification, NDT for LNG, Fuel Distribution, NDT for Marine & Offshore, NDT for Construction & Civil Engineering, NDT for Aerospace	07.11.–08.11.2022	NDTSS, Singapore
52 nd NDE for Safety 2022 / Defektoskopie 2022	08.11.–10.11.2022	Czech Society for NDT, Přerov, Czech Republic
Міжнародна науково-технічна конференція «Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій»	10.11.–11.11.2022	Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна
XVI Міжнародна конференція «Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів» (Корозія-2022)	15.11.–16.11.2022	ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
XXI Міжнародний промисловий форум	15.11.–18.11.2022	ТОВ «Міжнародний виставковий центр» Київ, Україна
Конференція «Зварювання та неруйнівний контроль для відновлення національної економіки»	17.11.2022	Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна
4 th International Seminar «New trends in the construction, research and operation of flying objects»	17.11.–18.11.2022	Lukasiewicz Institute of Aviation, Warszawa, Poland
APCNDT 16 th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing	28.02.–03.03.2023	AINDT, Melbourne, Australia
InCeight Casting C8	06.03.–08.03.2023	Fraunhofer LBF, Darmstadt, Germany
8 th Middle East NDT Conference & Exhibition	12.03.–15.03.2023	Saudi Arabian Section of ASNT, Bahrain Society of Engineers, Manama, Bahrain
The 8 th International Workshop on Reliability of NDT/NDE (8 th IWRndt)	12.03.–16.03.2023	ICNDT/SPIE, Long Beach, CA, USA
7. Fachseminar Sichtprüfung – aktuelle Trends und Entwicklungen	14.03.–15.03.2023	DGZfP, Leipzig, Germany
ECNDT 2023 European Conference on Non-Destructive Testing	03.07.–07.07.2023	FSEND-RELACRE, Lisbon, Portugal
20 th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2020)	27.05.–31.05.2024	KSNT, Incheon, Korea

ULTRASONIC TESTING IN NUCLEAR PLANTS УЛЬТРАЗВУКОВИЙ КОНТРОЛЬ НА АТОМНИХ СТАНЦІЯХ

by Anmol Birring and James Williams

The approach for nondestructive testing inspections in nuclear power plants differs significantly from nonnuclear industries. In most industries, inspections are planned and specified by owners or insurance companies. Nuclear plant inspections are, however, regulated and must follow certain processes, regulatory requirements, and required codes. Codes classify components and specify inspection methods, coverage, and inspection intervals. With regard to ultrasonic testing (UT), there is a broad range of applications for nuclear plant components. Applications vary from simple corrosion/erosion scanning to more complex techniques that require UT of difficult-to-inspect materials. These include dissimilar metal welds of materials such as stainless steel, nickel alloy, and cast stainless steels. In addition, UT inspection can include tests of complex geometries such as nozzles and turbines. Furthermore, due to the nature of the nuclear plant operation, the inspection processes must be demonstrated to validate reliability and qualify equipment and personnel. Finally, this article highlights the importance of using notches as calibration reflectors when using refracted longitudinal waves and large aperture phased array probes to improve resolution.

Підхід до неруйнівного контролю на атомних електростанціях суттєво відрізняється від неатомних галузей. У більшості галузей промисловості обстеження плануються та призначаються власниками або страховими компаніями. Проте обстеження (контроль) на атомних станціях регулюються нормативними вимогами, положеннями обов'язкових стандартів та мають відповідати встановленим процедурам. Стандарти встановлюють класифікацію елементів, види, обсяги та періодичність контролю. Що стосується ультразвукового контролю (УЗ), існує широкий спектр застосувань для елементів атомних станцій. Застосування варіюються від простого виявлення корозії/ерозії до складніших методів, які потребують УЗ матеріалів, що важко піддаються контролю. До них належать композитні зварні шви з таких матеріалів, як нержавіюча сталь, нікелевий сплав і літа нержавіюча сталь. Крім того, УЗ контроль може застосовуватись до елементів зі складною геометрією, таких як сопла та турбіни. Крім того, через особливості експлуатації атомної станції необхідно продемонструвати процедури перевірки для підтвердження надійності та кваліфікації обладнання та персоналу. Нарешті, у цій статті підкреслюється важливість використання вирізів як калібрувальних відбивачів при використанні заломлених поздовжніх хвиль і фазованих решіток з великою апертурою для покращення роздільної здатності.

Introduction

As of March 2022, there were 56 nuclear plants in the US with 93 operating reactors. Of these, 62 are pressurized water reactors (PWRs) and 31 are boiling water reactors (BWRs) (NRC 2022). Safe operation of nuclear plants requires application of reliable nondestructive testing (NDT) inspections. Operation, inspection, and maintenance of nuclear plants is regulated by the US Nuclear Regulatory Commission (NRC) and therefore inspections must meet NRC requirements.

Application of NDT has reduced forced outages and extended plant lives. In addition, improved technologies have reduced planned outage periods, thereby increasing the availability factor. The intent of this article is a general introduction of the UT techniques applied in nuclear plants.

Components of Nuclear Power Plants

There are two basic types of nuclear power plants in the US: PWR and BWR. The major difference between them is the means of steam generation. In a PWR, steam is generated in a two-step process. In the first step, heat produced by fission of the nuclear fuel is transferred to reactor coolant (pressurized water) in the reactor pressure vessel and circulated to the steam generators to produce steam. The steam generator is a large heat exchanger that transfers heat from the reactor cool-

ant to the water in the secondary circuit. The main difference between the PWR and BWR is that there is no separate steam generator and the steam from the boiling water reactor goes straight to the turbines.

Major components of the PWR are described in the Reactor Concepts Manual available on the US-NRC website (NRC 2020). They include the reactor vessel, primary piping, reactor coolant pump, pressurizer, steam generator, secondary piping, turbines, and generators. In the US, the three basic designs of the PWR are the Westinghouse, Combustion Engineering, and the Babcock and Wilcox. A typical PWR

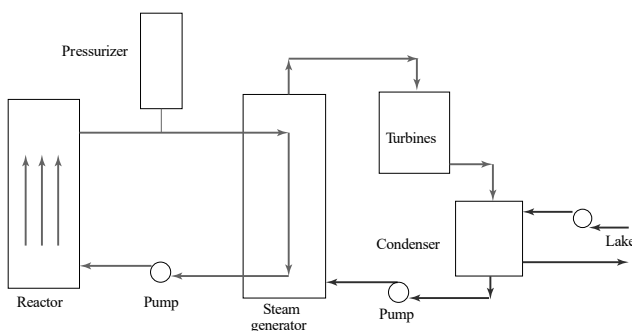


Figure 1. Pressurized water reactor circuit. Primary circuit is between the reactor and steam generator. Secondary circuit includes the steam generator, turbines, and condenser.

Рис. 1. Схема реактора з водою під тиском. Головний циркуляційний контур між реактором і парогенератором. Другий контур включає парогенератор, турбіни і конденсатор

circuit is shown in Figure 1. A BWR plant does not include a steam generator and secondary piping.

Components in a nuclear plant are classified as per the International Atomic Energy Agency (IAEA) safety classification (STUK 2000). They are Class 1, Class 2, and Class 3, with Class 1 being the most critical. Inspection requirements depend on the component class. Inspection frequency and NDT methods for each class are given in ASME XI as subsections IWB, IWC, and IWD, respectively (ASME 2019b).

Reactor

A reactor is a large heavy-wall vessel that contains the reactor core with nuclear fuel. The nuclear fuel by the process of controlled fission produces heat, which is transferred to the coolant. This cylindrical vessel has a hemispherical bottom and a removable top head. The top head is removed for refueling and makes access available for inspections, including NDT. The reactor vessel is constructed from manganese molybdenum steel, and all surfaces that come in contact with the coolant are clad with stainless steel. The typical PWR temperature range for outlet and inlet leg is 326 °C (619 °F) to 292 °C (558 °F), respectively, and at a pressure of 15.6 MPa (2263 psi).

A BWR operates at a steam temperature of about 287.8 °C (550 °F) and a pressure of 8.62 MPa (1250 psi).

A reactor is a Class 1 component. UT is applied extensively to the reactor pressure vessel shell welds and the nozzle welds connecting the reactor vessel to the primary piping.

Primary Piping

Primary piping in the PWR carries the coolant from the reactor to the steam generator and back to the reactor via the reactor coolant pump. In the case of BWR, the primary piping carries the steam directly from the reactor to the turbines. Primary piping materials are mostly cast stainless steel and wrought stainless steel. For PWRs, primary piping legs between the reactor are short and can be single-spool spun-cast stainless steel pipes. Primary piping is a Class 1 component.

BWR Recirculation and Residual Heat Removal Piping

BWR piping is mostly 304 and 316 stainless steel.

Steam Generator – PWR

A steam generator in a PWR plant is a heat exchanger that transfers heat from the reactor coolant and converts water to steam for the turbines. The primary piping nozzles and tubing of steam generators are Class 1 components.

Secondary Piping – PWR

Secondary piping in a PWR carries the steam from the steam generator to the turbines. Secondary piping material is normally carbon steel. Secondary piping is mostly Class 2.

Emergency Core Cooling Water Piping

Emergency cooling water piping circulates cooling water for emergency systems. This piping can be carbon steel or aluminum bronze. This piping is a Class 3 component. Some plants have experienced leaching in aluminum bronze piping.

Turbines

Turbines convert the energy in the steam to a rotary motion for power generation. Damage mechanisms can include stress corrosion cracking, corrosion fatigue, and stress fatigue. UT is performed on the steam turbine rotors and blade attachment areas. Common materials for turbines are steels with various amounts of nickel, chromium, molybdenum, and vanadium.

Condensers

Before the steam is sent back to the steam generator, it must be condensed. This operation is performed in a condenser, which is basically a large heat exchanger. Water from a lake, sea, river, or canal passes through the condenser tubes. Steam passes around the tubes and is condensed. Various tube materials are used in condenser tubes: these include copper nickel alloys, brass, and titanium. Tube inspection is done by eddy current testing. Almost no UT is performed in the condensers.

Regulations and Codes

Operation of nuclear plants is regulated by the NRC. The NRC publishes the code of federal regulations. Some of the most important regulations pertaining to nuclear plants are in 10 CFR, Part 50 (NRC 2006a). Furthermore, 10 CFR, § 50.55 is another publication that provides codes and standards applicable to nuclear plants (NRC 2006b). The code applicable to NDT is Section XI of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC). This code provides the information on in-service inspections for various classes of components. Required inspection and inspection intervals for the Class 1 components can be found in section IWB-2000 of ASME, Section XI. The inspections listed in ASME, Section XI are categorized as visual, surface, or volumetric. UT is a volumetric examination. The inspection interval depends on the type of component.

Specific nondestructive examination methods are described in ASME BPVC, Section V (ASME 2019a). Specific NDT procedures to meet the ASME codes are written by the inspecting organizations.

Application of Phased Array Technology in the NDT Industry

A major upgrade in UT beginning in 2005 has been the introduction of portable phased array ultrasonic testing (PAUT) systems. Previously, all weld inspections were done using single or multiple single-element probes. Phased array systems that existed (if any) were quite bulky and not commonly used.

Mechanized scanning with a single-element probe was done by raster scans and the data reconstructed into B- and C-scans. Single-element probes would include refracted angles such as 45°, 60°, and 70°. Instead of three separate probe angles, phased arrays use a single probe that sweeps the beam over a range of angles and displays the image as a sectorial scan. In addition, phased array data is taken in a line scan instead of a raster scan, thus simplifying the scanning process. The phased array sectorial presentation provides a cross-sectional view that is much easier to evaluate and interpret as compared to reconstructed B- and C-scans from conventional single-element probes. Phased array technology is now routinely used for inspection of reactor vessel welds, steam line welds, steam turbines, and other components such as bolts.

