

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, м. Київ:

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, О.С. Міленін, С.А. Недосєка,

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар);

В.П. Бабак (заст. гол. ред.)

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.Л. Казакевич

ІФХ ім. Л.В. Писаржевського НАН України, м. Київ;

О.М. Карпаш

Харківський нац. ун-т Повітряних Сил імені Івана

Кожедуба, м. Івано-Франківськ

Й. Мірчев

Інститут механіки, Софія, Болгарія;

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук,

В.М. Учанін (заст. гол. ред.)

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

В.С. Єременко, Ю.В. Куц, А.Г. Протасов

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХПІ», м. Харків;

М.Г. Чаусов

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий редактор – О.Т. Зельніченко,

Міжнародна Асоціація «Зварювання», м. Київ

Видавець

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

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

Журнал входить до переліку затверджених МОН

України видань для публікації праць здобувачів

наукових ступенів за спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу.

ISSN 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print

Doi.org/10.37434/tdnk

Журнал зареєстровано Національною радою України з

питань телебачення і радіомовлення 09.05.2024,

ідентифікатор медіа R30-04568.

Передплата 2025

Передплатний індекс 74475. 4 випуски на рік (видається

щоквартально). Друкована версія/електронна версія:

1200 грн. за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів видавець журналу

відповідальності не несе.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Рибіцький І.В., Карпаш О.М., Запека В.Ю., Райтер П.М., Яворський А.В., Чабан Н.І. Обґрунтування нових діагностичних параметрів ефективності роботи трубопровідних систем 3

Tugui C.A., SAVIN A., UCHANIN V.M. Evaluation of microscopic defects in hydraulic turbine blade coatings 10

Безвесільна О.М., Толочко Т.О. Розробка алгоритмічного методу ідентифікації вектора стану чутливого елемента 16

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю., Кальницький М.Е., Кошкарів Ю.Ю., Олексенко І.М. Електромагнітно-акустичний перетворювач із комбінованим намагнічуванням 22

Казакевич М.Л., Семенець О.І., Казакевич В.М. Багатошарові композитні електронагрівальні елементи системи запобігання зледенінню літака 27

Захаров Л.С., Гаєрик А.Р. Малогабаритна технологічна проба для оцінки схильності металу швів до утворення холодних тріщин 31

Посипайко Ю.М., Щупак С.О. Аналіз вимог міжнародних стандартів щодо технологій капілярного контролю металопродукції 37

ІНФОРМАЦІЯ

Ю.М. Посипайку – 75! 47

П.М. Райтеру – 60! 48

Новини Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики 49

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

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv:
L.M. LOBANOV (Editor-in-Chief),
V.O. Troitskyi (Deputy Editor-in-Chief),
Ie.O. Davydov, O.S. Milenin, S.A. Nedoseka, Yu.M. Posypaiko,
I.Yu. Romanova (execut. secretary);
V.P. Babak (Deputy Editor-in-Chief)
General Energy Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv
Krzysztof Dragan,
Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland;
Janez Grum,
University of Ljubljana, Slovenia;
M.L. Kazakevich,
L.V. Pizarzhetskii Institute of Physical Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv;
O.M. Karpash
Ivan Kozhedub National University of the Air Force, Ivano-Frankivsk, Ukraine
Yordan Mirchev
Institute of Mechanics, Sofia, Bulgaria;
L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk,
V.M. Uchanin (Deputy Editor-in-Chief)
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv;
V.S. Eremenko, Yu.V. Kuts, A.G. Protasov
NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine;
P.M. Raiter
Ivano-Frankivsk NTU of Oil and Gas, Ukraine;
Adriana Savin
National Institute of R&D for Technical Physics, Iasi, Romania;
V.O. Storozhenko
Kharkiv NU of Radio Electronics, Ukraine;
H.M. Suchkov
NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;
M.G. Chausov
NU of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv.
Executive Editor – O.T. Zelnichenko,
International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Publisher

International Association «Welding»

Address of Editorial Office

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.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal.
ISSN 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print
Doi.org/10.37434/tdnk

The Journal was registered by the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting on 09.05.2024, carrier identifier R30-04568.

Subscription 2025

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.

Publisher is not responsible for the content of the promotional material.

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Rybityskiy I.V., Karpash O.M., Zapeka V.Yu., Reiter P.M., Yavorskyi A.V., Chaban N.I. Substantiation of new diagnostic parameters of pipeline systems efficiency 3

Tugui C.A., Savin A., Uchanin V.M. Evaluation of microscopic defects in hydraulic turbine blade coatings 10

Bezvesilna O.M., Tolochko T.O. Development of an algorithmical method for identification of the state vector of a sensitive element 16

INDUSTRIAL

Suchkov H.M., Plietnetsov S.Yu., Kalnitskyi M.Ye., Koshkarov Yu.Yu., Oleksenko I.M. Electromagnetic-acoustic converter with combined magnetization 22

Kazakevych M.L., Semenets O.I., Kazakevych V.M. Multi-layer composite electric heating elements of the aircraft icing prevention system 27

Zakharov L.S., Havryk A.R. Development of a simplified process test for the evaluation of cold crack formation in welded joints 31

Posypaiko Yu.M., Shchupak S.A. Analysis of the requirements of international standards regarding capillary control technologies for metal production 37

INFORMATION

Yu.M. Posypaiko is 75! 47

P.M. Raiter is 60! 48

News of the Ukrainian society for non-destructive testing 49

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»

ОБҐРУНТУВАННЯ НОВИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

І.В. Рибіцький¹, О.М. Карпаш², В.Ю. Запека², П.М. Райтер¹, А.В. Яворський¹, Н.І. Чабан³

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15. E-mail: admin@nung.edu.ua

²Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. E-mail: info@hups.mil.gov.ua

³Університет Короля Данила. 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Євгена Коновальця, 35. E-mail: university@ukd.edu.ua

Однією з основних задач технічної діагностики трубопровідних систем є забезпечення їх надійного та водночас енергоефективного функціонування. У роботі здійснено пошук та розроблення основ для побудови математичних моделей нових інформативних параметрів діагностики технічного стану та ефективності роботи трубопровідних систем. Показано, що пропускна здатність трубопроводу зменшується при набутті еліптичної конфігурації її перерізу. Обґрунтовано, що наявність малих витоків у трубопровідних системах спричиняє втрату стійкості течії в трубопроводі, виникнення зон турбулентної течії, внаслідок чого зменшується ефективність роботи трубопроводу. Бібліогр. 11, рис. 3.

Ключові слова: технічна діагностика, інформативні параметри, енергоефективність, трубопровідні системи, математична модель

Вступ. Технічний стан трубопровідної системи транспортування нафти, газу та нафтопродуктів, дотримання параметрів їх експлуатації у встановлених межах та ефективності роботи системи трубопроводів в цілому безпосередньо впливають на безперебійне та надійне постачання вуглеводнів споживачам.

Проблематика, яка пропонується до вирішення в даній роботі, полягає в спробі виявити нові діагностичні параметри, а також у розробці основ для побудови математичних моделей та методик для оцінки впливу змін цих параметрів на технічний стан та енергоефективність трубопровідних систем. До таких параметрів, які пропонується використовувати, можна віднести: геометричні параметри (товщина стінки, діаметр і форма поперечного перерізу трубопроводу), фізико-хімічні параметри транспортованого продукту (в'язкість, густина, температура), гідродинамічні параметри (тиск, швидкість течії, об'ємна витрата) і параметри, пов'язані з дефектами (витоки, тріщини, деформації, корозійні чи ерозійні пошкодження).

До параметрів, які змінюються мало, але при цьому впливають на ефективність роботи трубопровідних систем, слід віднести малі витоки, зміну фізико-хімічних характеристик продуктів, що транспортуються, а також зміну геометрії поперечного перерізу трубопроводу – його овалізацію або зменшення внутрішнього радіусу внаслідок відкладання важких домішок та конденсату в порожнині трубопроводу [1].

Дефекти такого роду визначаються експериментальними методами, проте дедалі більшого значення набуває використання методів математичного моделювання явищ такого характеру, зокрема, через складність реалізації апаратних засобів, що пов'язано з важкодоступністю поверхонь для реалізації контактних методів дослідження та значним обсягом необхідних робіт.

Окрім того, однією з основних задач технічної діагностики трубопровідних систем є забезпечення їх надійного та водночас енергоефективного функціонування. Таким чином, пошук нових інформативних параметрів діагностики технічного стану та ефективності роботи трубопровідних систем із розробленням відповідних математичних моделей є актуальною задачею.

Методика досліджень. Задача технічної діагностики та енергоефективності роботи трубопровідних систем може бути зведена до задачі моделювання течії вуглеводнів у трубопроводі з наявними змінами форми його поперечного перерізу, наявністю відкладень на внутрішній поверхні трубопроводу, витоками продукту та зміною фізико-хімічних характеристик самого продукту, що транспортується, для розроблення методик та ідентифікації дефектів, виявлення нових інформативних параметрів та меж застосування моделей. При дослідженні технічного стану складних систем, що тривалий час експлуатуються, зокрема, в задачах їх технічної діагностики, часто зустрічаються випадки, коли виникнення аварійних ситуа-

І.В. Рибіцький – <https://orcid.org/0000-0003-3596-3918>, О.М. Карпаш – <https://orcid.org/0000-0002-9240-1623>, В.Ю. Запека – <https://orcid.org/0000-0003-3143-6600>, П.М. Райтер – <https://orcid.org/0000-0002-3437-2844>, А.В. Яворський – <https://orcid.org/0000-0002-5970-4286>, Н.І. Чабан – <https://orcid.org/0009-0009-5839-5328>
 © І.В. Рибіцький, О.М. Карпаш, В.Ю. Запека, П.М. Райтер, А.В. Яворський, Н.І. Чабан, 2025

цій обумовлене наявністю малих збурень та змін, що діють на систему [2].