In-Service Inspections

This section covers the in-service inspection of the various components of nuclear systems.

Pressurized Water Reactors

UT is performed on nuclear plant components for volumetric inspections. A PWR shell is generally 100 to 150 mm thick carbon steel with stainless steel clad. Phased array ultrasonic inspection is done from inside the PWR. The carbon steel shell welds are inspected using shear waves. Required inspection intervals can be found in section IWB-2000 of ASME BPVC, Section XI.

All shell, head, shell-to-flange, head-to-flange, and repair welds are subjected to a 100% volumetric examination during the first interval. Ensuing test inter-

vals require fewer beltline region, head, and repair weld tests. All nozzle-to-safe and butt welds with dissimilar metals (such as ferritic steel nozzle to stainless steel or to heat-resistant nickel chromium alloy) are subjected to volumetric and surface tests at each interval. Inspection volume coverage of each weld is given in Section XI. For similar and dissimilar metal welds, NPS 4 (DN100) or larger nozzles, and piping, the examination volume is limited to one-third of thickness from the inner diameter (ID) surface. A typical nozzle-to-safe end dissimilar metal carbon steel alloy 182 stainless steel weld configuration is shown in Figure 2. Alloy 182 is a nickel alloy weld material. This material is anisotropic, and shear waves are ineffective for such welds. Dissimilar metal nickel alloy welds are inspected by refracted longitudinal wave (L-wave) mode. Inspection is done from the inside surface or the outside surface depending on access (Figure 3). Refracted L-wave can penetrate such materials, but the inspection is limited to one-half the vee path of the beam due to mode conversion upon reflection. Another important aspect of PAUT is probe frequency and active aperture, which define resolution and play an important role in inspection quality. A good inspection requires high-resolution images with good flaw definition. Higher frequencies and a large active aperture reduce beam spread, focus the beam, improve resolution, and result in high-definition images (Birring 2021).

One of the issues related to PWR is primary water stress corrosion cracking (PWSCC). This is discussed in detail in NUREG/CR-7187 (NRC 2014). Alloy 82/182/600 exposed to reactor coolant water (or steam) is susceptible to PWSCC. Cracking initiates from the inside surface of such welds. Inspection of such internal cracks initiating from the inner surface is typically done from the outside surface using phased arrays. However, due to limitations in some configurations, the inspection is done from the ID surface.

All studs and threaded stud holes in the closure head studs undergo surface and volumetric tests at specified inspection intervals. Any integrally welded attachments are required to have surface (or volumetric) tests of welds at specified test intervals. UT of the pressurized water reactor is performed after removing the head and internals and using a remotely operated vehicle (ROV) or by placing a tripod-type device with extended arms on top of the reactor. The reactor is filled with water during the examination. The front end of these systems includes the cameras, phased array probe, and other sensors. This system is used for inspection of vessel seam welds, flange-to-shell welds, nozzle-to-shell welds, nozzle-to-piping welds, meridional (lower head) welds, shell-to-lower head welds, and nozzle inner radius. ROV systems are neutrally buoyant and are controlled remotely. One such system

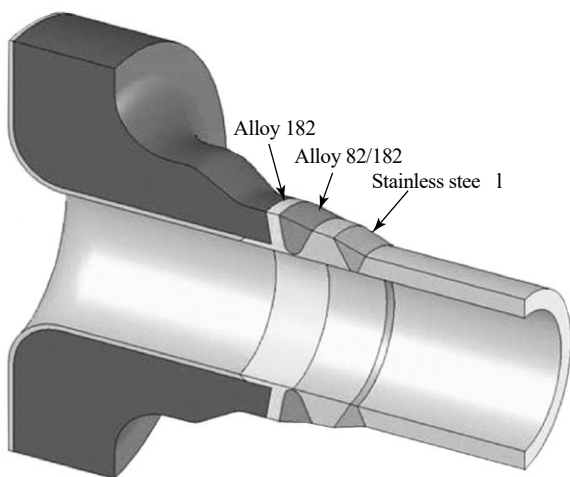


Figure 2. Nozzle-to-safe end dissimilar metal weld. Buttering (shown in yellow) is nickel alloy 182. Weld material (shown in red) is nickel alloy 82/182 weld electrode. Inspection of these welds is done from the inside of the nozzle using phased arrays in the refracted L-wave mode.

Рис. 2. Композитний зварний шов від насадки до безпечного кінця. Стик — це нікелевий сплав 182. Зварювальний матеріал — зварювальний електрод із нікелевого сплаву 82/182. Контроль цих зварних швів виконується з внутрішньої сторони патрубків за допомогою фазованих решіток у режимі заломленої L-хвилі

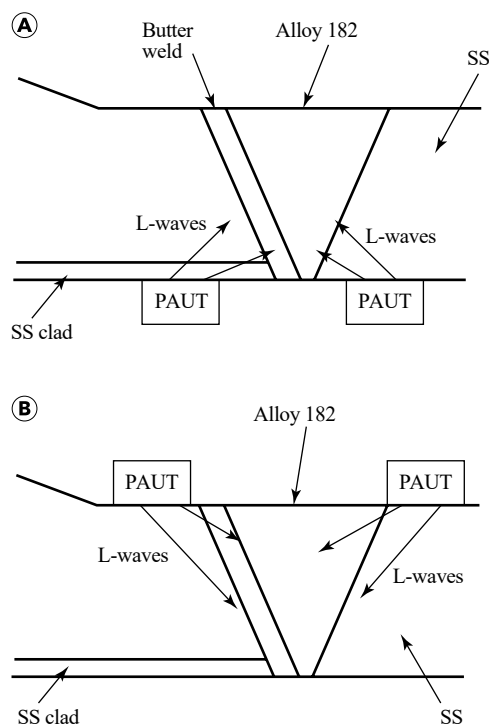


Figure 3. PAUT of dissimilar metal welds using refracted longitudinal waves: (a) from ID surface; (b) from OD surface.

Рис. 3. УЗФР (ультразвуковий контроль за допомогою фазованих решіток) зварних швів із різних металів з використанням заломлених поздовжніх хвиль: (а) зсередини; (б) ззовні

is shown Figure 4. Prior to inspections, the systems are qualified on actual mock-ups of pressurized water reactors to ensure detection of the discontinuities.

Boiling Water Reactors

BWR vessels consist of a cylindrical shell and a hemispherical bottom head containing both the control rod penetrations and the in-core instrumentation penetrations. The top head is hemispherical and includes nozzles with bolting flanges attached. BWRs by design have limited access for internal in-service inspection.

A main issue with BWRs (and especially the older reactors) is the limited access for internal in-service inspection. Typically, a large percentage of the vessel's weld lengths were exempted as inaccessible.

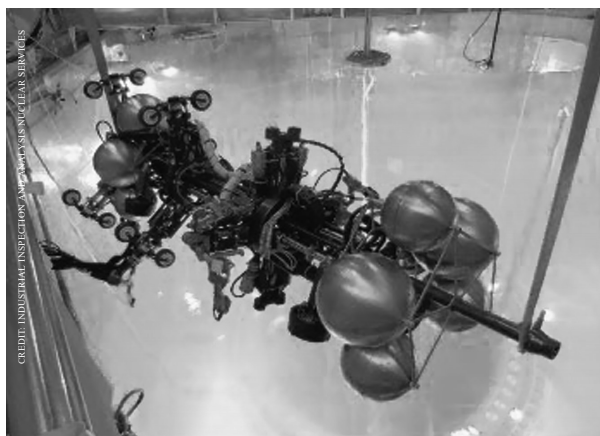


Figure 4. Nuclear reactor nozzle scanner.

Рис. 4. Сканер патрубків ядерного реактора

The main difficulty in the inspection of boiling water reactors is access to the welds below the top of the core elevation in the boiling water reactor. The inaccessibility results from the narrow clearance between the vessel sidewall and shroud surrounding the core barrel. Increased coverage of the reactor interior requires the use of maneuverable robotic devices (Birring et al. 1990).

The internal clearance is typically in the 150 to 300 mm (6 to 12 in.) range at the top and can be less at the bottom of the vessel. Clearance varies from the top (inlet) to the bottom (outlet) of the jet pumps. For this reason, BWR inspections have always been limited to elevations above the top core level. The limited examination is, however, not enough for the evaluation of aging plants and for license renewal. For this reason, there is always a need to increase the test coverage of welds in BWRs. To increase ultrasonic inspection coverage, several companies in the nuclear industry have designed robotic tooling to access these welds from the inside surface. Several inspection agencies funded programs to conduct additional inspections to increase coverage. These systems combine mechanical scanners with advanced UT data acquisition and analysis systems. Software tools are integrated into these systems for acquisition, real-time data processing, and test tracking. The tracking tool provides a real-time display of the surface location of the scan module by using a drawing of the reactor or examination area.

During a test, the scan module's surface location is recorded on the selected test area drawing. When the inspection is complete, the user can check coverage, display, evaluate, and create reports.

Primary System Piping

The design of coolant piping differs according to reactor design. This can include wrought stainless steel, ferritic steel with stainless weld overlay, and ferritic steel with metallurgically bonded and cast stainless steel. Manual UT is the method applied for inspection of welds in stainless steel pipes. Welds are inspected with both shear and longitudinal waves. Shear waves work well for base metal defects such as inner surface diameter toe cracks. Refracted longitudinal waves are applied to detect discontinuities inside the weld volume that are difficult to penetrate with shear waves. Cast stainless steel is by far the most difficult piping material to inspect. Preferential grain structure in cast stainless steel makes shear waves ineffective. Longitudinal waves are affected less than shear waves. Angle-beam longitudinal waves are therefore used for the testing of cast stainless pipes instead of shear waves. Typically, dual-element low-frequency refracted L-wave transducers or phased arrays in the refracted L-wave mode are applicable.

A significant issue of BWR piping has been the occurrence of intergranular stress corrosion cracking (IG-

SCC). The piping is mostly 304 and 316 stainless steel. A combination of material, environment, and stress can lead to IGSCC. The first noted incidence of IGSCC was in December 1965, and since then cracking has been found in several plants (NUREG 2000). IGSCC is found in the heat-affected zone of the welds. Cracking has been found in small-diameter piping, large-diameter piping, and in Inconel-safe ends welded to austenitic stainless steel. Detection of IGSCC is difficult because of its undefined shape, which follows the grains. Substantial efforts in research and development have led to the development of test procedures and inspector training for detection and sizing of such cracking. These programs are conducted on samples with actual IGSCC. Inspectors are first trained in UT techniques and then tested on samples with actual discontinuities.

Carbon steel pipes with stainless steel weld overlay clad can also be difficult to inspect. Unless the weld overlay is machined, the clad results in random reflections from the weld overlay at the ID surface, making inspection in the second leg practically impossible.

Steam Generators

Steam generators are heat exchangers that are part of the PWR loop. High-temperature, high-pressure water from the reactor enters the steam generator. Hot water flows through the steam-generator tubes to produce steam for the turbines. Steam flows from the secondary loop to the turbines.

Inspections conducted in steam generators focus on the inlet/outlet nozzles, which are located at the bottom of the steam generator. Inspection is done by inserting an inspection device through the nozzle. These devices have special tooling that first passes through the nozzles and once inside, expand to inspect the nozzle. The front end of this tooling includes cameras, phased array probes, and eddy current probes. As always, the tooling must be demonstrated and qualified on mock-ups.

Secondary Piping

A degradation mechanism found in PWR and BWR carbon and low-alloy steel piping is flow-accelerated corrosion (FAC). This corrosion mechanism occurs when the protective oxide layer dissolves by the fast-flowing water. FAC occurs when three conditions are met: temperature, pH level, and steel composition.

Two common methods applied for this inspection are ultrasonic thickness testing and radiographic testing (RT). The main advantage of RT is that the inspection can be done without the removal of insulation.

Emergency Core Cooling Water Piping

An example of material degradation in piping is shown in Figure 5. Material degradation can result in loss of strength and toughness. In some cases, material degradation can result in a reduction in ultrasonic velocity and an increase in ultrasonic backscatter. In

addition, material degradation may or may not include corrosion. Detection of such damage when associated with corrosion can be challenging. A form of material degradation is selective leaching in aluminum bronze. Leaching occurs in cast aluminum bronze components in water service, whereby aluminum leaches out and forms aluminum hydride, leaving a copper-rich volume. Advanced UT techniques have been used with some success for the detection of selective leaching. These include measuring velocity drop using time of flight diffraction software and full matrix capture.

Turbines – Solid Rotor

The common rotor for steam turbines is the solid (or boreless) rotor. Bored rotors were previously used as they ensured removal of defective material from the center, which was left during the steel making and forging process. With improvements in steel making, the bored rotors have been phased out and replaced by solid rotors (Viswanathan 1989). The main advantage of a solid rotor is its lower level of stress compared to the bored rotor. The lower stress level makes the boreless rotor more tolerant of larger discontinuities.

A solid rotor is tested by using a combination of L-wave and transverse wave transducers. Inspection of solid rotors requires that the selected angles cover the maximum possible material volume. Specific scan plans are developed to ensure coverage. As an alternative, phased arrays that sweep a range of angles can be used. Transverse cracking in low-pressure rotors initiates from corrosion pits and can grow during service by fatigue corrosion. Transverse cracking is detected by magnetic particle testing on the outside rotor surface.

Turbines – Blade Attachment

The mechanism of crack initiation and growth in the attachment of turbine disk to blade (steeple) depends on three variables: operating temperature, stresses, and environment. Stress corrosion cracking, combined with fatigue, is the primary mechanism. Initially, cracking

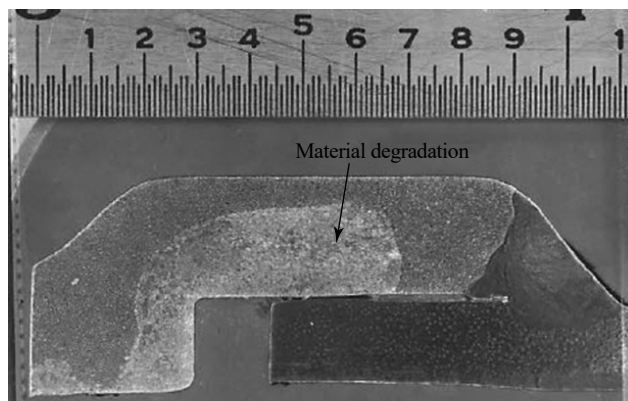


Figure 5. Example of material degradation. Material degradation can result in a decrease of ultrasonic velocity and an increase in backscattering.

Рис. 5. Приклад деградації матеріалу. Деградація матеріалу може призвести до зменшення швидкості ультразвуку та збільшення зворотного розсіювання

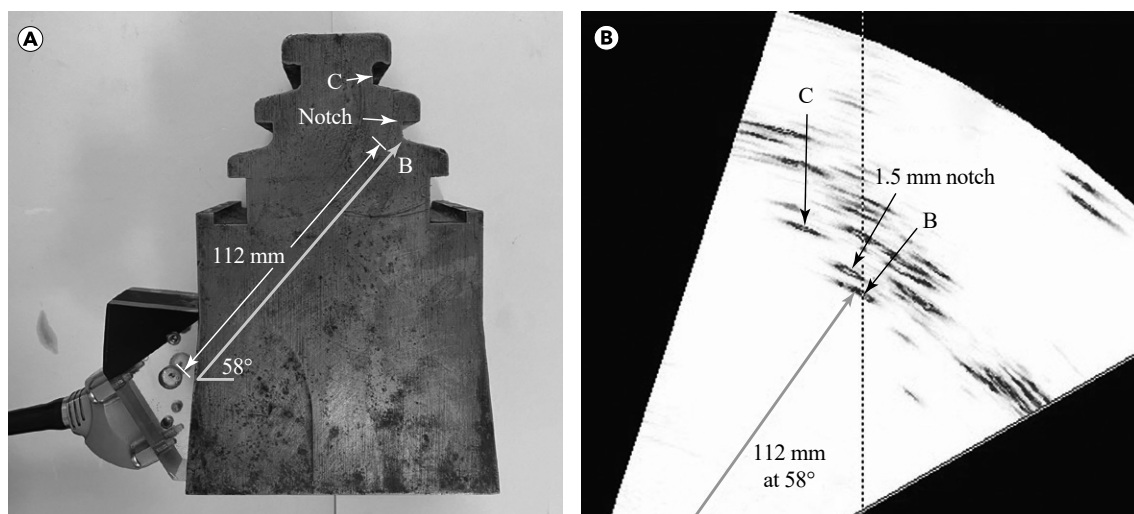


Figure 6. Phased array inspection of turbine disk blade attachment area: (a) PAUT probe setup on the calibration block with notches; (b) phased array image showing detection of 1.5 mm notch. Inspection requires high-resolution PAUT probes to resolve between the notch and geometries B and C. The probe is 5 MHz, 32×1.0 mm.

Рис. 6. Перевірка зони кріплення лопатки диска турбіни фазованою решіткою: (а) установка зонда УЗФР на калібрувальний блок з насічками; (б) зображення з фазованою решіткою, що демонструє виявлення виїмки 1,5 мм. Для контролю потрібні зонди УЗФР з високою роздільною здатністю, щоб визначити межі між виїмкою та геометриями В і С. Зонд має частоту 5 МГц, 32×1.0 мм

in a low-pressure rotor grows slowly by stress corrosion. When the stress intensity K_I exceeds the threshold stress intensity K_{th} , crack growth is predominantly due to fatigue. Crack growth rates in this mode are significantly high because of vibratory loads. Generally, failure can be imminent when the threshold for fatigue crack growth K_{th} is reached. Therefore, it is important that nondestructive tests detect cracks before their stress intensity reaches K_{th} . The test method applied to detect steep cracking depends on the geometry. Dove-tail-shaped turbine blades are inspected by UT only. Phased array or multiple single-element transducers are used for inspection. Side-entry steeples allow access for surface inspection.

Figure 6 shows UT inspection of blade attachment areas using phased array. The PAUT probe is placed at a specific location so that the area of interest is illuminated. The presence of a crack will show as a discrete signal. For the inspection, the PAUT probe is placed on a stationary arm. Data is acquired while the turbine rotates on turning rolls.

NDT Reliability and Performance Demonstration Initiative

Two industries that mandate NDT reliability are aerospace and nuclear, but both apply it differently. The aerospace industry uses tests on a large number of flawed and unflawed samples to validate a 90/95 reliability (that is, 90% probability of detection with a 95% confidence level). The nuclear industry uses performance demonstration. NRC 10 CFR, § 50.55a provides quality assurance and reliability requirements when NDT is performed in nuclear power plants and requirements for performance demonstration initiative (PDI). Details of the performance demonstration are given in Mandatory Appendix VIII of ASME XI. Appendix

VIII, «Performance Demonstration for Ultrasonic Examination», was incorporated into ASME XI in the 1989 edition. Specifically, PDI requires procedures, equipment, and personnel to demonstrate reliability and be qualified by performance demonstration on pressure-retaining components. To simulate real-life inspections, performance demonstration is done on mock-up samples. Mock-ups can include piping, nozzles, reactor vessel welds, and so forth with embedded flaws. Personnel for detection and sizing are qualified for detection if the results of the performance demonstration satisfy the detection requirements of ASME XI, Appendix VIII. As an example, in one case, personnel are qualified if no surface-connected flaw greater than 0.25 in. (6.35 mm) in height is missed and no embedded flaw greater than 0.50 in. (12.7 mm) is missed. Through-wall depths must be sized to 0.15 in. (3.81 mm) root mean square (RMS) and length sized to 0.75 in. (19.05 mm) RMS. Details for performance demonstration are also provided for dissimilar metal welds and welds where examination from both sides is not possible. PDI requires that NDT personnel must be recertified on a three-year interval. Performance demonstration and qualification is conducted at the Electric Power Research Institute in Charlotte, North Carolina.

Nuclear Plant Aging

Nuclear plants were built with a design life of 40 years. However, with high costs of plant retirement and replacement, a need arises for extending plant life past 40 years (NRC 2021). This requires quantitative assessment of aging as related to component integrity. Major categories of aging mechanisms are radiation embrittlement, fatigue, intergranular and irradiation-assisted stress corrosion cracking, corrosion, and corrosion erosion (IAEA 2003, 2005; Shah

and Liu 2002). These mechanisms result in degradation of material, cracking, and loss of material.

Material degradation is caused by embrittlement and resulting loss of toughness. Toughness can be assessed by a surveillance program, where samples placed in the reactor are removed at specified time intervals for conducting tensile and charpy tests. Ultrasonic methodology such as velocity changes and scattering can be applicable on a case-by-case basis. The primary volumetric NDT method for cracking is UT. This can include conventional manual UT, tip diffraction, and PAUT. The main issue with inspection is not just testing, but reliability. Manual UT is highly operator dependent and should be used carefully after assessing technician skill. Techniques based on crack tip signals are not applicable for austenitic steels and cast stainless steel. Creeping wave method is another approach used sometimes for surface inspections. Outer diameter (OD) creep wave probes are high-angle refracted L-wave probes. Inner surface ID creep is shear wave mode converted to high-angle L-wave. There are no creeping waves in elastic media, and the term «creeping wave» is nothing but a misinterpretation of high-angle refracted longitudinal signals (Achenbach 1999; Blanshan and Ginzel 2008). Obsolete and incorrect methods result in loss of inspection reliability and confidence and should be discarded.

PAUT is the primary methodology for ultrasonic inspections. Even with PAUT, there can be quality issues if proper probes are not selected. Small-aperture PAUT probes, such as 10 mm to inspect 25 mm thickness, will result in large beam spread and poor resolution. For high-resolution and high-quality PAUT, a probe active aperture of at least 0.8X the thickness for shear waves and 1X the thickness for refracted longitudinal waves is recommended (Birring 2021).

To achieve the highest resolution, high frequencies such as 5 MHz should be used for both carbon steel and nickel alloy steels. Therefore, when inspecting a 30 mm thick alloy 182 weld, inspection should be done using a 5 MHz, 32×1 mm probe with a 32:128 phased array machine. A 64:128 phased array instrument should be used when using a 64-element probe on heavy-wall vessel thickness. Lower frequencies should be used only when sound penetration can be a problem in materials, such as cast stainless steel.

Another issue with refracted L-wave is the choice of calibration reflectors. Codes allow both side-drilled holes or notches as calibration reflectors for piping. They work well for shear waves as they produce almost equivalent sensitivity. This is not the case with refracted longitudinal waves, where L-wave mode converts on inner surface notches and results in a significantly reduced signal as compared to side-drilled holes. The sensitivity difference between notches and side-drilled holes can be as high as 16 dB at a refracted angle of

45° (Birring 2016). Therefore, when using refracted L-wave, notches should be used for surface sensitivity and side-drilled holes for volumetric sensitivity.

Advanced and reliable NDT technologies are therefore required for the assessment of aging and plant life extension.

Conclusions

Unlike the nonnuclear industry, where selection and application of inspection methods are made by owners and insurance companies, nuclear plant component inspections are regulated. The regulations apply to inspection method, coverage, and inspection intervals. The regulations and code require that methods, equipment, and personnel prove reliability of the test on mock-ups and samples with flaws. Further, inspectors must requalify periodically. The main challenge with nuclear plant inspection is aging and plant life extension past 40 years of design life. NDT methods play an integral and important role in this license-renewal exercise. Specifically, application of PAUT is gaining wider usage and replacing conventional ultrasonic single-element probes.

With regard to effective application of phased arrays, two important points are highlighted. First is the selection of phased array probes with a large aperture and higher frequency to achieve high resolution. The second pertains to selection of calibration reflectors when using refracted L-wave.