Розглянемо задачу оцінки впливу зміни геометричних характеристик перерізу трубопроводу та властивостей речовини, що транспортується, на технічний стан та енергоефективність трубопроводної системи. У допущенні, що труба має круглий поперечний переріз, а рідина (нафта чи нафтопродукти) рухається під дією сталого перепаду тиску по довжині труби, профіль швидкості визначається за формулою Пуазейля [3, 4]:

$$w = \frac{i}{4\mu}(a^2 - r^2) \quad (1)$$

де w – повздовжня швидкість течії в'язкої рідини; μ – в'язкість рідини; a – радіус труби, в якій тече рідина; i – питомий перепад тиску на одиницю довжини труби; r – радіальна координата. При цьому профіль швидкості рідини являє собою параболоїд обертання.

Обчислена за (1) об'ємна витрата рідини визначається за формулою:

$$Q = \int_0^a w 2\pi r dr = \frac{i\pi a^4}{8\mu}, \quad (2)$$

при цьому слід зазначити, що об'ємна витрата значно залежить від радіусу труби і є пропорційною четвертому ступеню її радіуса. Аналізуючи (1) і (2), можна зробити наступні висновки: при зміні радіусу труби, який може мати місце при відкладенні осадів на її внутрішній стінці, як було зазначено в [1], найбільше на неї реагує об'ємна витрата. Нехай a_1 – проектний радіус трубопроводу, a_2 – радіус після його тривалої експлуатації, $a_1 > a_2$, тоді в кожній точці $r = r_1$ перепад швидкості Δw буде дорівнювати:

$$\Delta w = \frac{i}{4\mu}(a_1^2 - a_2^2) \quad (3)$$

При цьому виникає дефіцит в пропускній здатності, яка може бути оцінена з використанням (2) наступним чином:

$$\Delta Q = \frac{i\pi}{8\mu}(a_1^4 - a_2^4). \quad (3)$$

Перетворенням (3) значення ΔQ можна подати у вигляді:

$$\Delta Q \approx \frac{i\pi}{8\mu} \cdot 4R^3 \Delta\delta, \quad (4)$$

де $\Delta\delta$ – зміна радіусу поперечного перерізу.

Для компенсації такої недостачі рідини, що транспортується, необхідно збільшити відносний перепад тиску, який може бути визначений зі співвідношення:

$$i_1 = \frac{i(R - 4\Delta\delta) \cdot R^3}{(R - \Delta\delta)^4}. \quad (5)$$

Очевидно, що $i_1 > i$. При цьому слід зазначити, що збільшення перепаду тиску зменшує енергоефективність роботи трубопроводної системи.

Іншим важливим моментом і можливим інформативним параметром є в'язкість речовини, що транспортується. Якщо в початковий момент часу динамічна в'язкість рідини складає μ_1 , а в певний момент часу вона зростає до значення μ_2 , то з урахуванням (1) і (2) отримаємо:

$$\Delta w = \frac{i}{4\mu_1}(a^2 - r^2) - \frac{i}{4\mu_2}(a^2 - r^2) = \frac{i}{4} \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2\mu_1}(a^2 - r^2), \quad (6)$$

$$\Delta Q = \frac{i\pi a^4}{8\mu_1} - \frac{i\pi a^4}{8\mu_2} = \frac{i\pi a^4}{8} \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2\mu_1}. \quad (7)$$

Для компенсації цієї неоднозначності продукту по аналогії з (5) можна отримати необхідне для компенсації недостачі значення певного перепаду тиску:

$$\frac{i_1\pi a^4}{8\mu_2} = \frac{i\pi a^4}{8\mu_1} - \frac{i\pi a^4}{8} \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2\mu_1}, \quad (8)$$

$$\frac{i_1}{\mu_2} = \frac{i}{\mu_1} - i \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2\mu_1}. \quad (9)$$

$$\frac{i_1}{\mu_2} = \frac{i(\mu_2 - \mu_2 + \mu_1)}{\mu_2\mu_1} = \frac{i}{\mu_1}. \quad (10)$$

Остаточно після проведення перетворення отримуємо:

$$i_1 = i \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (11)$$

Очевидно, що $i_1 > i$, бо $\mu_2/\mu_1 > 1$. Знову ж таки, як бачимо з вищеведеного, підвищення перепаду тиску по довжині трубопроводу веде до зменшення енергетичної ефективності трубопроводної системи.

Окрім того, аналізуючи рівняння (1) і (2) та здійснивши деякі перетворення, можна одержати узагальнену формулу для перепаду швидкості:

$$\Delta w = \frac{a^2 - r^2}{4\mu} \delta i - \frac{i}{4\mu^2}(a^2 - r^2) \delta\mu + \frac{i}{4\mu} 2a\delta a \quad (12)$$

де δa , δi , $\delta\mu$ – варіації відповідних величин.

Аналогічно можемо отримати узагальнене рівняння для дефіциту пропускної здатності:

$$\Delta Q = \frac{\pi a^4}{8\mu} \delta i - \frac{i\pi a^4}{8\mu^2} \delta\mu + \frac{i\pi 4a^3}{8\mu} \delta a \quad (13)$$

Формули (12) і (13) дозволяють оцінювати недостатню кількість (об'єм) протікання вуглеводнів у тих випадках, коли однозначно визначаються недостатній відносний перепад тиску та зміна геометрії перерізу трубопроводу внаслідок відкладення технологічних речовин на його стінках і зміни в'язкості рідини.

Також часто зустрічаються випадки коли, при дослідженні реальної геометрії трубопроводних систем виявляється, що переріз трубопроводу набуває форму еліпса. Це обумовлюється дією рідинно-силових факторів (дія згинального моменту при зсувах, технологічні дефекти), що веде до виникнення додаткових напружень у матеріалі трубопроводу і може призвести до руйнування окремих його ділянок.

Аналізуючи задачу течії рідини по трубі, що в перерізі має форму еліпса, можна прийти до висновку, що формули (1) і (2) можуть бути записані у наступному вигляді [3].

Для профілю швидкості:

$$w(y, z) = A \left(1 - \frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} \right), \quad (14)$$

$$A = \frac{i}{2\mu} \frac{a^2 b^2}{a^2 + b^2}. \quad (15)$$

Для об'ємної витрати:

$$Q = \iint_G w \, dy \, dz = \frac{\pi i}{4\mu} \frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2}, \quad (16)$$

де константи a (велика піввісь) та b (мала піввісь) кривої еліпса $\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$, який моделює деформований переріз.

Розглянемо функцію:

$$f(x, y) = \frac{x^3 y^3}{x^2 + y^2} \quad (17)$$

як функцію двох змінних і проведемо її дослідження на екстремум. Із системи рівнянь (18) можна показати, що вказана функція має критичні точки: $x = 0$; $y = 0$; $x = -y$; $x = y$:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} = 0 = -\frac{x^3 y^3 \cdot 2x}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{3x^2 y^3}{x^2 + y^2} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y} = 0 = -\frac{x^3 y^3 \cdot 2y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{3x^3 y^2}{x^2 + y^2} = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

Очевидно, що перші три умови не відповідають фізичним умовам задачі. Отже, функція має окремий екстремум, який досягається при $x = y$ (x, y, z – координати досліджуваної ділянки трубопроводу: поздовжня, поперечна горизонтальна та поперечна вертикальна координата відповідно). Ця умова оз-

начає, що функція (17) у такому випадку набирає екстремального значення. Провівши відповідні математичні перетворення, можна довести, що це головний екстремум, тобто максимум функції.

З практичної точки зору це означає, що пропускна здатність трубопроводу зменшується при набутті еліптичної конфігурації її перерізу, що веде до необхідності підвищення відносного перепаду тиску та призводить до зниження енергоефективності трубопроводної системи [5].

Наступний діагностичний параметр можна отримати при детальному розгляді течії в'язкої рідини в трубопроводах, що містять дефекти стінки труби, зокрема наскрізні отвори, крізь які відбувається відтік продукту. У даному випадку задача технічної діагностики може бути представлена у вигляді задачі моделювання течії з витоками [6].

Дослідження стійкості гідродинамічних процесів у зоні малих витоків є важливим з двох аспектів, що впливають на енергоефективність: оцінка величини втрати вуглеводнів, що транспортуються; вивчення структури течії за наявності малих витоків різної інтенсивності з точки зору виникнення зон турбулентної течії, що може призводити до фактичного зменшення ефективного діаметру трубопроводу [7].

Проведемо математичне моделювання течії технологічної рідини в трубопроводі за наявності витоків різної величини крізь стінку трубопроводу. Для здійснення цього чисельно інтегрується система рівнянь Нав'є-Стокса, досліджуються параметри стійкості чисельних схем, вибираються інформативні параметри для визначення зон впливу витоку та встановлюються межі використання моделі до переходу течії в турбулентний режим.

Течія продуктів у трубопроводах може бути описана з використанням системи рівнянь Нав'є-Стокса, записаної у циліндричній системі координат [8], проте є одна особливість трубопроводних систем з точки зору їх геометрії, зокрема симетричність течії. Локальний характер зони малих витоків дозволяє знизити розмірність задачі та, зокрема, вважати, що розглядається двовимірне течія в'язкої рідини в каналі зі стінкою, в якій присутній витік рідини через поверхню, у припущенні, що течія є стаціонарною. Дане припущення справедливе й зокрема для квазістаціонарних процесів, коли вважається, що характеристики модельованої течії мало змінюються з часом (рис. 1).