Notches and side-drilled holes should be used separately to establish sensitivity — notches for ID surface sensitivity and side-drilled holes for volumetric sensitivity.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank Jesse Delgado, Nuclear Services at Industrial Inspection and Analysis, San Antonio, Texas, for providing information on the ROV system for nozzle inspection.

AUTHORS

Anmol Birring: NDE Associates Inc., Houston, TX; nde@nde.com

James Williams: South Texas Electric Generating Station, Wadsworth, TX; jwilliams@stpegs.com

CITATION

Materials Evaluation 80 (6): 24-30

<https://doi.org/10.32548/2022.me-04269>

©2022 American Society for Nondestructive Testing

REFERENCES

1. Achenbach, J.D., 1999, *Wave Propagation in Elastic Solids*, eighth impression, Elsevier, Amsterdam, Netherlands
2. ASME, 2019 a, *Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, Nondestructive Examination*, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY
3. ASME, 2019b, *Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Division 1, Rules for Inspection and Testing*

- of Components of Light-Water Cooled Plants, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY
4. Birring, A., 2016, «Selection of Calibration Reflectors for Corrosion Resistant Alloy Piping», *Materials Evaluation*, Vol. 74, No. 3, pp. 360-366
 5. Birring, A., 2021, «Optimizing Probe Active Aperture for Phased Array Weld Inspections», *Materials Evaluation*, Vol. 79, No. 8, pp. 797-804, <https://doi.org/10.32548/2021.me-04220>
 6. Birring, A.S., E. Peterson, E.A. Franke, and A.E. Crouch, 1990, «Robotic Devices for NDE of Component Interiors», *Proceedings from the Tenth Annual EPRI NDE Information Meeting*, Palo Alto, CA
 7. Blanshan, B., and E. Ginzel, 2008, «The Truth behind Creeping Waves», *Materials Evaluation*, Vol. 66, No. 5, pp. 465-470
 8. IAEA, 2003, IAEA-TECDOC-1361: *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety, Primary Piping in PWRs*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria
 9. IAEA, 2005, IAEA-TECDOC-1470: *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: BWR Pressure Vessels*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria
 10. NRC, 2000, NUREG-1719: *Pipe Cracking in U.S. BWRs: A Regulatory History*, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC
 11. NRC, 2006a, 10 CFR, Part 50 – *Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities*, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC
 12. NRC, 2006b, 10 CFR, § 50.55a, *Codes and Standards*, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC
 13. NRC, 2014, NUREG/CR-7187: *Managing PWSCC in Butt Welds by Mitigation and Inspection*, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC
 14. NRC, 2020, «Pressurized Water Reactor (PWR) Systems», *Reactor Concepts Manual*, USNRC Technical Training Center for Educators, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, last updated 25 November 2020
 15. NRC, 2021, 10 CFR, Part 54 – *Requirements for Renewal of Operating License for Nuclear Plants*, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC
 16. NRC, 2022, «Power Reactors», US NRC website (nrc.gov/reactors/power.html), US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, last updated 31 March 2022, accessed April 2022
 17. Shah, YN., and YY. Liu, 2002, «Generic Aging Management Programs for License Renewal of BWR Reactor Coolant System Components», 10th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 10), Arlington, VA
 18. STUK, 2000, YVL 2.1: *Nuclear Power Plant Systems, Structures and Components and their Safety Classification*, Radiation and Nuclear Safety Authority, Helsinki, Finland
 19. Viswanathan, R., 1989, *Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components*, ASM International, Materials Park, OH

Premission to Reprint 25.07.2022:
The American Society for Nondestructive Testing, Inc.
CITATION: *Materials Evaluation* 80 (6): 24-30
<https://doi.org/10.32548/2022.me-04269>
©2022 American Society for Nondestructive Testing



КОНФЕРЕНЦІЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ

м. Київ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

17 листопада 2022 р.



Тематика конференції

- Зварювання та споріднені технології з'єднання та обробки перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, фізико-хімічні процеси при їх реалізації
- Фізична та конструкційна міцність матеріалів, зварних з'єднань і конструкцій, їх діагностика та продовження ресурсу експлуатації
- Автоматизація і роботизація технологій з'єднання та обробки матеріалів, математичне моделювання процесів та інформаційні технології
- Створення нових функціональних та конструкційних матеріалів і технологій їх отримання методами спеціальної електрометалургії
- Нові процеси і технології нанесення покриттів різного призначення та інженерія поверхні
- Матеріали, технології і вироби медичного призначення
- Адитивні технології отримання виробів і елементів конструкцій на основі лазерних, електронно-променевих і дугових джерел енергії
- Технології ремонту та відновлення інфраструктурних і промислових об'єктів.

Контрольні дати

Подання заявок для участі в конференції
(доповідь наживо / on-line доповідь / стендова доповідь / без доповіді)

– тез доповідей до 20.10.2022

– без доповіді до 10.11.2022

Розсилка програми та збірки тез до 04.11.2022 конференції

Оплата організаційного внеску до 16.11.2022

Організаційний комітет конференції

тел./факс: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.pwi-scientists.com/ukr/wtd2022



ДОСВІД ІНСТИТУТУ ТРУБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ім. Я.Є. ОСАДИ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТРУБ

При ультразвуковому контролі якості циліндричних виробів (труб і прутків) виникають труднощі з введенням пучка променів ультразвукових хвиль у заданому напрямку. Для ультразвукових перетворювачів промисловість виготовляє переважно плоску п'єзокераміку. А у згаданих об'єктів контролю поверхня є циліндричною. Тому з усього пучка променів такого перетворювача на поверхню контролюемого виробу промені падають під потрібним кутом тільки вздовж вузької смужки. А більша частина променів на результат не працює, створюючи при цьому сигнали перешкод.

При контролі труб і прутків діаметром менше 100 мм переважно використовують іммерсійний варіант акустичного контакту. Згадану проблему вирішують фокусуванням пучка ультразвукових хвиль у лінію, яка паралельна до осі труби. При цьому відстань між трубою та перетворювачем вибирають таку, при якій фокус пучка ультразвукових хвиль знаходиться близько до осі труби (за умови, що труба заповнена водою та її стінка вільно пропускає звук).

Зазвичай для фокусування пучка променів, що випромінюються перетворювачем, використовують тонкі плоско-увігнуті лінзи з органічного скла. На жаль, цей спосіб не позбавлений недоліків. По-перше, лінзи рано чи пізно відшаровуються. По-друге, у лінзі залишається 40 % (за амплітудою) звукової енергії, через що в лінзі виникає ревербераційний шум із непередбачуваним його впливом на амплітуду ехо-сигналу, що реєструється від дефекту. Крім цього, при великому сортаменті труб, що контролюються, треба мати й великий набір перетворювачів з різними фокусними відстанями та частотами. Співробітники ДП «Науково-дослідний і проектно-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я.Є. Осади» (м. Дніпро) у середині 90-х років минулого століття у своїх розробках позбулися перерахованих недоліків фокуруючих перетворювачів. Для цього лінзу замінили на рефлектор. На рис. 1 у двох проекціях наведено схему такого перетворювача, де: 1 – корпус перетворювача з п'єзoeлектричною пластиною 2. У цьому корпусі є демпфер п'єзопластины, який зроблено із суміші епоксидної смоли з феровольфрамовим порошком. 3 – наскрізні отвори у цьому корпусі для кріплення двома гвинтами 5 до конусного рефлектора 4. На рис. 1 п'єзoeлектричний перетворювач (ПЕП) знаходиться у вихідному положенні, коли акустична вісь 6 перетинається з віссю контрольованої труби 7. У такому положенні ПЕП-а амплітуда ехо-сигна-

лу від поверхні труби є найбільшою. За цією ознакою легко знайти і точно налаштувати (виставити) ПЕП у вихідне положення.

На рис. 1 позначено спрощений (прямокутний) п'єзоелемент з співвідношенням сторін від 1/4 до 1/6. Реально вертикальні краї цього елемента повинні мати таку ж кривизну, як у конусного рефлектора. Але в умовах виробництва труб виготовити п'єзоелемент такої форми не вдається. Практика показала, що і прямокутний п'єзоелемент з поставленим завданням успішно справляється.

Потрібну форму поверхні джерела, що випромінює, можна отримати за допомогою маски, накладеної поверх п'єзопластины. Це може бути мікропористий пінопласт завтовшки 1...2 мм. Площа п'єзопластины, що екранується, є паразитною ємністю, яка зменшує амплітуду ехо-сигналу від дефекту. Тому її площа має бути якомога меншою величиною (не більше 40 % від загальної площі п'єзоелемента). Рефлектор треба виготовляти з цілісного кругляка або товстостінної труби, діаметр якої у 2,5...4,0 рази більший за діаметр контрольованих труб. Кращий матеріал для рефлектора – латунь. Бронза не підходить, її крупнозернистість створює певний фон (при частоті ультразвуку 5 МГц і більше). На жаль, виготовлення рефлекторів не є рентабельним, використовуються лише один або два невеликі фрагменти з однієї заготовки. Але на спеціальних верстатах виготовлення рефлекторів може коштувати дешевше. Роздільне виготов-

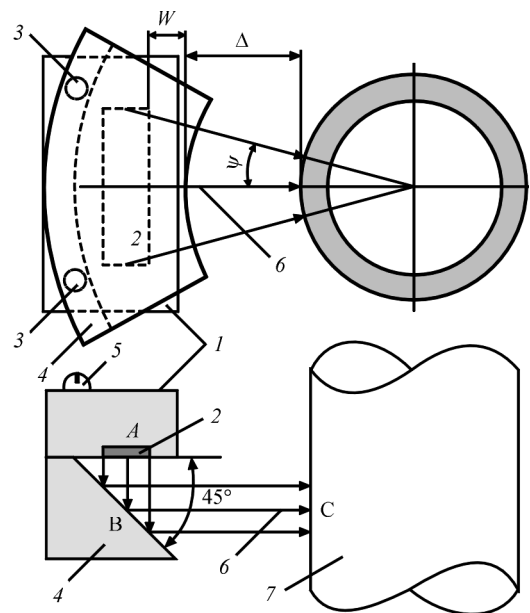


Рис 1. Схема акустичного вузла з конусним рефлектором, який знаходиться у вихідному положенні щодо труби, що контролюється

лення рефлекторів та перетворювачів дозволяє застосовувати різні комбінації одного рефлектора з перетворювачами різних частот та навіпаки.

При контролі поверхня п'єзоелемента перебуває у контакті з водою. Якщо на контроль подаються погано вимиті труби після хімічної обробки, на п'єзокераміку слід наклеїти скотч, щоби зберегти срібне покриття. При цьому скотч збільшує і коефіцієнт проходження ультразвуку через цю межу.

Одним рефлектором можна контролювати труби, що відрізняються за діаметром у 2,0...2,5 рази. При контролі труби максимального діаметра відстань Δ (між краєм рефлектора та поверхнею труби) має бути не менше 10 мм. А відстань від цього ж краю рефлектора у зворотному напрямку W (до п'єзоелемента) має бути такою, при якій не рєструється ехо-сигнал від гострого краю рефлектора. При частоті ультразвуку 10 МГц ця відстань має бути щонайменше 3 мм. Для інших частот цю відстань треба визначати практично. А взагалі цей сигнал контролю не заважає. Його можна використовувати для вибору початку розгортки на екрані дефектоскопа.

Рефлектор фокусує пучок променів лише у площині поперечного перерізу труби. Налаштування механоакустичного вузла (МAB) установки для контролю труб починають із пошуку вихідного положення, при якому вісь конусного рефлектора перетинається з віссю контрольованої труби (верхня проекція на рис. 1). При цьому положенні від поверхні труби виходить ехо-сигнал найбільшої амплітуди. З його допомогою налаштування МAB-а виконується легко та з великою точністю. Для цього спочатку треба візуально зорієнтувати перетворювач так, щоби поверхня п'єзопластини A була спрямована перпендикулярно до осі труби (нижня проекція на рис. 1). Потім переміщенням перетворювача вгору/вниз треба знайти йому таке положення, при якому ехо-сигнал від поверхні труби виходить найбільшим. Після цього у цьому положенні треба уточнити попереднє налаштування (яке робилося на око), теж домагаючись максимальної амплітуди ехо-сигналу від труби. А закінчується попереднє налаштування МAB-а суміщенням фокусу рефлектора з віссю контрольованої труби. Цю операцію найкраще виконувати за допомогою набору шаблонів потрібної довжини або двох-трьох шаблонів регульованої довжини. Шаблон може мати вигляд рейки чи стрижня. Узявши в руку такий шаблон, притискаємо один край до труби, а до іншого краю шаблону наближаємо гострий край рефлектора до упору з ним. Після цього положення ПЕП-а фіксуємо.

Використання запропонованих шаблонів не є обов'язковим. Вони можуть допомогти тільки

працівникам, які не мають досвіду налаштування МAB-а. Справа в тому, що при переміщенні ПЕП-а зліва направо від поверхні труби формуватиметься ехо-сигнал з двома максимумами. Перший з них виникне тоді, коли фокус пучка ультразвукових хвиль буде на поверхні труби, а другий – від цієї ж поверхні, але тоді, коли уявний фокус пучка звукових хвиль поєднається з уявною віссю труби. А у проміжку між цими положеннями амплітуда ехо-сигналу змінюється слабо, через що не завжди вдається виконати точне налаштування. І тільки тоді, коли фокус уявного пучка променів опиняється за віссю труби, починається різке зниження амплітуди відбитого сигналу.

Менший радіус кривизни рефлектора є вихідним параметром для подальших розрахунків. Тому його значення бажано інструментом для креслення, а ще краще штампом нанести на вільну та доступну оку поверхню самого рефлектора. А його непрацюючі «ріжки», що виступають попереду, ближче до труби, бажано видалити.

Орієнтацію фронту хвилі abv , випромінюваної ПЕП-ом, щодо контрольованої труби показано на рис. 2. Щоб виявити в трубі дефекти поздовжньої орієнтації (тріщини), ПЕП разом із рефлектором треба змістити від вихідного положення вгору в напрямку перпендикуляра до акустичної осі перетворювача і контрольованої труби на величину Y (рис. 2). Цим зміщенням забезпечується потрібний кут падіння ультразвукових хвиль на поверхню труби. При контролі поперечними хвилями цей кут дорівнює $\beta = 16...17^\circ$. Згідно з рис. 2 $Y = R \cdot \sin \beta$.

На практиці величину цього зсуву обчислюють за спрощеною формулою $Y = D/7$, де D – діаметр контрольованої труби. На рис. 2 літерами abv позначений фронт однієї з хвиль, що формуються конусним рефлектором. Кривизна фронту є циліндричною. Цей фронт хвилі є ідеальним тільки у тому випадку, коли в об'єкт контролю треба вводити звук за нормаллю. А якщо в циліндричний об'єкт контролю треба вводити звук під певним кутом, фронт падаючих на об'єкт хвиль повинен мати вигляд евольвенти кола, центр якого збігається з центром об'єкта контролю, а його радіус

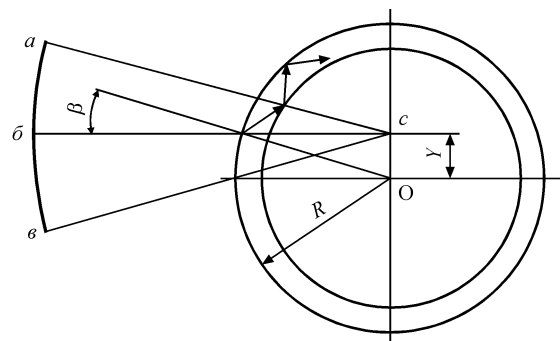


Рис. 2. Орієнтація фронту хвилі abv , випромінюваної ПЕП-ом, щодо контрольованої труби

r менший за радіус контрольованого об'єкта R (рис. 3, а). Справедливість цього явища впливає з суті самої евольвенти – це лінія, яку малює кінець розрізаного кола шляхом поступового спрямування лінії цього ж кола (або розмотування з натягом тонкої нитки, намотаної на трубу). Отже, лінія, що малюється, є завжди перпендикулярною до радіусу вже спрямленої частини цього кола, яка є дотичною до свого кола. Тому, якщо поверхня випромінювача хвиль матиме вигляд евольвенти, його промені ковзатимуть поверхнею свого кола, тобто падатимуть під кутом 90° . А на поверхню концентричного кола більшого діаметра вони падатимуть вже під гострим кутом. Згідно з рис. 3, а залежність між радіусом об'єкта контролю R , радіусом кола евольвенти r і кутом падіння β фронту хвилі на поверхню контрольованої труби виражається формулою [Загорулько В.С. Авт. свид. СССР №201752, Бюлл. изобр., 1967, № 18]:

$$\sin \beta = r/R \quad (1)$$

Ці ідеальні умови для контролю труб складно реалізувати. Проблемою є евольвентна кривизна, яку виготовити не так просто. Але позитивним моментом є те, що довжина акустичних хвиль, які використовуються, усього лише на один порядок менша за розміри використовуваних об'єктів – труб, рефлекторів, п'єзопластин та інших елементів. Це дозволяє на обмеженій, але для нас прийнятній ділянці довжини евольвенти замінити її циліндричною поверхнею. На рис. 3, б показано, як невелике зміщення точки O' (на 0,1 довжини звукової хвилі) від кола O дозволяє вивести формулу для розрахунку допустимого кута розкриття ψ ПЕП-а, що використовується. З рис. 3, б наочно видно, що лінія кола, проведена з центру O' , у межах великої дуги розміром 2ψ практично співпадає з евольвентою. Приймаючи допустиму норму зазначеного відхилення циліндричного фронту хвилі від евольвентної не більше 0,1 частини довжини хвиль у рідині навколо труби, склали математичне рівняння для обчислення кута ψ . Воно вийшло трансцендентним, яке у радикалах не обчислюється. Але розклавши тригонометричну функцію у ступеневий ряд і обмежившись першими двома членами цього ряду, отримали формулу для обчислення приблизного значення граничного кута сходження ψ циліндричного фронту хвилі, що падає на поверхню контрольованої труби під одним і тим же кутом β :

$$\psi \leq \frac{2}{\sqrt[3]{Df \sin \beta}}, \quad (2)$$

де розмір кута ψ виражений у рад, діаметр труби D – у мм, частота ультразвуку f – у МГц, а кут падіння β акустичної осі ПЕП-а на поверхню труби – у градусах.

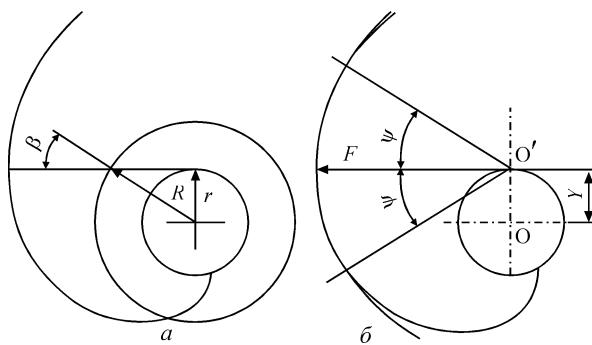


Рис. 3. Евольвента кола радіусом r (а), збіг цієї ж евольвенти з частиною кола з центром у точці O' (б)

Далі необхідно врахувати ще й інший розмір неприпустимого дефекту – його довжину вздовж труби. І тут виникає інша проблема. Норми на довжину та глибину контрольного відбивача у стандартному зразку (СЗ) усі (як виробники, так і споживачі труб) вважають нормою і на довжину неприпустимого дефекту (хоча про це ніде і нічого не сказано). Через це у числовому вимірі довжина та глибина неприпустимого дефекту відрізняються у десятки разів. Тому при контролі труб визначити глибину, довжину та орієнтацію дефекту, маючи лише один аргумент – амплітуду ехо-сигналу, неможливо.

Для наочності та практичного застосування далі йтиметься про конкретну задачу. Розрахуємо параметри механоакустичного вузла для контролю шліфованих труб діаметром ≥ 6 мм і товщиною стінки ≥ 1 мм. У катаних трубах найнебезпечнішим дефектом є тріщина. Переважна кількість їх орієнтована вздовж труби з невеликим відхиленням на $1...2^\circ$. На щастя, тріщини виявляються надійніше за інші дефекти, але тільки у тому випадку, якщо їх глибина $\geq 1/3$ довжини поперечної хвилі, що використовується:

$$h/\lambda_t \geq 0,33, \quad (3)$$

де h – глибина тріщини; λ_t – довжина поперечної хвилі.

Формулу (3) отримано експериментальним шляхом. При глибині тріщин менше зазначеної крива залежності амплітуди ехо-сигналу $A = f(h/\lambda_t)$ швидко знижується, наближуючись до структурних шумів (див. рис. 6).

Виходячи з експериментальної залежності (3), визначаємо частоту ультразвукових хвиль контролю вибраних труб. У нормативних документах контролю труб ультразвуком вказано розміри штучних дефектів, за якими треба налаштовувати механічну частину установки контролю труб і чутливість дефектоскопа для виявлення неприпустимих дефектів. Штучні дефекти є поздовжніми канавками певної глибини, довжини і ширини. У переважній кількості нормативних документів глибина поздовжньої канавки дорівнює 10 % товщини стінки труби, але не більше за обумов-

лену величину. При цьому немає прямих вказівок на те, що розміри зазначених канавок є ще й нормою для розмірів дефектів, що виявляються. Але всі (як виробники, так і споживачі труб) розуміють ці розміри саме так. А дефектоскоп під час контролю генерує лише один головний параметр – амплітуду ехо-сигналу. По ній ще можна судити про глибину штучної канавки та реальної тріщини. Але для вимірювання довжини канавки та виявлення косих тріщин треба знаходити інші рішення. Через це дуже часто виникають конфлікти між споживачем і виробником труб. Для вирішення цих проблем ми вибрали наступний варіант контролю. Оскільки глибина і довжина тріщин вимірюються за взаємно перпендикулярними напрямками, з'являється можливість їх індивідуально розпізнавати та визначати розміри. Глибина тріщин у десятки разів менша за їх довжину. Щоб отримати від них потрібну амплітуду, треба за напрямком вертикалі до осі труби збільшити розмір п'єзоелемента, а пучок ультразвукових хвиль, що генерується рефлектором, сфокусувати на тріщині. А щоби виявлялися ще й косі тріщини, цей же пучок ультразвукових хвиль в іншому напрямку (вздовж труби) треба зменшити і цим розширити його діаграму спрямованості хвиль, що випромінюються в цій площині. Математична залежність між параметрами такого пристрою має вигляд [Ермолов И.Н. (1992) Контроль ультразвуком (краткий справочник). Москва, ЦНИИТМАШ]:

$$\Theta = \arcsin[n\lambda/a], \quad (4)$$

где Θ – кут розкриття основної пелюстки діаграми спрямованості випромінювача вздовж труби (2°); n – коефіцієнт, значення якого залежить від форми випромінювача та його діаграми спрямованості (у режимі ехо-сигналу на рівні 0,5 його значення дорівнює 0,26); λ – довжина хвилі у воді; a – радіус випромінювача, який у нашому випадку еквівалентний половині ширини перетворювача b у горизонтальній площині:

$$b = 2a = 2n\lambda/\sin 2^\circ = 2 \cdot 0,26 \cdot 0,15 / 0,035 = 2,2 \text{ мм.}$$

А щоби ехо-сигнал від тріщини підняти над рівнем шумів, розмір п'єзоелемента по вертикалі (поперек труби) треба збільшити у 3...6 разів за горизонтальний розмір. Запропонований діапазон значень коефіцієнта посилення ехо-сигналу K_ϕ обумовлений такими обставинами. При значенні цього коефіцієнта менше 2-х майже не помітно користі від рефлектора, а при його значенні більше 6-ти через бовтання труби під час контролю можуть з'являтися невиявлені неприпустимих дефектів. Оптимальне значення $K_\phi = 4 \pm 1$. Обчислюємо довжину п'єзопластини по вертикалі $a = 2,2 \cdot 4 = 9$ мм. Оскільки фокусувати пучок звукових хвиль можна лише у ближ-

ній зоні випромінювача (у нашому випадку відбивача), обчислимо межу ближньої зони нашого ПЕП-а. По вертикалі ближню зону треба вираховувати за формулою [Ермолов И.Н. (1981) Теория и практика ультразвукового контроля. Москва, Машиностроение]:

$$N_a = a^2/2\lambda = 9^2/(2 \cdot 0,15) = 270 \text{ мм.}$$

Результат цього розрахунку показує, що він у десятки разів більший за обраний. А це означає, що фокусування буде виконане бездоганно.