У такому випадку система рівнянь Нав'є-Стокса записується у двовимірній області наступним чином:

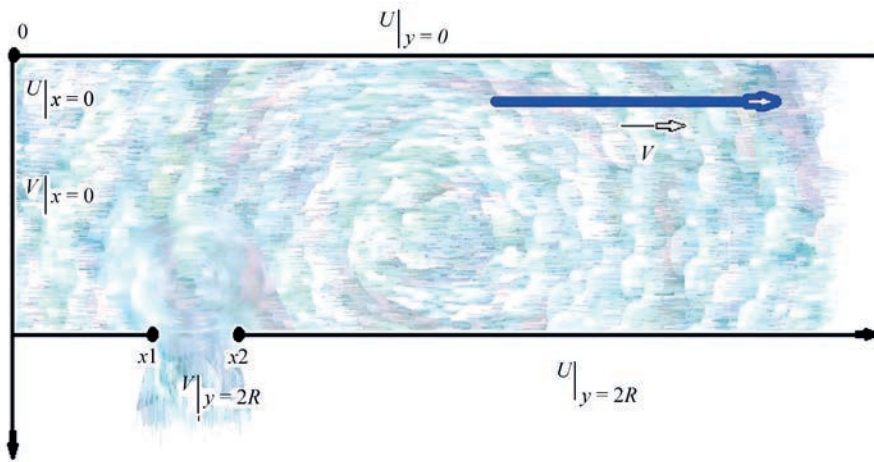


Рис. 1. Схема течії у двовимірному каналі з витоками

$$\begin{cases} U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \\ U \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

де U і V – компоненти вектору швидкості в прямокутній декартовій системі координат; ρ – густина продуктів, що транспортуються; ν – коефіцієнт кінематичної в’язкості; p – тиск рідин.

Граничні умови задаються у вигляді:

$$\begin{cases} U|_{x=0} = -\frac{k \cdot y^2}{4 \cdot \mu} + \frac{k \cdot R_y}{2 \cdot \mu} \\ U|_{y=0} = U|_{y=2R} = 0 \\ V|_{x=0} = V|_{y=0} = 0 \\ V|_{y=2R} = \begin{cases} 0 & x < x_1, x < x_2 \\ V_{leak} & x \in [x_1; x_2] \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

де $[x_1; x_2]$ – зона витоку; μ – динамічна в’язкість продуктів, що транспортуються; R – радіус каналу. Для компоненти швидкості $U|_{x=0}$ вважається, що вона обчислюється як у відомій моделі Пуазейля [9], яка описує стаціонарну течію в’язкої рідини в трубі круглого поперечного перерізу. V_{leak} – швидкість витоку рідини через область. Граничні умови (20) можуть бути іншими в залежності від того, як розташовані зони витоку рідини – якщо вони розташовані на різних границях каналу, то для компоненти швидкості V ненульовими будуть значення швидкості на певних відрізках як при $y = 0$, так і при $y = 2R$. Методика розв’язання вказаної задачі є відомою [9], особливістю при її розв’язанні є наявність розривних граничних умов (20) та відсутність коректних граничних умов для тиску.

Диференціюючи перше з рівнянь системи (19) по змінній x , а друге – по змінній y та беручи до уваги третє рівняння системи (19), одержимо рівняння Пуассона для визначення тиску:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -2 \cdot \rho \left(\frac{\partial V}{\partial x} \cdot \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (21)$$

Подальша схема розв’язку є наступною:

- а) задається деяке початкове наближення тиску $p_0(x, y)$;
- б) за даним розподілом $p_0(x, y)$ розв’язується система (19) з граничними умовами (20);
- в) після знаходження компонент швидкості U і V обчислюються праві частини рівняння (21);
- г) рівняння (21) розв’язується з граничними умовами:

$$p|_{\partial G} = P_0(x, y) \quad (22)$$

- д) після одержання нового розподілу тиску вказаний алгоритм повертається до пункту (а).

До досягнення збіжності ітераційного процесу необхідно дану процедуру повторювати. Система (19) з граничними умовами (20) розв’язується з використанням абсолютно збіжних неявних схем методу змінних напрямків [10], а рівняння (21) – методом послідовної верхньої релаксації. Збіжність і стійкість вказаного ітераційного методу доведено в [11].

Початкове наближення розподілу тиску вибиралось при допущенні про те, що існує лінійний перепад тиску по довжині каналу, яким моделюється труба з витоком:

$$p = p_0 - k \cdot x \quad (23)$$

Використовуючи рівняння (23) для розрахунку поля швидкостей, можна встановити залежності між інтенсивністю витоку і зміною конфігурації течії.

Моделювання течії в трубопроводі з дефектами, через які відбувається відтік рідини, проводиться для наступних параметрів течії, геометрії

труби, властивостей рідин і газів, лінійного перепаду тиску по довжині труби: середня швидкість рідини в трубопроводі – 2..8 м/с; характерна швидкість малого витоку – до 50 см/с; динамічна в'язкість рідини – 0,001 кг/м·с; кінематична в'язкість – 0,000001 м²/с; характеристика перепаду тиску $K = 0,064...0,096$; крок за поздовжньою координатою – 0,08 м; крок за поперечною координатою – 0,025 м, що відповідає трубопроводу діаметром 1,25 м при 50-ти контрольних точках за поперечною координатою; кількість кроків за поздовжньою координатою – 90000, що дозволяє провести розрахунок поля швидкостей для труби завдовжки 7,2 км з кроком 8 см.

Аналізуючи поведінку поздовжньої компоненти швидкості в пристінковій зоні, можна відмітити закономірність, яка залежить від швидкості витоку: чим більша швидкість витоку, тим скоріше відбувається порушення монотонності поля швидкостей на стороні витоку (рис. 2). Крім того, виявлено наступну закономірність: порушення монотонності, яке може бути визначене як різниця швидкості у двох точках сітки, що знаходяться найближче до стінки:

$$\Delta V_m = V(N) - V(N - 1), \quad (24)$$

де $N + 1$ – кількість точок розрахункової сітки за поперечною координатою.

Порушення монотонності поля швидкостей відбувається за наступною закономірністю: спочатку відбувається перше порушення монотонності, потім монотонність відновлюється та наступна її втрата веде до втрати стійкості обчислювальним процесом, що схематично зображено на рис. 2.

Точки L_3 і L_1 можуть слугувати реакцією течії на мале збурення, вони відповідають мінімальній відстані, на якій дія збурення вже відчутна, а точки L_4 і L_2 – це точки втрат стійкості різницевої схеми. У

такому випадку точки L_3 і L_1 можуть слугувати діагностичною ознакою, а L_4 і L_2 – ні, причому зміст процесів, що відбуваються після цих точок, може бути наступним: або втрачається стійкість обчислювальної процедури, або ж змінюється фізична картина течії, тобто з ламінарного вона переходить у турбулентний режим і для подальшого опису течії необхідно використовувати інші моделі. З технічної точки зору така поведінка знаходить пояснення у факті того, що при сповільненні рідини по довжині труби необхідно підкачувати її для забезпечення певного тиску, швидкості течії та відповідно заданих об'ємів постачання. Це призводить до зниження енергоефективності трубопровідної системи. Важливим результатом, який наводиться на рис. 2, є те, що при певних значеннях швидкості витоку ($V = 0,05$) втрати монотонності швидкості взагалі не відбувається, тобто течія залишається стійкою до такого збурення швидкості. Отже, чим більша швидкість витоку, тим швидше потік реагує на неї зміною монотонності швидкості в пристінковій зоні.

Провівши відповідні розрахунки, можна показати, що при значеннях швидкостей витоку ($V = 0,05...0,15$) течія зберігає стійкість, тобто має місце як стійкість гідродинамічного процесу так і стійкість чисельної схеми. Проте при зростанні швидкості витоку картина розподілу градієнта поздовжньої компоненти швидкості в пристінковій зоні при різних швидкостях витоку набуває іншого характеру. Зокрема стійкість течії втрачається, що можна пояснити виникненням турбулентних ефектів течії та можливою втратою стійкості різницевого методу.

Розроблена модель та чисельна схема її реалізації може бути використана при діагностуванні малих витоків, які розташовані на певній відстані один від одного.

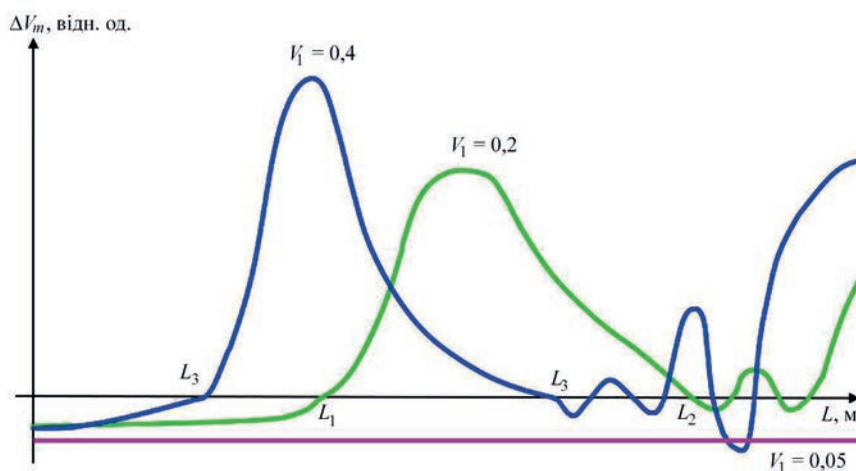


Рис. 2. Залежність між поздовжньою компонентою швидкості ΔV_m та відстанню від дефекту при різних модельних значеннях швидкості витоку, наведеною в умовних одиницях

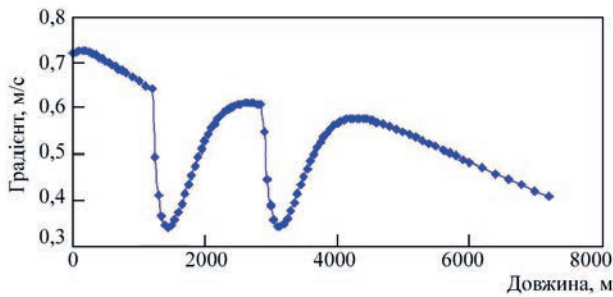


Рис. 3. Залежність між градієнтом поздовжньої компоненти швидкості та наявністю витоку. Координати витоку $x = 1,2$ та $x = 2,88$ км

За результатами чисельного моделювання течії рідини по каналу з її витоками через поверхню встановлено спосіб оцінки координати точки витоку та її залежність від швидкості витоку. Підтверджено, що задачі технічної діагностики систем різного призначення з математичної точки зору є задачами дослідження стійкості відповідних процесів і чисельних схем реалізації моделей таких процесів.

Висновки

У результаті проведених досліджень було запропоновано враховувати нові інформативні параметри (геометричні, фізико-хімічні, гідродинамічні, дефектоскопічні) при оцінці фактичного технічного стану та ефективності роботи трубопровідних систем, а саме:

1. Зміна поперечного перерізу трубопровідної системи за рахунок відкладень технологічних речовин, зміни динамічної в'язкості речовини, що транспортується, та питомого перепаду тиску веде до виникнення додаткових напружень у матеріалі трубопроводу та навіть набуття перерізом трубопровідної системи еліптичної конфігурації, що може призвести до руйнування окремих ділянок трубопроводу.

2. Наявність малих витоку в стінці трубопроводу, які утворюються внаслідок корозії, дефектів матеріалу, механічних пошкоджень призводить як до втрати продуктів, що транспортуються, так і до втрати стійкості течії в трубопроводі, виникнення зон турбулентної (нестійкої) течії, внаслідок чого виникає загроза ерозійного зношування стінки трубопроводу та виникнення додаткових напружень у матеріалі трубопроводу. У цьому випадку може бути вирішена й обернена задача – розроблена модель течії рідини в трубопроводі та чисельна схема її реалізації можуть бути використані при діагностуванні малих витоку, які розташовані на певній відстані один від одного.

3. Значення питомого перепаду тиску. Підвищення питомого перепаду тиску обумовлює зменшення енергетичної ефективності системи, зни-

ження свідчить про недопдачу транспортованого продукту. Обидва ці фактори призводять до порушення штатного режиму роботи трубопроводу, а, відповідно, і до виникнення зміни фізико-механічних характеристик у матеріалі трубопроводу.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на вдосконалення методів виявлення малих витоку, розробку нових підходів до моніторингу стану трубопроводів у реальному часі та інтеграцію математичних моделей у системи автоматизованого управління трубопровідними системами. Це дозволить забезпечити точнішу оцінку технічного стану трубопровідних систем та запобігти значним енергетичним втратам.

Список літератури/References

- Rybityskiy, I.V., Oliynyk, A.P., Yavorskiy, A.V. et al. (2019) Impact assessment of non-technological fluid accumulations in the cavity of an existing gas pipeline on the energy efficiency of its operation. *Physics and Chemistry of Solid State*, 20(4), 457–466. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.20.4.457-466>
- Doroshenko, Y., Rybityskiy, I. (2020) Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 1(8(103)), 28–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.192828>
- Konstantinov, Yu.M., Gizha, O.O. (2002) *Technical mechanics of fluids and gas: Manual*. Kyiv, Vyscha Shkola [in Ukrainian].
- Koichi Nakabayashi, Osami Kitoh, Voshitaka Katoh (2004) Similarity laws of velocity profiles and turbulence characteristics of Couette–Poiseuille turbulent flows. *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 507, Published online by Cambridge University Press, 25 May 2004, 43–69. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112004008110>
- Dickerson, P., Worthen, J. (2024) Optimizing pipeline systems for greater precision, efficiency & safety using emerging technologies. In: *PSIG Annual Meeting*, Charleston, South Carolina, 7–10 May 2024. PSIG-2426.
- Larson, R.G. (1992) Instabilities in viscoelastic flows. *Rheol. Acta*, 31, 213–263. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00366504>
- Frigaard, I.A., Howison, S.D., Sobey, I.J. (1994) On the stability of Poiseuille flow of a Bingham fluids. *J. Fluid Mechanics*, Vol. 263, Published online by Cambridge University Press, 26 April 2006, 133–150. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112094004052>
- Dubrulle, B., Laval, J.-P., Nazarenko, S., Zaboronski, O. (2004) A model for rapid stochastic distortions of small-scale turbulence. *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 520, Published online by Cambridge University Press, 29 November 2004, 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112004001417>
- Zeytounian, R.K., Platzer, M.F. (2004) Theory and applications of viscous fluid flows. *Applied Mechanics Reviews*, 57(3), B15–B16. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1760521>
- Олійник А.П., Штаєр Л.О. (2012) Дослідження впливу параметрів релаксації на збіжність чисельного методу послідовної верхньої релаксації для задачі Діріхле. *Карпатські математичні публікації*, 4(2), 289–296.
- Oliynyk, A.P., Shtaiar, L.O. (2012) Investigation of the influence of relaxation parameters on the convergence of the numerical method of sequential upper relaxation for the Dirichlet problem. *Carpathian Mathematical Publications*, 4(2), 289–296 [in Ukrainian].
- Bennequin, D., Gander, M.J., Gouarin, L., Halpern, L. (2016) Optimized Schwarz waveform relaxation for advection reaction diffusion equations in two dimensions. *Numer. Math.*, 134(3), 513–567. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00211-015-0784-8>

SUBSTANTIATION OF NEW DIAGNOSTIC PARAMETERS OF PIPELINE SYSTEMS EFFICIENCY

I.V. Rybitskyi¹, O.M. Karpash², V.Yu. Zapeka², P.M. Raiter¹, A.V. Yavorskyi¹, N.I. Chaban³

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 15 Karpatska Str., 76019, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

E-mail: admin@nung.edu.ua

²Kharkiv Ivan Kozhedub National University of the Air Force. Ukraine. E-mail: info@hups.mil.gov.ua

³King Danylo University. 35 E. Konovaltsia Str., 76018, Ivano-Frankivsk, Ukraine. E-mail: university@ukd.edu.ua

One of the main tasks of technical diagnostics of pipeline systems is to ensure their reliable and at the same time energy-efficient operation. In this work, we have searched for and developed the basis for constructing mathematical models of new informative parameters for diagnosing the technical condition and efficiency of pipeline systems. It is shown that the capacity of a pipeline decreases when it acquires an elliptical cross-sectional configuration. It is substantiated that the presence of small leaks in pipeline systems causes a loss of flow stability in the pipeline, the emergence of turbulent flow zones, which reduces the efficiency of the pipeline. 11 Ref., 3 Fig.

Keywords: technical diagnostics, informative parameters, energy efficiency, pipeline systems, mathematical model

Отримано 26.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 24.12.2024

Прийнято 10.03.2025



Українське матеріалознавче товариство ім. І.М. Францевича

Українське матеріалознавче товариство (УМТ) є громадською організацією, яка об'єднує матеріалознавців України для сприяння розвитку матеріалознавчої галузі в Україні. Засноване у 2004 році, УМТ активно працює над покращенням координації діяльності матеріалознавців, створенням умов для взаємодії науковців з виробничим сектором, залученням молоді до матеріалознавчої науки та інших спільних дій, спрямованих на науковий та виробничий розвиток матеріалознавства в Україні.

Діяльність Товариства:

1. Організація наукових конференцій та семінарів. УМТ регулярно проводить наукові заходи, такі як International Materials Science Conference HighMatTech та International Samsonov Conference "Materials Science of Refractory Compounds", які збирають науковців-матеріалознавців з різних країн для обміну досвідом та ідеями.
2. Залучення молоді до матеріалознавчої науки. Товариство на регулярній основі проводить конкурси студентських наукових робіт.
3. Підвищення престижу матеріалознавчої науки. УМТ щороку на конкурсній основі відзначає науковців нагородами за видатні досягнення в галузі матеріалознавства.
4. Взаємодія з бізнесом та промисловістю. УМТ організовує тематичні науково-виробничі семінари з залученням науковців та представників промисловості та бізнесу.
5. Розроблення сучасної матеріалознавчої термінології. УМТ займається розробкою сучасної термінології у галузі матеріалознавства, що сприяє стандартизації та покращенню комунікації в науковій спільноті.
6. Навчальні ініціативи. У 2025 році УМТ започаткувало серію навчальних семінарів з підготовки наукових публікацій для молодих науковців.
7. Інформаційна підтримка членів Товариства. УМТ надає інформаційну підтримку членам товариства шляхом розсилання інформації про актуальні матеріалознавчі події в Україні та світі.

Переваги для учасників Українського матеріалознавчого товариства ім. І.М. Францевича:

- Доступ до платформи взаємодії.
- Участь у заходах товариства зі знижками або на безоплатній основі.
- Інформаційна підтримка.
- Підтримка у разі організації власних ініціатив.

Переваги для організацій-спонсорів:

- Інформаційна підтримка.
- Доступ до широкого кола контактів у матеріалознавчій спільноті.
- Можливість участі у заходах товариства зі знижками.

www.umrs.org.ua

EVALUATION OF MICROSCOPIC DEFECTS IN HYDRAULIC TURBINE BLADE COATINGS

ОЦІНКА МІКРОСКОПІЧНИХ ДЕФЕКТІВ ПОКРИТТЯ ЛОПАТОК ГІДРОТУРБІН

C.A. Tugui¹, A. Savin², V.M. Uchanin³

¹Materials Processing Technologies and Equipment Department, Gheorghe Asachi Technical University, Iași, Romania.
E-mail: tzugui.andrei@yahoo.com

²Nondestructive Testing Department, National Institute of Research and Development for Technical Physics, Iasi, Romania.
E-mail: asavin@phys-iasi.ro

³G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.
E-mail: vuchanin@gmail.com

Hydro-abrasive wear is a major problem for the efficiency and durability of Francis turbines, widely used in hydroelectric power plants due to their ability to transform hydraulic energy into sustainable electricity. Constantly exposed to abrasive particles in water, turbine components are subjected to intense stresses, which lead to progressive deterioration and shortening of their lifespan. In this context, scanning electron microscopy (SEM) analysis becomes an essential tool for the evaluation and understanding of microscopic defects induced by hydro-abrasive wear. SEM allows for the detailed characterization of the affected surfaces and the identification of the types of damage, thus providing fundamental data for the optimization and selection of abrasion-resistant materials. Thermal spray of materials, such as Metco 71VF-NS (WC12Co) are an important solution in combating wear, being renowned for their increased hardness and strength. These sprayed layers not only protect the turbines from the effects of hydro-abrasive wear, but also contribute to the overall efficiency of the system by reducing the frequency of repairs and maintenance. Thus, in the context of renewable energy, where reliability and durability of equipment are essential, the use of advanced materials to protect Francis turbines represents a crucial step towards sustainable and efficient production of electricity based on hydraulic resources. 22 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: thermal spraying, coatings, SEM, structure, thickness, porosity