Аналогічним чином можна обчислювати розміри акустичного вузла і для наступного діапазону контрольованих труб діаметрами від 14 до 32...34 мм тощо.

Вирішивши проблему виявлення косих тріщин, ми позбавили себе можливості автоматично визначати довжину дефектів. Їхню довжину і раніше визначали сумнівно, а тепер тим більше. Цю проблему можна вирішити лише за допомогою електронних лічильників, здатних при обертанні труби вести облік дефектів, виявлених підряд (без пропусків) вздовж однієї і тієї ж утворюючої контрольованої труби (з відхиленням близько $\pm 20^\circ$). При цьому крок подачі труби за один оберт повинен бути в 2 рази менший від наступної величини – довжини канавки у СЗ мінус 2 мм, тобто ширини п'єзоелемента вздовж труби. Дефект вважається неприпустимим, якщо від нього лічильником буде зафіксовано два і більше ехо-сигнали, що реєструються поспіль без пропусків. Якщо після першого сигналу через один оберт труби другий ехо-сигнал не з'явився, значить, дефект коротше за допустимий, і лічильник обнулиться. Якщо в одному перерізі труби можуть бути дві і більше тріщини, зміщені по периметру, то стільки ж має бути і лічильників, які працюють по черзі. Априорі вважаємо, що двох лічильників достатньо. Якщо запропонованих лічильників немає, тоді після кожної зупинки трубопротяжного механізму (через виявлений дефект) трубу треба подати назад на чверть метра, повернути її вручну на пів оберта (долаючи тертя трубопротяжного механізму) і знову проконтролювати. Якщо дефект знову буде виявлений, то, швидше за все, він протяжний, і у цьому треба переконатися візуально на екрані дефектоскопа. У іншому випадку дефект допустимої довжини і контроль труби можна продовжувати.

Досі йшлося про контроль труб поперечними хвилями. Але труби з товщиною стінки менше одного міліметра, і особливо менше 0,5 мм, доводиться контролювати хвилями Лемба. Ці хвилі – результат дії резонансу, а товщина стінок у трубах може бути не стабільною як по довжині труби, так і по периметру. У результаті так само не стабільним вийде й результат контролю. Радикальне вирішення

цієї проблеми – збільшення частоти ультразвуку до 15...20 МГц. А за відсутності таких дефектоскопів доводиться користуватися тими, що є. При контролі труб хвилями Лемба налаштовувати акустичний вузол доводиться на дотик, зміщуючи ПЕП вгору/вниз та ближче/далі від труби, до отримання прийнятного результату. При цьому діапазон зміщення ПЕП-а вгору збільшується до половини радіуса контрольованої труби (замість $D/7$).

Для кріплення та налаштування перетворювача з конусним рефлектором розроблено простий та зручний механоакустичний пристрій (МАП), який чудово працює вже другий десяток років на ТОВ «Дніпровський завод прецизійних труб» (Дніпропетровська обл.). Ескіз МАП-а представлено на рис. 4. За допомогою струбцини 2 весь механізм збору навішується на борт акустичної ванни 1 або на рамку (1 на рис. 5). Фіксується МАП у потрібному місці двома гвинтами 3. Таке кріплення дозволяє легко та швидко зняти з ванни весь механізм для спільної або роздільної заміни рефлектора та перетворювача. До цієї ж струбцини гвинтами прикріплено кронштейн 4, а до нього куток 11. Обидва вони призначені для фіксації осі 5. Діаметр верхньої частини цієї осі дорівнює 6 мм, а нижче знаходиться різьбова частина $M 10 \times 1$, після якої йде гладка частина осі діаметром 7,5 мм, а на самому кінці – коротка частина діаметром 4 мм. Точити цю вісь треба на токарному верстаті з одного встановлення (кріплення). Порушення цієї вимоги призведе до «виляння» ПЕП-а при налаштуванні акустичного вузла.

Кронштейн 4 і куточок 11 виконані так, щоб вісь 5 весь час була у притиснутому стані (без люфту у вертикальному напрямку). У верхній частині осі є отвір $\varnothing 1$ мм для шпильки, яка вставляється після складання всього механізму і злегка пригинається, щоб не випадала. Ця шпилька призначена для обертання осі 5 за допомогою зйомного коловороту при налаштуванні МАП-а. До складу механізму входить ще одна важлива деталь – платформа 6. У верхній її частині є різьбовий отвір для осі. Крок цього різьблення обу-

мовлює товщину платформи (не менше 1,5 мм). Ширина платформи по горизонталі має бути не менше 50 мм, а довжина різьбової частини осі 5 залежить від сортаменту контрольованих труб. Різьблення на осі 5 призначене для переміщення платформи, а з нею і перетворювача, на потрібну величину. Довжина різьбової частини осі дорівнює $1/7$ частини діаметра найбільшої труби плюс 20 % запасу. А якщо треба буде контролювати труби хвилями Лемба, то зміщення перетворювача збільшиться до $1/4$ частини діаметра контрольованої труби. Крок різьблення величиною 1 мм на налаштувальній осі 5 обраний не випадково. Оскільки вимірювання величини зміщення акустичної осі перетворювача від вихідного положення до робочого ведеться у мм, то перемістити перетворювач на необхідну величину за допомогою різьбового гвинта з кроком 1 мм можна без будь-яких шкал і з великою точністю. Для цього треба надіти на гвинт коловорот з прорізом для шпильки і обертати його, відраховуючи потрібну кількість обертів, у тому числі і його десяті частки. Після налаштування коловорот з осі треба зняти, щоб випадково його ніхто не зачепив. Платформа 6 у запропонованому механізмі змінює орієнтацію перетворювача ще й у горизонтальній площині. Для цього у платформі є підпружинений шток 12 і опорний гвинт 7. Повертаючи цей гвинт в один чи інший бік, ми досягаємо максимальної амплітуди ехо-сигналу від поверхні СЗ або контрольованої труби. У вихідному положенні перетворювача цим гвинтом ми виставляємо його акустичну вісь перпендикулярно до осі труби.

У запропонованому механізмі пружина розміщена якнайдалі від агресивної води. Але надійно врятувати її цим не вдається. Тому періодично пружину треба змащувати солідолом. Без цієї процедури міжвитковий простір засмічується іржею і пружина перестає працювати. Подовжувач 8 на рис. 4, а показаний тільки контуром, а на рис. 4, б показані ще й прикріплені до подовжувача рефлектор 9 і перетворювач 10.

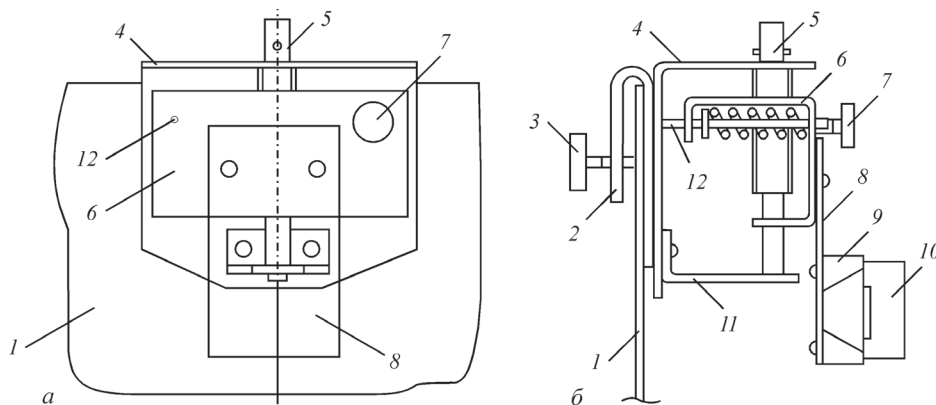


Рис. 4. Схема механізму для кріплення та орієнтації рефлекторного перетворювача: а – вид зверху; б – вид збоку

На рис. 5 наведено схему автономної механоакустичної рами (каретки) 1 з двома МАП-ми. У цій рамці є дві призми 7, які власною вагою рамки спираються на контрольовану трубу. Щоби під час контролю рамка не проверталася, передбачено стаціонарний стопорний гвинт 9. Для цього гвинта у рамці вздовж труби є щілина завдовжки 15...20 мм. Пересуваючи рукою рамку вздовж труби, можна швидко знайти в ній дефектну ділянку.

Для контролю труб з різних боків використовуються два МАП-и, які кріпляться до поперечних бортів рамки або ванни з різних боків. Переміщенням МАП-ів ближче до труби або від неї здійснюється суміщення його фокусу з віссю труби. Так як при ослабленому кріпленні струбици порушується орієнтація МАП-у, переміщати його треба дискретно, спочатку через 3...5 мм з надійною фіксацією та підналаштуванням орієнтації перетворювача у горизонтальній та вертикальній площині, добиваючись щоразу максимальної амплітуди ехо-сигналу від відбивача у стандартному зразку. А для точного нала-

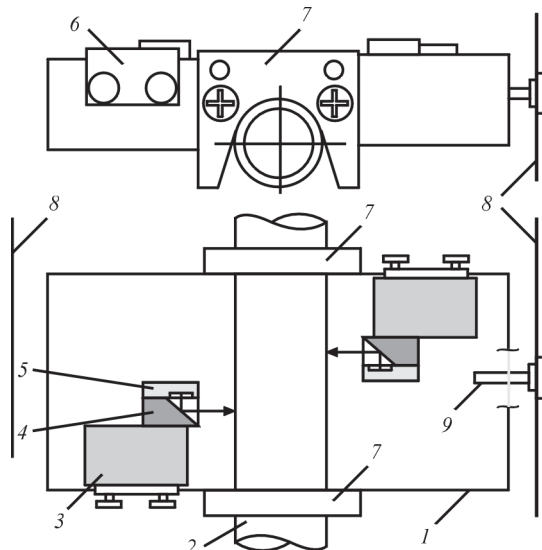


Рис 5. Схема рамки з двома МАП-ми в акустичній ванні: 1 – рама для підвішування блоків; 2 – труба, що контролюється; 3 – контролюючий блок; 4 – рефлексор; 5 – МАП; 6 – стробоскоп; 7 – ядро; 8 – стінка ванни з водою; 9 – важіль для пошуку виявленого дефекту

штування зміщувати МАП треба з дискретністю 1...2 мм. Довжину ванни вздовж труби можна зменшити до такої величини, коли акустична вісь правого перетворювача буде нижча за ліву (рис. 5). Виставляти акустичні осі перетворювачів на одній лінії привабливо, але не бажано, щоб не мати неприємностей із впливом сигналу від одного дефектоскопа або каналу на інший. Як герметизувати іммерсійну ванну та як стабілізувати трубу, що обертається під час контролю, кожен конструктор може вирішити самостійно. Ми ж давно відмовилися від будь-яких точених деталей: втулок, шайб, прокладок тощо, а використовуємо призми, опори та інші пристрої, положення яких у міру зносу можна коригувати та надалі використовувати.