Гідроабразивне зношування є основною проблемою ефективної та довговічної роботи турбін Френсіса, які широко використовуються на гідроелектростанціях завдяки їхній здатності перетворювати гідравлічну енергію в стабільну електроенергію. Постійно піддаючись впливу абразивних частинок у воді, компоненти турбіни зазнають інтенсивних навантажень, що призводить до прогресуючого псування та скорочення терміну їх служби. У цьому контексті аналіз за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM) стає важливим інструментом для оцінки та розуміння мікроскопічних дефектів, викликаних гідроабразивним зносом. SEM дозволяє детально охарактеризувати уражені поверхні та ідентифікувати типи пошкоджень, таким чином забезпечуючи фундаментальні дані для оптимізації та вибору матеріалів, стійких до стирання. Терморозпилення матеріалів, таких як Metco 71VF-NS (WC12Co), є важливим рішенням у боротьбі зі зносом, відомим своєю підвищеною твердістю та міцністю. Ці напилені шари не тільки захищають турбіни від впливу гідроабразивного зносу, але й сприяють загальній ефективності системи, зменшуючи частоту ремонтів і технічного обслуговування. Таким чином, у контексті відновлюваної енергетики, де надійність і довговічність обладнання є важливими, використання передових матеріалів для захисту турбін Френсіса є вирішальним кроком до сталого та ефективного виробництва електроенергії на основі гідравлічних ресурсів. Бібліогр. 22, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: термічне напилення, покриття, скануюча електронна мікроскопія, структура, товщина, пористість

1. Introduction. Choosing the right turbine for a specific application requires a detailed analysis of design parameters, including energy efficiency, wear resistance and operating conditions. Therefore, combining advanced materials analysis technologies with efficient design solutions contributes to the development of Francis turbines that not only optimize energy production but also minimize environmental impact, thus supporting the transition to a more sustainable and greener energy system.

Turbine blades are the most affected by hydro-abrasive wear, being directly exposed to the water stream and abrasive particles [1–3]. Wear can significantly reduce the operational efficiency of the turbine, as the affected surfaces become rougher and turbulence increases, leading to energy losses.

A high concentration of sand, gravel or other particles can accelerate wear. In regions where rivers carry large amounts of sediment, turbine wear is particularly severe, and hard materials such as quartz cause

C.A. Tugui – <https://orcid.org/0009-0004-5878-3383>, A. Savin – <https://orcid.org/0000-0001-9863-311>,

V. Uchanin – <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>

© C.A. Tugui, A. Savin², V.M. Uchanin, A. Savin, V.M. Uchanin, 2025

faster wear than soft particles [1, 4]. Water velocity can influence hydro-abrasive wear; higher water velocity means that suspended abrasive particles have greater kinetic energy and can cause faster wear.

Modernization of existing plants, development of advanced turbine technologies, and efficient water management are essential to maintaining the important role of this form of energy. An increase in the integration of hydropower with other renewable sources, such as solar and wind, is expected to ensure a stable energy supply. Investments in pumped storage technology and the development of marine energy also open up new possibilities for the future of hydropower.

There are known a lot of nondestructive (NDT) techniques possible to solve the diagnostic problems related with protective layers of the gas turbine components and blades operated in hard conditions [5–13]. In [6–7] eddy current (EC) NDT techniques for detection of magnetic anomalies in gas turbine disks and flaws located in fillet zone of blade were proposed and investigated. The promising results were obtained by apparatus realized by so called frequency scanning eddy current (EC) technique developed in CESI S.p.A. (Milan, Italy [8–10]. This EC technique based on the evaluation of EC probe impedance changes in the 5.9 to 8 MHz range of operational frequencies was used to characterize the depths of grinding burns in heat resistant steel in the range of depths from 1...3 to 100 μm [11]. In this paper, the second EC method based on elevated 200 MHz operational frequency application was successfully applied also. The EC technique based elevated frequencies of 100 MHz, 200 MHz and 400 MHz application was successfully applied for evaluation of parameters of gas-filled layer in titanic allow blades [12–13].

In this paper, the base material and hard layer structures of turbine blades were analyzed as the first stage needed to solve the related diagnostic problems.

2. Materials and method of thermal spraying.

Base materials. AISI 4140 stainless steel is a stainless steel used for making hydraulic vanes, due to the balance between cost and performance. It is resistant to corrosion in many corrosive environments. This steel can be subjected to high mechanical loads, being strong enough to withstand impact forces. Hydraulic vanes made of this steel ensure a relatively long service life.

Figure 1 shows an acicular martensitic microstructure obtained under an optical microscope. This microstructure is formed as a result of the carbon content and the applied heat treatments, such as quenching and tempering. During the quenching process, the steel is heated to a high temperature, followed by rapid cooling, which leads to the transformation of aus-

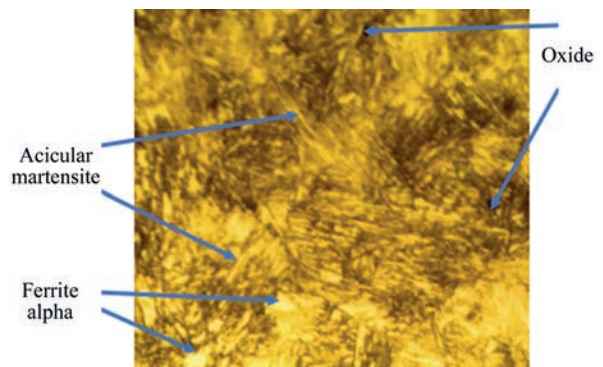


Figure 1. Microscopic structure of AISI 4140 stainless steel
Рис. 1. Мікроструктура нержавкої сталі AISI 4140

tenite into martensite [14, 15]. This transformation process produces a network of long and thin needles, oriented in various directions, which are visible at the microscopic level and give the steel superior mechanical properties, such as hardness and increased resistance to mechanical stress.

The acicular martensitic structure plays an important role in the mechanical behaviour of AISI 4140 steel, as it provides wear resistance and the ability to take on high loads without permanent deformation. Tempering treatments also allow the reduction of internal stresses and improvement of the ductility of the steel, while maintaining good mechanical strength. In conclusion, the acicular microstructure of martensite is a key factor in ensuring the performance of this type of steel in demanding industrial applications [16, 17].

Due to the exposure of this sample to corrosive environments (it was taken from a decommissioned Francis turbine), the appearance of oxides on the surface or in the microstructure is observed, visible as dark spots or inclusions under the microscope. These can slightly affect the behaviour of the material under certain conditions. It can also be observed that areas with alpha ferrite, a more ductile phase that forms during solidification, also appear. Alpha ferrite appears in the form of elongated grains dispersed among the martensite needles. These grains contribute to reducing the brittleness and increasing the ductility of steel.

Coating Thermal Spray Method. Plasma jet spraying is an advanced coating method that applies hard coatings to metallic, ceramic, or composite substrates to improve their functional properties [18, 19]. This technology is commonly used to add wear, hydro-abrasion, high temperature, and corrosion resistance using materials such as WC12Co and ceramic oxides. The process involves generating a plasma jet through an electric arc, which heats a working gas (argon, hydrogen, helium) to temperatures up to 15 000°C.

Plasma jet spraying is an advanced, versatile, and efficient technology for applying hard coatings, such as WC12Co (Figure 2). This technology provides

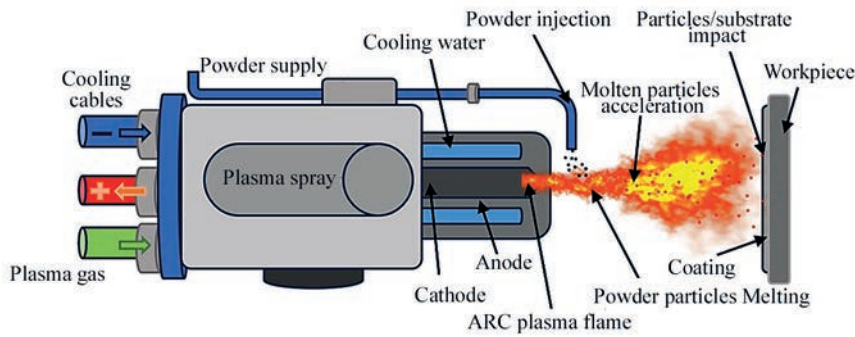


Figure 2. Plasma jet thermal spraying
Рис. 2. Термічне напilenня плазмовим струменем

films with superior wear, corrosion, and high temperature resistance properties, making it essential in various industries where surface protection is critical for performance and durability [20].

Plasma is an ionized gas capable of carrying the energy needed to melt the material powder particles injected into the plasma flow. Plasma jet spraying produces dense and highly adherent layers due to the high impact velocity of the molten particles and the high temperature of the plasma.

Spraying Material. Plasma-sprayed coatings are used in critical industries such as aerospace, automotive, and energy. In particular, coatings WC are highly valued for their high hardness and wear resistance, and are used to protect surfaces subjected to extreme conditions such as cutting tools, components subject to intense erosion and friction, or equipment parts exposed to abrasive environments [21].

To spray the coating by plasma thermal spraying WC12Co powder combined with a cobalt binder. This mixture provides excellent wear, erosion, and shock resistance, and is widely used for applications requiring extreme durability in abrasive environments [22].

3. Results and Discussion. SEM Analysis. The scanning electron microscopy (SEM) analysis of the samples coated with WC12Co powders provides detailed information about the microstructure of the layer obtained by thermal plasma spraying. This analysis is essential for evaluating the quality, material distribution and mechanical behaviour of the layer. From the SEM analysis, WC12Co particles in irregular structures are observed, dispersed in the cobalt matrix (Figure 3).