Протікання води усуваємо великими листами вакуумної гуми, які з обох боків ванни шайбами (призначеними для максимального діаметра контрольованих труб) притискаємо до стінки ванни з внутрішньої сторони. А з зовнішнього боку ванни V-подібними призмами з капроліту стабілізуємо трубу. Розташування призми регульоване, що дозволяє однією призмою, у міру її зношування, стабілізувати труби від малого до найбільшого розміру. Так само експлуатуються і гумові шайби для утримання води у ванні.

Наведемо результати контролю труби 16×1,5 мм. На зовнішній поверхні цієї труби є поздовжній U-подібний паз змінної глибини, ширина якого 0,3 мм, а глибина на довжині 200 мм плавно змінюється від 0 до 0,5 мм. Для побудови залежності амплітуди ехо-сигналу від глибини пази амплітуди сигналів вимірювалися за шкалою на екрані дефектоскопа. Нижче наведено результати контролю зазначеної труби двома ПЕП-ми для різних частот: 5 МГц (рис. 6, а) і 10 МГц (рис. 6, б).

На рис. 6 глибина пази представлена у двох вимірах: абсолютному (у мм) та відносному (до довжини поперечної хвилі, якою ведеться контроль). На графіках чітко видно, що по глибині пази, тріщини та інших подібних дефектів амплітуди ехо-сигналів від них швидко знижуються, не доз-

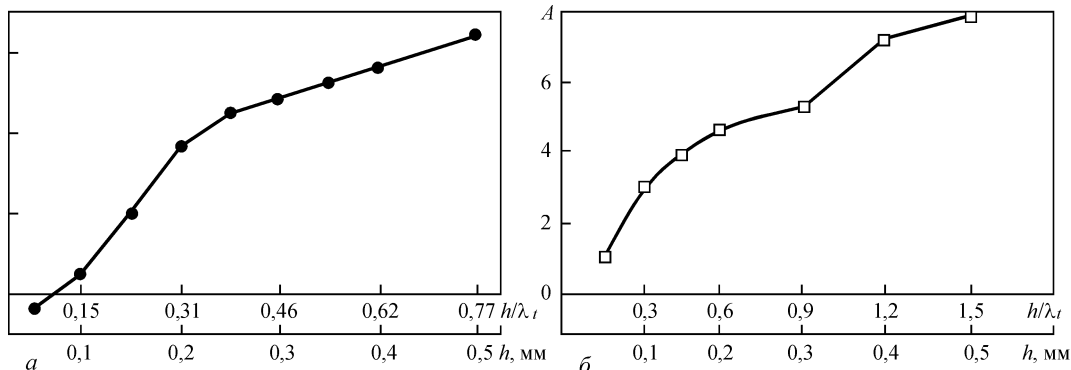


Рис. 6. Залежності амплітуди ехо-сигналу від пази з глибиною, що плавно змінюється

воляючи перебракувати продукцію, що є дуже важливим.

Конусний рефлектор можна використовувати і для виявлення в трубах поперечних дефектів. Вигляд цього рефлектора та його кутові розміри $\gamma = 45^\circ - \beta/2$ наведено на рис. 7.

Налаштування перетворювача треба вести у тій площині, де знаходиться і вісь труби. У цьому положенні ведеться і контроль труб, тобто без зміщення перетворювача вгору/вниз. Для полегшення налаштування перетворювача у СЗ треба виготовити допоміжний поперечний паз по всьому периметру труби. Глибина його може бути в 1,5...2,0 рази більша за нормативну. А налаштувати чутливість дефектоскопа та перевіряти її в динамічному режимі треба за нормативним від-

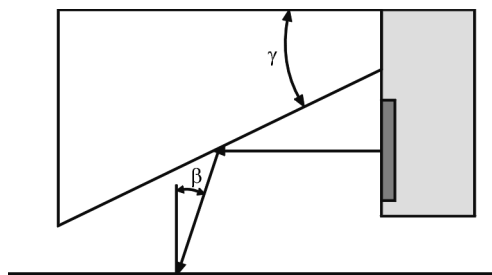


Рис. 7. Конусний рефлектор

бивачем. Ці відбивачі на СЗ повинні бути рознесені так, щоби можна було об'єктивно виконати перевірку налаштування установки у динамічному режимі.

Таким чином, при контролі труб пропонується використовувати дугоподібні ПЕП-и необхідних розмірів і частот.

В.С. Загоруйко

ДП «Науково-дослідний і проектно-технологічний інститут трубно-промислової ім. Я.Є. Осади» (м. Дніпро)

ПЕРЕДПЛАТА 2023

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	280	840	1680	3360
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	—	280	560	1120
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	—	280	560	1120
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	560	1680	3360	6720

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

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

Передплата на електронну версію журналів.

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

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>
 На сайті видавництва у 2022 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2020 рр.

ВИДАВНИЦТВО
 Міжнародна Асоціація «Зварювання»
 03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
 Тел./факс: 38044 205-23-90
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

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

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

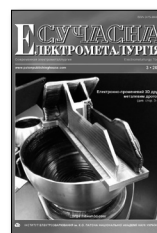
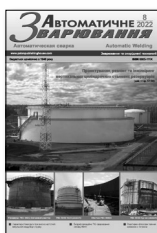
Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм. А5 – 185x130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

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

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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



ДАТИ, ПОДІЇ, ФАКТИ З ІСТОРІЇ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

(календар III кв.)

4 липня 1687 р. опубліковано першу фундаментальну працю І. Ньютона «Прінципа». Сер Ісаак Ньютон (1643-1727 рр.) – англійський науковець, який заклав основи сучасного природознавства, творець класичної фізики. Сформулював закони руху, відомі як закони Ньютона, та закон всесвітнього тяжіння, розвинув теорію кольору на основі спостережень розщеплення білого світла в спектр в оптичній призмі, сформулював емпіричний закон теплообміну. Його роботи стали основою наукового світогляду впродовж трьох наступних століть і мали великий вплив не тільки на фізику, а й на філософію.



12 липня 1937 р. народився Михайло Львович Жадкевич (1937-2021 рр.) – відомий представник Патонівської школи, чл.-кор. НАНУ. З 1984 р. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона – головний інженер, директор Дослідного заводу спеціальної електрометалургії, займався створенням промислових технологій електрошлакового лиття заготовок деталей для машинобудування, електронно-променевого напilenня захисних покриттів на лопаті газотурбоагрегатів, електронно-променевого зварювання виробів нової техніки для оборонної, суднобудівної та енергетичної галузей промисловості. З 1993 по 2007 рр. – заступник директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Зробив великий внесок у розв'язання питань підвищення економічної ефективності в діяльності підрозділів ІЕЗ.



12 липня 1929 р. відбувся перший в історії авіації політ гігантського літаючого човна «Дорньє До-Х». Літак призначався для експлуатації на далеких пасажирських авіалініях. Пізніше, 20 жовтня, в ході 40-хвилинного демонстраційного польоту цей літак злетів з Боденського озера з 169 пасажирами на борту. Цей рекорд залишився неперевершеним в першій половині XX століття. Через невисокі льотні характеристики літак на лінії не вийшов, лише зробив в 1930-1932 рр. кілька демонстраційних польотів в Африку, Північну і Південну Америку. Для економії ваги для з'єднання алюмінієвих деталей використовували зварювання. Також виконано великий об'єм випробувань алюмінієвих сплавів та їх з'єднань.



14 липня 1969 р. відбувся спуск під воду підводного апарату, призначеного для дослідження середніх глибин Гольфстріму (до 1000 м), мезоскафа «Бен Франклін», сконструйованого Жаком Пікаром. Особлива увага приділялася зварним швам. Перш ніж було дозволено використання апарату, було проведено численні перевірки та експертизи. Для зварювання використовувалися електроди, леговані марганцем та молібденом.



15 липня 2010 р. підготовлено до видання книгу «Патонівська школа». У ній представлено інформацію про всесвітньо відому патонівську науково-інженерну школу в галузі зварювання та споріднених технологій, яка була створена видатним ученим академіком Є.О. Патоном та розвинена гідним продовжувачем його справи академіком Б.Є. Патоном. Висвітлено становлення та розвиток цієї школи, наведено відомості про її відомих представників.



16 липня 1969 р. в США запущено «Аполлон-11», перший космічний корабель, завданням якого було доставити людей на Місяць. Він стартував з космодрому на мисі Канаверал (Флорида) і, подолавши 384 тис. км за 76 год, 19 липня увійшов у навколомісячну орбіту. Сучасні зварювальні технології та методи неруйнівного контролю забезпечили якісне з'єднання деталей та частин корабля.



17 липня 1964 р. Постановою РМ УРСР від 12.06.1964 р. № 595 та Постановою Президії АН УРСР від 17.07.1964 р. № 188 засновано премію ім. Є.О. Патона НАН України за видатні наукові роботи в галузі створення нових металевих матеріалів та методів їх обробки. Це один із небагатьох прикладів, коли премію названо на честь вченого-зварювальника.



18 липня 1853 р. народився Гендрік Антон Лоренц (1853-1928 рр.), нідерландський фізик, лауреат Нобелівської премії з фізики (1902 р.). Розвинув електромагнітну теорію світла та електронну теорію матерії, а також сформулював самоузгоджену теорію електрики, магнетизму та світла. З його іменем пов'язана сила Лоренца (сила, що діє на заряд, рухомий в магнітному полі). Перетворення Лоренца є найважливішим внеском у розвиток теорії відносності.



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



24 липня 1967 р. відбулося відкриття Арки в Сент-Луїсі, також відомої під назвою «Ворота на захід» – меморіалу, що є частиною Джефферсонівського національного експансійного меморіалу, а також візитною карткою Сент-Луїса. Її висота 192 м в найвищій точці, ширина її основи також 192 м. Арка є найвищим пам'ятником на території США. Будівельники разом з компанією «Lincoln Electric» успішно виготовили і з'єднали 142 частини однієї з найскладніших будівельних споруд в історії США. При спорудженні використовувалося ручне зварювання, напівавтоматичне зварювання в середовищі захисних газів (для з'єднання зовнішньої поверхні з нержавіючої сталі), а також зварювання під флюсом. Розрахунки металоконструкцій та випробування зразків виконувалося в лабораторіях провідних університетів США.



25 липня 1984 р. у відкритому космосі за бортом орбітальної станції «Салют-7» було проведено експерименти з електронно-променевого зварювання за допомогою зварювального апарату УРІ (універсальний ручний інструмент), розробленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Цей апарат дозволяв здійснювати зварювання, різання, паяння металу, нанесення покриттів. Космонавти В. Джанібєков та С. Савицька вийшли у відкритий космос для виконання зварювальних технологічних робіт. Протягом трьох з половиною годин космонавти провели весь комплекс запланованих експериментів.



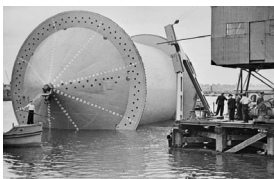
28 липня 1921 р. народився Данило Андрійович Дудко (1921-2009 рр.) – відомий представник Патонівської школи, академік НАНУ. Основні напрямки наукової діяльності – дослідження процесів зварювання під флюсом, проблеми механізації зварювального виробництва, електрошлакове зварювання товстого металу, дослідження металургійних процесів та процесів розплавлення металу і шлаку в зварювальній ванні, розробка техніки та обладнання для зварювання у вуглекислому газі, створення автоматів та напівавтоматів для масового використання у промисловості, технології зварювання у захисних газах, методи плазмодугового зварювання, зокрема мікроплазмодового та інших нових видів плазмодового зварювання.