From particle analysis by scanning electron microscopy, a detailed characterization of particle size and morphology can be obtained. SEM allows for a precise assessment of individual particles. SEM analysis

Table 1. Particle size analysis of WC12 powders used for spraying
Таблиця 1. Аналіз розміру частинок порошків WC12, які використовуються для напilenня

Value	r, μm	d, μm	A, μm^2
Min. value	1.76	3.53	9.78
Max. value	14.68	29.37	677.47
Mean value	5.94	11.87	148.23
Std. dev.	3.46	6.92s	173.55

where: r – radius of the particles, d – diameter of the particles, A – area of WC12Co particles.

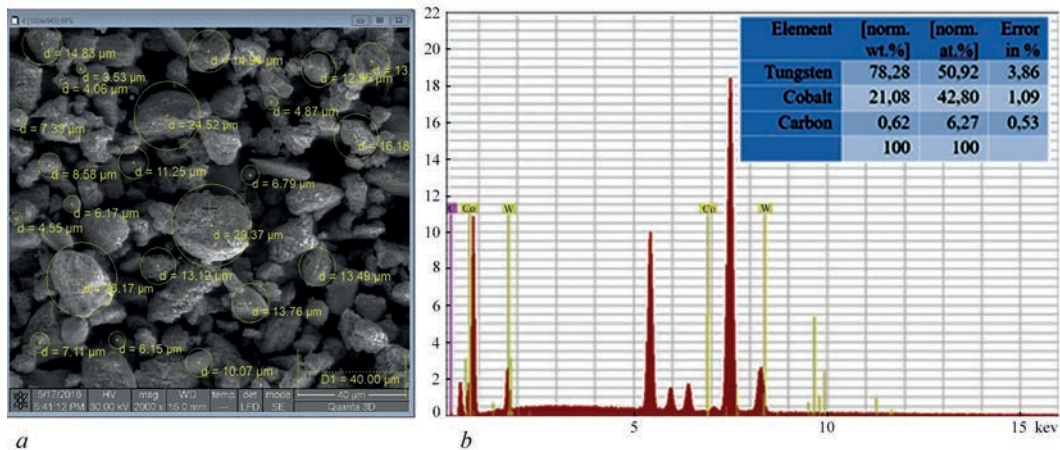


Figure 3. SEM images: a – determination of the size of WC12Co powders used for spraying, where: d – is the particle diameter; b – their EDX analysis

Рис. 3. SEM зображення: a – визначення розміру порошків WC12Co, які використовуються для напilenня, де: d – діаметр частинок; b – їхній EDX аналіз

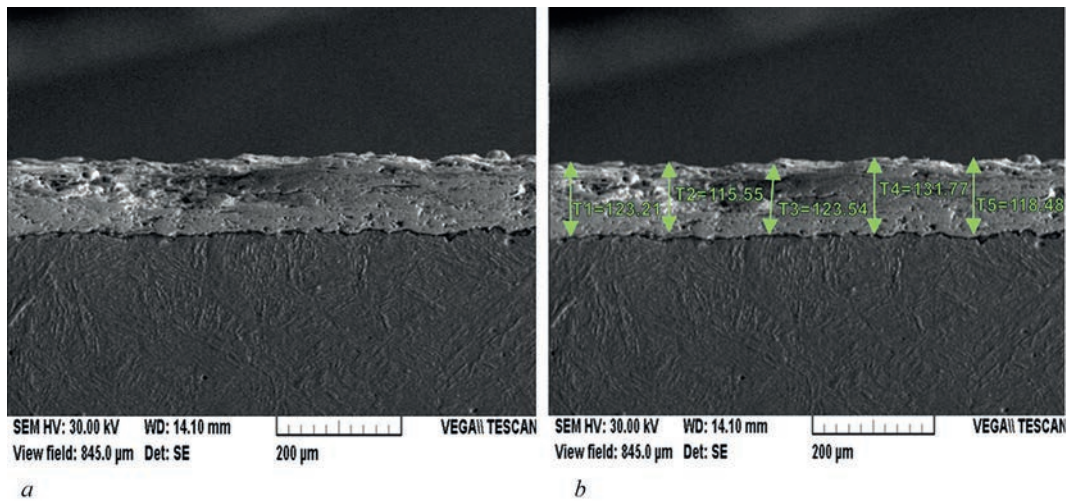


Figure 4. SEM image of the layer sprayed with WC12Co; *a* – SEM analysis, *b* – layer thickness analysis
 Рис. 4. SEM зображення шару, напиленого WC12Co; *a* – SEM аналіз, *b* – аналіз товщини шару

ysis allows for the observation of morphological details of WC-Co particles, which can have irregular, sharp or rounded shapes, depending on the manufacturing process.

Typically, WC12Co particles are regular, which favours a good mechanical bond in the coating layer. Dimensional measurements can be made directly on SEM images at a well-defined scale, ensuring precision in determining the particle size distribution (Figure 1). The determined size of the particles used is presented in table 1. It varies between 3 and 29 microns in diameter with their average diameters being approximately 5 μm and the area of 148 μm.

Tungsten cobalt carbide is known for its hardness and ability to resist abrasion, making it a material of choice in industries where wear protection and mechanical strength are essential.

The resistance of the coatings to hydro-abrasive wear and corrosion makes them ideal for applications such as hydraulic turbine blade coatings, dirty water pump coatings and in mining industries such as salt mining, where hydro-abrasive wear and corrosion are common problems.

For the analysis of the thickness of a coating sprayed with WC12Co, several measurement methods can be used. Among all the existing methods, thickness determination using electron microscopy was chosen because it offers high resolution and can measure very small thicknesses. Also, from the SEM image obtained, an analysis of the layer-substrate interface can be performed. Thickness measurements on SEM are of very high precision because it has the ability to measure thin layers at the nanometric level.

Determining the thickness of a coating of WC12Co sprayed using scanning electron microscopy involves several steps and techniques, which allow obtaining precise and detailed measurements of the layer thick-

ness. The sample made by thermal plasma jet spraying was sectioned perpendicular to the layer surface, to obtain a cross-section through the WC12Co layer and substrate. After cutting, it was embedded in an epoxy resin to protect the edge of the sample and facilitate subsequent handling in the grinding and polishing process. The samples were subjected to successive grinding processes, to obtain a flat and smooth surface at the interface between the layer and the substrate. In order to better highlight the layer and the substrate but also the interface between them, the samples were chemically etched prior to SEM analysis (Table 2).

The thickness of the layer can be measured directly on the SEM image, by calculating the distance between the layer-substrate interface and the upper edge of the layer. SEM images include a precise scale, allowing the thickness to be measured with very good accuracy. Also, for even greater precision of the thickness value of the sprayed star, measurements are made at several points along the layer section, the average of these measurements providing a precise estimate of the average layer thickness.

EDX analysis. EDX analysis is a technique attached to a scanning electron microscope and works by analysing the X-rays emitted by samples when they are bombarded with electrons. Each element emits characteristic X-rays, and the analysis of these

Table 2. Dimensional analysis of the sprayed coating
Таблиця 2. Аналіз розмірів напиленого покриття

Object name	Thickness [μm]	Value	Thickness [μm]
T1	123.21		
T2	115.55	Min. value	115.55
T3	123.54	Max. value	131.77
T4	131.77	Mean value	125.15
T5	131.7	Std. dev.	6.81

where: T1–T7 – represents the names of the areas where the thickness determination took place on the SEM image in Figure 4.

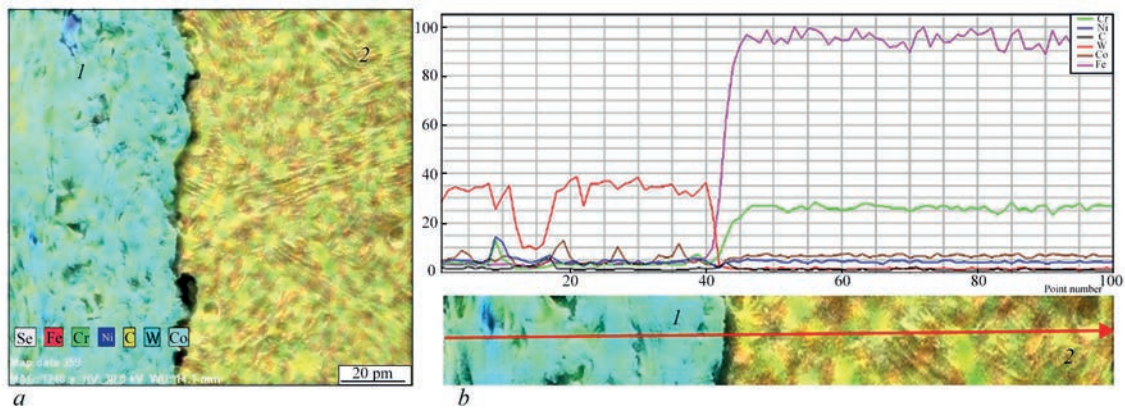


Figure 5. SEM images with EDX analysis of the sprayed layer (1) and the substrate (2); a – EDX mapping; b – in-line EDX analysis
Рис. 5. SEM зображення з аналізом EDX напиленого шару (1) і підкладки (2); a – відображення EDX; b – поточний аналіз EDX

radiations allows the identification and quantification of the chemical elements present in the sample.

From the SEM analysis performed in the section it can be seen that the interface between the layer and the substrate is very well determined, very uniform and without defects which indicates that the adhesion is very good. From the EDX compositional analysis presented in Figure 5 it can be observed a homogeneous distribution of the WC and Co layer.

Also, at higher magnifications areas with reduced porosity are observed. This is due to some particles that are partially melted. This is a characteristic of coatings made by thermal spraying, and the presence of pores can influence the mechanical properties of the layer, especially the resistance to wear and corrosion.

Conclusions

Hydropower plays a key role in the transition to renewable sources, but hydro-abrasive wear of turbines caused by solid particles in water is a major challenge. Reducing this type of wear through advanced vortex technologies and plant modernization is crucial to maintaining the efficiency and sustainability of hydroelectric systems.

Chemical analysis of the base material from a Francis turbine blade revealed that the stainless steel used, of the GX3CrNi13-4 grade, has a high chromium and nickel content, which gives it excellent corrosion resistance and good ductility. These properties are essential for hydraulic blades exposed to aggressive environments such as salt water.

By using SEM, precise measurements of the thickness of the WC12Co layer can be obtained, along with detailed information on the structure and uniformity of the spraying. This process is essential for validating the quality of the protective layer and the spraying parameters used.

References

1. Sangal, S., Singhal, M., Saini, R.P. (2018) Hydro-abrasive erosion in hydro turbines: A review. *International J. of Green*

Energy, 15(1), 232–253. DOI: <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1431546>

2. Rai, A., Kumar, A., Staubli, T. (2018) Design and verification of a Pelton turbine rig for hydroabrasive erosion testing. In: *Conference «Current Research in Hydraulic Turbines» (CRHT-VIII- 2018)*, June 2018, Kathmandu, Nepal

3. Arora, N., Kumar, A., Singal, S. (2024) Hydro-abrasive erosion in Kaplan turbines: A case study. *J. of Hydroinformatics*, 26(9), 2251–2260. DOI: <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.096>

4. Felix, D., Albayrak, I., Boes, R., Abgottspon, A. (2017) Sediment transport through the power waterway and hydro-abrasive erosion on turbines. In: *Conference «Hydro 2017»*, October 2017, Seville, Spain. Volume: E-Proceedings, paper №27.07.

5. Pitkänen, J., Hakkarainen, T., Jeskanen, H., Kuusinen, P., Lahdenperä K., Särkiniemi P., Kemppainen, M., Pihkakoski M. (2000) NDT methods for revealing anomalies and defects in gas turbine blades. In: *15th World Conf. on Nondestructive Testing*, Rome, 2000 www.ndt.net/article/wcndt00/papers.

6. Mook, G., Simonin, J., Feist, W.D., Hinken, J.H., Perrin, G. (2006) Detection and characterization of magnetic anomalies in gas turbine disks. In: *Proceedings of the 9th European Conference on NDT*, Berlin, Germany, 25–29 September 2006.

7. Uchanin, V., Nardoni, G., Nardoni, P. (2024) Fatigue cracks detection in the fillet zone of steel blades of industrial gas turbines using eddy current method. *The Paton Welding J.*, 7, 22–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.07.04>

8. Schnell, A., Germerdonk, K., Antonelli, G. (2007) *A non-destructive testing method of determining the depletion of a coating*. U.S. Patent № 7175720, Publ. 13.02.2007.

9. Antonelli, G. (2002) *Non-destructive condition assessment of serviced MCrAlY coatings*. Turbine Forum 2002, Nice-France, 2002.

10. Antonelli, G., Ruzzier, M., Necci, F. (1998) Thickness measurement of MCrAlY high-temperature coatings by frequency scanning eddy current technique. *J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, Transactions of ASME, 120, 537–542.

11. Uchanin, V.M., Sidorenko, M.V. (2016) Investigation of eddy current method for detection and assessing changes in structure during grinding of heat-resistant steel components. *Technical diagnostics and non-destructive testing*, 4, 21–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.04.04>

12. Uchanin, V. (2000) Elevated frequencies in eddy currents – new possibilities of thin surface layer evaluation. In: *15th World Conf. on Nondestructive Testing*, Rome, 2000 www.ndt.net/article/wcndt00/papers.

13. Uchanin, V.N. (1992) Eddy current device for inspecting changes in the structure in heat treatment of components of titanium alloys. *Materials Science*, 27, 442–443. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00723242>

14. İpek Ayvaz, S., Özer, E. (2023) Comparative study of conventional and microwave-assisted boriding of AISI 1040

- and AISI 4140 steels. *Tehnički Glasnik*, 17(2), 286–292. DOI: <https://doi.org/10.31803/tg-20221206210933>
15. Hajian, M., Adivi, B., Jamali, M. (2024) Investigating the microstructure and wear properties of AISI 4140 steel clad with WC-Ti composite particles via gas tungsten arc welding. *JOM*, 76, 2824–2834. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06471-z>
 16. Podgornik, B., Vizintin, J., Leskovšek, V. (1998) Tribological properties of plasma and pulse plasma nitrided AISI 4140 steel. *Surface & Coatings Technology*, 108-109, 454–460. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00571-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00571-4)
 17. Márquez-Cortés, R., Martínez-Trinidad, J., García-León, R. (2023) Adhesion behaviour of borided AISI 4140 steel. *Surface Engineering*, 38(10-11). DOI: <https://doi.org/10.1080/02670844.2023.2180856>
 18. Godoy, C., Batista, J.C.A. (1999) Adhesion evaluation of plasma sprayed coatings using piecewise linear regression analysis. *J. of Thermal Spray Technology*, 8(4), 531–536. DOI: <https://doi.org/10.1361/105996399770350214>
 19. Mann, B.S., Arya, V. (2001) Abrasive and erosive wear characteristics of plasma nitriding and HVOF coatings: Their application in hydro turbines. *Wear*, 249(5-6), 354–360. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00537-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00537-3)
 20. Qu, Q.-y., Qiu, W., Zeng, D.-c., Liu, Z., Dai, M.-j., Zhou, K.-s. (2009) Effects of deposition parameters on microstructure and thermal conductivity of diamond films deposited by DC arc plasma jet chemical vapor deposition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(1), 131–137. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60240-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60240-X)
 21. Sosnowy, P., Góral, M., Kotowski, S., Hanula, G., Gwizdała, J., Drzał, J., Kobylarz, M., Borowski, P., Gargała, R. (2015) The influence of temperature on erosion resistance of carbide coatings deposited by APS method. *Solid State Phenomena*, 227, 251–254. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.227.251>
 22. Kim, H. J., Kweon, Y. G., Chang, R. W. (1994). Wear and erosion behavior of plasma-sprayed WC-Co coatings. *J. of Thermal Spray Technology*, 3(2), 169–178. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02648274>

Отримано 27.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 21.02.2025

Прийнято 22.03.2025

VIII Міжнародна конференція з питань цілісності конструкції та довговічності 2025 16 - 19 вересня 2025 року

FSB



ESIS

ICSID 2025

Дубровник, Хорватія, 15-19 вересня 2025 р.

Метою конференції ICSID 2025 є об'єднання вчених та інженерів з усього світу для обговорення того, як характеризувати, аналізувати, прогнозувати та оцінювати втому та руйнування конструкційних матеріалів і компонентів. ICSID 2025 має на меті стати форумом для обговорення поточних і майбутніх тенденцій в експериментальній, теоретичній і прикладній механіці руйнування, втомі, оцінці

цілісності конструкції, аналізі відмов та інших важливих тем у цій галузі. Конференція ICSID 2025 сприятиме співпраці між науковцями та експертами з університетів, промисловості та уряду, які займаються проблемами втоми та руйнування матеріалів і конструкцій. Для аспірантів, дослідників та інженерів з промисловості перед конференцією буде організовано дводенну школу з моделювання та аналізу втоми та руйнування разом із обговоренням за круглим столом на тему «Як поєднати науку та промисловість».



Тематика конференції:

- Передові методи тестування та оцінювання
- Аналітичні моделі
- Застосування до компонентів і конструкцій
- Штучний інтелект в аналізі структурної цілісності
- Корозія, деградація та розтріскування, викликані навколишнім середовищем, корозійна втома
- Циклічна деформація та зародження тріщин
- Механіка та моделі пошкодження
- Бази даних, експертні системи та програмне забезпечення
- Довговічність і продовження терміну служби конструкцій і компонентів
- Розслідування та аналіз несправностей
- Руйнування наноматеріалів і наноструктур
- Втома і руйнування полімерів, еластомерів, композитів і біоматеріалів
- Втома та руйнування зварних виробів, зварних компонентів, з'єднань і клеїв
- Моделювання втоми та руйнування та випробування на всіх масштабах довжини
- Прогнозування траєкторії втомної тріщини
- Методи скінчених елементів та їх застосування
- Руйнування та пошкодження цементних матеріалів
- Критерії руйнування та відмови
- Втома і знос
- Низька, середня та висока циклова втома
- Методи макромасштабного прогнозу втоми
- Обчислювальне моделювання мікроструктури в масштабі
- Змішана та багатоосьова втома та руйнування
- Моделі, критерії та методи в механіці руйнування
- Багатомасштабне моделювання матеріалів
- Неруйнівна оцінка (NDE)
- Імовірнісна механіка руйнування
- Надійність і цілісність інженерних споруд
- Ефекти залишкового стресу
- Оцінка цілісності конструкції
- Обробка поверхні та підвищення стійкості до пошкоджень
- 3D-друковані матеріали та конструкції

<https://icsid2025.fsb.unizg.hr>

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОГО МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВЕКТОРА СТАНУ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ

О.М. Безвесільна, Т.О. Толочко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: prilad168@gmail.com, asnk@kpi.ua

На сьогоднішній день надзвичайно перспективним і актуальним є застосування алгоритмічних методів підвищення точності гравіметричних і навігаційних систем. Це вимагає створення високоточних та ефективних алгоритмічних методів обробки вихідного сигналу вимірювачів лінійних прискорень. Запропоновано використання штучної нейронної мережі для підвищення точності вимірювань у нестационарних і несприятливих умовах, що супроводжується виникненням ряду завад, які додаються до вихідного сигналу чутливого елемента цих вимірювачів. Ці особливості враховано при розробці алгоритмів ідентифікації стану вимірювачів лінійних прискорень із підвищеними метрологічними характеристиками. Розробка алгоритмічного методу ідентифікації вектора стану чутливого елемента вимірювача лінійних прискорень забезпечує підвищення точності таких вимірювачів у несприятливих і нестационарних умовах проведення вимірювань. Отримано розв'язок задачі ідентифікації на основі фільтра Калмана у реальному часі. Це дозволяє оцінити вектор стану чутливого елемента при наявності завад детермінованого та випадкового характеру. Запропоновано реалізацію алгоритму ідентифікації на основі штучної нейронної мережі. Адаптацію та оптимальне настроювання параметрів алгоритму виконано у процесі адаптації та навчання даної мережі. Для оцінки вектора стану чутливого елемента розроблено схему, що складається з ліній затримки та трьох адаптивних лінійних нейронів. Результатом є зменшення додаткової похибки вимірювань, обумовленої складними та нестационарними умовами вимірювань. Бібліогр. 12, рис. 1.