2 серпня 1930 р. народився Сергій Іванович Кучук-Яценко (1930-2021 рр.) – відомий вчений в галузі зварювання металів тиском, академік НАНУ, представник Патонівської школи, заступник директора з науки ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Фундаментальними дослідженнями вченого є розробки нових способів контактного зварювання постійним, імпульсним і пульсуючим оплавленням, запатентованими в провідних країнах світу. На їх основі С.І. Кучуком-Яценком з колективом співробітників розроблено технологію зварювання різних виробів, системи управління і нові зразки зварювального обладнання, що не мають аналогів у світовій практиці. Ці види контактного зварювання поставили нові завдання перед розробниками методів технічного контролю.



12 серпня 1937 р. народився Віктор Федорович Хорунов (1937-2016 рр.) – чл.-кор. НАНУ, представник Патонівської школи. Основна наукова діяльність В.Ф. Хорунова присвячена дослідженню процесів високо- і низькотемпературного паяння, яке охоплює практично всі конструкційні матеріали, що використовуються в промисловості. Під його керівництвом розроблено наукові основи, припої та технології вакуумного паяння тонкостінних конструкцій з нержавіючих сталей різних класів, для паяння високолегованих нікелевих сплавів, інтерметалідних і дисперсійно-зміцнених сплавів, вуглецевих матеріалів, сплавів на основі титану і алюмінію.



12 серпня 1944 р. у рамках операції Pluto (Pipe-Lines Under the Ocean – трубопроводи під океаном) було прокладено першу підводну нафтопровідну лінію між Францією та Великобританією. Трубопровід був гнучкою сталевією трубою, звареною з 20-футових секцій загальною довжиною в 4000 футів (1220 м). Ця операція розглядається як один з найбільших подвигів в історії військової техніки. Усього до кінця війни дном протоки між Великобританією та Францією було перекачано майже 800 тис. м³ палива.



24 серпня 1939 р. народився Георгій Михайлович Григоренко (1939-2019 рр.) – академік НАНУ, представник Патонівської школи. Брав безпосередню участь у розробці нових методів, обладнання та технології плазмодугового, дугошлакового переплавів, електрошлакової технології, індукційної виплавки з комбінованими джерелами нагріву та у водоохолоджуваніх секційних кристалізаторах. Вперше проаналізував та класифікував газообмінні процеси в електрометалургії при плавці та переплаві. Створив центр фізико-хімічних досліджень матеріалів, який не має аналогів в Україні.

28 серпня 1999 р. офіційно відкрито вежі Петронас – близнюки-хмарочоси в Куала-Лумпурі (Малайзія). Кожна вежа заввишки 375 м (зі шпилем — 451,9 м) має 88 поверхів. Будівництво унікальної зварної конструкції було розпочато в 1995 р. і завершено у 1998 р. Нині Петронас Тауерс – найвищі вежі-близнюки у світі. Одним з найскладніших процесів будівництва веж було встановлення мосту, що з'єднує їх. Він розташований між вежами на 41 та 42 поверхах, має 58 м у довжину. Унікальним є 150-метровий фундамент веж (найглибший на планеті). Загальний об'єм залитого в фундамент бетону склав 13 тис. м³. На будівництво хмарочоса пішло майже 37 тис. тонн сталі.



30 серпня 1993 р. на Ейфелеву вежу піднявся 150-мільйоний відвідувач. Ейфелева вежа – найвідоміша вежа, символ сучасної Франції. Популярний туристичний об'єкт щорічно приймає понад 6 мільйонів відвідувачів. Будівельні роботи виконували 300 робітників протягом двох років з січня 1887 р. по березень 1889 р. Рекордним строкам зведення сприяли креслення надзвичайно високої якості з точними розмірами 18038 металевих деталей, для скріплення яких використали 2,5 млн. заклепок. Вежа була зведена як тимчасова споруда для ознаменування сторіччя з дня початку Французької революції та до відкриття паризької Всесвітньої виставки 1889 р.



1 вересня 1930 р. почалася Друга світова війна. Підготовка до неї різко вплинула на застосування електрозварювання в авіаційній і особливо в суднобудівній промисловості. При виробництві всіх видів зброї переходили на з'єднання зварюванням для економії часу. Німеччина також, щоб обійти мирні угоди, почала використовувати в оборонній промисловості зварні з'єднання. Слідом за нею Великобританія також стала широко впроваджувати зварювання. Ряд технологій, таких як підводне зварювання та методи неруйнівного контролю, отримали в цей час широкий розвиток.



7 вересня 1997 р. відбувся перший політ F-22 «Рептор» – американського багатоцільового винищувача п'ятого покоління, розробленого компаніями «Lockheed Martin», «Boeing» і «General Dynamics». Новий винищувач було розроблено з використанням передової авіоніки, нових двигунів з цифровим керуванням, а також він був малопомітним для радарів. При створенні літака використовували унікальний комплекс електронно-променевого зварювання, сучасний випробувальний комплекс, що включав застосування комп'ютерної томографії, акустичні, електромагнітні, капілярні та інші методи неруйнівного контролю.



10 вересня 1892 р. народився Артур Комптон (1892-1962 рр.) – американський фізик. Займався вивченням рентгенівського випромінювання. У 1922 р. виявив і надав теоретичне обґрунтування ефекту зміни довжини хвилі рентгенівського випромінювання унаслідок розсіяння його електронами речовини, чим довів існування фотона. За це відкриття Комптон був нагороджений Нобелівською премією (1927 р.), а відкрите явище отримало назву ефекту Комптона. З 1941 р. Комптон був головою Уранового комітету S-1, який був відповідальний за дослідження властивостей і виробництва урану. У 1942 р. Комптон призначив Роберта Опленгеймера головним теоретиком комітету. Влітку 1942 р. робота комітету була підпорядкована армії США та стала Мангеттенським проектом.



10 – 14 вересня 2018 р. вперше в м. Одеса відбулась конференція «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики». Фактично це було відновлення конференцій, які з 1993 по 2014 рр., тобто до окупації Криму, проводились в Ялті. Ініціатором цих зустрічей фахівців з 1993 р. було Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики та Український інформаційний центр «Наука. Техніка. Технологія». З 2018 р. до організації конференцій долучились ІЕЗ ім. Є.О. Патона та Міжнародна Асоціація «Зварювання».



20 вересня 1934 р. народився Анатолій Якович Недосєка – відомий представник Патонівської школи, завідувач відділу ІЕЗ ім. Є.О. Патона, д.т.н. Основні напрямки наукової діяльності – технічна діагностика і прогнозування залишкового ресурсу зварних з'єднань, матеріалів, покриттів та конструкцій у процесі їх експлуатації на основі акустичної емісії. А.Я. Недосєка є заступником головного редактора журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».





21 вересня 1942 р. відбувся перший політ Boeing B-29 Superfortress (Боїнг В-29 «Суперфортеця») – стратегічного бомбардувальника США, розробленого на початку 1940-х рр. Вважається найкращим стратегічним бомбардувальником часів Другої світової війни. В-29 став широко відомим у світі завдяки проведенню у серпні 1945 р. літаками цього типу атомних бомбардувань японських міст Хіросіма і Нагасакі. Дальність польоту літак понад 6000 км, максимальна швидкість понад 600 км/год., висота польоту біля 10000 м, бойове навантаження 9000 кг. Всього виготовлено понад 4000 машин. Три В-29 здійснили вимушену посадку на території СРСР, де були інтерновані та використані для створення Ту-4.



22 вересня 1791 р. народився Майкл Фарадей (1791-1867 рр.) – англійський фізик-експериментатор і хімік, член Лондонського королівського товариства (1824 р.) та безлічі інших наукових організацій. У 1831 р. Фарадей винайшов явище електромагнітної індукції, що лежить в основі сучасного промислового виробництва електрики. Створив першу модель електродвигуна. Серед інших його відкриттів – перший трансформатор, хімічна дія струму, закони електролізу, дія магнітного поля світла, діамagnetизм. Першим передбачив електромагнітні хвилі. Фарадей ввів у наукове застосування терміни іон, катод, анод, електроліт, діелектрик, діамagnetизм, парамагнетизм та інші. Фарадей – основоположник вчення про електромагнітне поле, яке потім математично оформив і розвинув Максвелл.



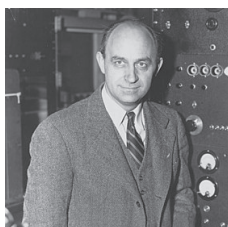
24 вересня 1960 р. у Ньюпорт-Ньюс (Вірджинія, США) спущено на воду перший атомний авіаносець «Ентерпрайз». Він мав найбільшу (342,3 м) довжину серед бойових кораблів світу. Одного завантаження ядерним паливом вистачало на 13 років служби, за цей час корабель міг пройти до 1 млн. миль. «Ентерпрайз» був єдиним авіаносцем з більш ніж 2-ма ядерними реакторами – він мав на борту 8 реакторів типу A2W. Додатковим нововведенням на «Ентерпрайз» була радарна система, заснована на фазованій антенній решітці, яка має перевагу над традиційними радарними антенами, яка обертається. Для захисту авіаносця було побудовано дві серії атомних ракетних крейсерів: класів «California» і «Virginia». У 2012 р. авіаносець завершив свій останній похід.



27 вересня 1918 р. народився Володимир Іванович Труфяков (1918-2001 рр.) – відомий представник Патонівської школи, чл.-кор. НАНУ. Під час перебування В.І. Труфякова на посту завідувача відділу міцності зварних конструкцій ІЄЗ ім. Є.О. Патона було створено один з найбільших в УРСР за кількістю і потужністю механічного устаткування випробувальний комплекс (максимальне зусилля досягало 800 т) та організовано цілеспрямовані широкомасштабні дослідження несучої здатності матеріалів і зварних з'єднань під впливом статичних, змінних і ударних навантажень.



27 вересня 1908 р. на заводі Пикетт в Детройті, штат Мічиган, побудовано перший екземпляр «Ford Model T», також відомий як «Жестянка Ліззі» – автомобіль, що випускався «Ford Motor Company» з 1908 по 1927 рр. Був першим у світі автомобілем, що випускався мільйонними серіями. Генрі Форд, на думку багатьох, «посадив Америку на колеса», зробивши новий легковий автомобіль порівняно доступним для американців середнього класу. Це стало можливим завдяки таким нововведенням, як застосування конвеєра замість індивідуальної ручної збірки, а також впровадження ряду нових технологій для з'єднання деталей і вузлів автомобіля. Зокрема при виробництві на конвеєрі використовувалося контактне та автогенне зварювання.



29 вересня 1901 р. народився Енріко Фермі (1901-1954 рр.) – італійський фізик, відомий своїми працями в галузі ядерної, квантової і статистичної фізики. Серед його досягнень – відкриття ядерних реакцій, що відбуваються при бомбардуванні речовини нейтронами, у результаті яких народжуються нові радіоактивні елементи. До його робіт належать: вивчення слабкої взаємодії, однієї з фундаментальних взаємодій, і роботи з квантової статистики ферміонів (разом з Полем Діраком). Лауреат Нобелівської премії з фізики (1938 р.). Емігрувавши до США, Фермі був провідним учасником Мангеттенського проекту.



29 вересня 1940 р. народився Леонід Михайлович Лобанов – відомий вітчизняний вчений, представник Патонівської школи, академік НАНУ, заступник директора ІЄЗ ім. Є.О. Патона, головний редактор журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль». Наукова діяльність Л.М. Лобанова пов'язана з дослідженнями поведінки матеріалів при зварюванні, розробкою методів дослідження та регулювання зварювальних напружень і деформацій, створенням високоефективних зварних конструкцій нової техніки та розробкою методів і засобів їх діагностики. Широке визнання отримали його праці, присвячені методам оптичного моделювання, голографії, електронної спекл-інтерферометрії та широкофокусної для оцінки напруженого стану та контролю якості зварних з'єднань.