Ключові слова: алгоритмічні методи, ідентифікація, вектор стану, штучна нейронна мережа, фільтр Калмана

Вступ. Розвиток сучасних високоточних гравіметричних і навігаційних систем вимагає удосконалення всіх складових елементів цих систем та широкого застосування алгоритмічних методів обробки сигналів і компенсації похибок. Можливості вдосконалення конструкції та підвищення точності виготовлення складових елементів на теперішній час практично вичерпані. Тому дуже перспективним і актуальним шляхом вирішення цієї проблеми є застосування алгоритмічних методів підвищення точності гравіметричних і навігаційних систем. Все це вимагає створення високоточних і ефективних алгоритмічних методів обробки вихідного сигналу вимірювачів лінійних прискорень як важливої складової частини гравіметричних і навігаційних систем [1, 2].

Існує багато наукових праць, присвячених теоретичним основам і дослідженню оптимальних і субоптимальних алгоритмів фільтрації дискретних сигналів засобів вимірювань, що містять завади [3–7, 9, 10]. Оскільки завдання оптимальної фільтрації є завданням ідентифікації (оцінки) стану, що сформульоване у стохастичних термінах, у подальшому будемо використовувати термін «ідентифікація стану».

Робота вимірювачів лінійних прискорень у несприятливих і нестационарних умовах супроводжується виникненням ряду завад, що додаються до

вихідного сигналу чутливого елемента (ЧЕ) цих вимірювачів. Наприклад, гармонійна завада може бути обумовлена нестационарним тепловим станом гіроскопічного ЧЕ та впливом періодичних рухів на частоті маятникових коливань ЧЕ [8]. Тому необхідно враховувати всі ці особливості при розробці алгоритмів ідентифікації стану вимірювачів лінійних прискорень із підвищеними метрологічними характеристиками.

Мета роботи – розробка алгоритмічного методу ідентифікації вектора стану ЧЕ вимірювачів лінійних прискорень. Цей метод забезпечує підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень у несприятливих і нестационарних умовах проведення вимірювань.

Викладення основного матеріалу дослідження. Розглянемо алгоритмічні методи підвищення точності ідентифікації стану гіроскопічного ЧЕ, яким є вимірювач лінійних прискорень [2, 8]. Результатом оцінки стану є ідентифікація кутового положення та параметрів кутового руху ЧЕ $\alpha(t) = \alpha_{\Pi} + \alpha_{3M}(t)$. При цьому амплітуда корисної складової α_{Π} , яку вважаємо постійною на інтервалі спостереження, пропорційна лінійному прискоренню, що вимірюється. Параметри змінної складової $\alpha_{3M}(t)$ руху ЧЕ необхідні в подальших процедурах алгоритмічної обробки для компенса-

ції похибок оцінки стану та підвищення точності вимірювань лінійних прискорень.

Змінна складова $\alpha_{3M}(t)$ визначається розв'язком нелінійного диференційного рівняння [2, 8]:

$$\ddot{\alpha}_{3M} + 2\xi_{3M}\dot{\alpha}_{3M} + \omega_0^2 \sin \alpha_{3M} = 0, \quad (1)$$

де ω_0, ξ_{3M} – колова частота та коефіцієнт згасання прецесійних коливань ЧЕ.

У разі малих коливань ЧЕ $\sin(\alpha_{3M}) \approx \alpha_{3M}$, а розв'язок рівняння (1) має вигляд [8]:

$$\alpha_{3M}(t) = A_{3M} e^{-\xi_{3M}t} \sin(\omega_{3M}t + f_{3M}),$$

де $\omega_{3M} = \sqrt{\omega_0^2 - \xi_{3M}^2}$, A_{3M}, f_{3M} – амплітуда та початкова фаза прецесійних коливань ЧЕ. Якщо $\xi_{3M} \rightarrow 0$, то математична модель ідеальної траєкторії руху ЧЕ має вигляд:

$$\alpha(t) = \alpha_{3M} + \alpha_{3M}(t); \alpha_{II} = \text{const};$$

$$\alpha_{3M}(t) = \alpha_C \sin \omega_{3M}t + \alpha_S \cos \omega_{3M}t, \quad (2)$$

де $\alpha_C = A_{3M} \cos f_{3M}$, $\alpha_S = A_{3M} \sin f_{3M}$. У цьому випадку вектор стану ЧЕ, який потрібно ідентифікувати, дорівнює: $Z_\alpha = (\alpha_{II}, \alpha_C, \alpha_S)^T$.

Оцінка виконується на основі обробки даних α_i^* , що надходять від датчика кутового положення (ДК) цього ЧЕ. При цьому:

$$\alpha_i^* = \alpha(t_i) + \delta_\alpha(t_i); i = \overline{1, K}; t_i = i\delta_d; T_C = K\delta_d,$$

де $\alpha(t_i)$ – значення, що відповідають ідеальній траєкторії руху ЧЕ; $\delta_\alpha(t_i)$ – похибки вимірюваної траєкторії руху ЧЕ, обумовлені дією завад на ЧЕ та похибками ДК; K – кількість відліків, що надходять від ДК та використовуються для оцінки стану ЧЕ; δ_d – інтервалу часу між відліками; T_C – час спостереження за ЧЕ.

Дослідимо похибки оцінки стану, зумовлені неадекватністю прийнятої моделі та реального сигналу гірографіметра (ГГ), похибки внаслідок кінематичних нелінійностей і типових перешкод у законі руху ЧЕ, а також шумів ДК.

Враховуючи різні підходи до знайдення вихідної системи рівнянь, розглянемо два основних підходи, які використовуються для формування фільтра Калмана (ФК).

Перший підхід полягає у використанні системи рівнянь ГГ у межах прецесійної теорії та врахування додаткового рівняння на підставі сталості кута неузгодженості стану стійкої $R^N = \alpha_{II}$, або стану нестійкої рівноваги $R^S = \alpha_{II}$ з нулем ДК. За цих умов систему рівнянь, яка характеризує рух ЧЕ, що спостерігається за ДК, можна записати у вигляді матричного рівняння:

$$\dot{x}(t) = Ax(t), \quad (3)$$

де:

$$x = [x_1 x_2 x_3]^T = [R^{N,S} \alpha \beta]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_g H^{-1} \\ 0 & \pm \omega_\xi & 0 \end{bmatrix}.$$

У матриці A знак «-» перед елементом ω_ξ відповідає руху ЧЕ поблизу стану стійкої рівноваги, а знак «+» – поблизу стану нестійкої рівноваги.

Другий підхід при формуванні матриці A полягає у використанні диференціального рівняння другого порядку (1), яке характеризує рух ЧЕ за координатою α . За цих умов у системі (3) вектору стану має вигляд:

$$x = [x_1 x_2 x_3]^T = [R^{N,S} \alpha \dot{\alpha}]^T,$$

а матриця:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \mp \omega_0^2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Повернемося до питання спостереження системи, що розглядається. Для цього вважатимемо, що поміж вектором вимірювань z та вектором стану x є лінійний взаємозв'язок:

$$z(t) = Cx(t), \quad (5)$$

де C – матриця вимірювань.

Через те, що в системі ГГ потребує вимірювань сигнал $R^{N,S} + \alpha_{3M}$, то матриця C вироджується у матрицю-рядок:

$$C = [1 \ 1 \ 0]. \quad (6)$$

Складемо матрицю спостереження системи. Оскільки вимірювання z здійснюються з похибками, то співвідношення (5) можна записати у вигляді:

$$z(t) = Cx(t) + V(t). \quad (7)$$

Тоді в прийнятих позначеннях модель ГГ має вигляд:

$$\dot{x} = Ax(t); \quad (8)$$

$$z(t) = Cx(t) + V(t).$$

де $V(t)$ – вектор, складові якого є випадковими змінними, для яких виконуються такі гіпотези:

– математичне сподівання кожної складової дорівнює нулю;

– похибки вимірювань у кожний момент часу не залежать від похибок вимірювань, які виконуються у наступний момент часу.

Враховуючи, що система ГГ (3) у випадку, що розглядається, є стаціонарною, дискретний ФК представимо системою матричних рівнянь:

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + k_k (z_k - C\hat{x}_{k/k-1}); \quad (9)$$

$$k_k = P_{k/k-1} C^T [C P_{k/k-1} + L_k]^{-1}; \quad (10)$$

$$P_{k/k-1} = \Phi m_{k-1/k-1} \Phi^T; \quad (11)$$

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - k_k C P_{k/k-1},$$

де $\hat{x}_{k/k-1}$ – оцінка x_k з урахуванням всієї інформації, яка відома в момент часу t_{k-1} та у попередні моменти часу; x_k – істинне значення x в момент часу t_k ; $\hat{x}_{k/k}$ – оцінка x_k з урахуванням всієї інформації, яка відома в момент часу t_k та у попередні моменти часу; $P_{k/k-1}$ – матриця коваріацій випадкової змінної $\hat{x}_{k/k-1} - x_k$.

$$P_{k/k-1} = E \{ (\hat{x}_{k/k-1} - x_k)(\hat{x}_{k/k-1} - x_k)^T \}, \quad (12)$$

$E \{ \}$ – імовірнісна оцінка виразу в дужках; $P_{k/k-1}$ – матриця коваріацій випадкової змінної $\hat{x}_{k/k-1} - x_k$; L_k – матриця коваріацій випадкової змінної V_k .

Перехідна матриця системи (3) не залежить від кроку обчислень, тому її можна представити у вигляді матричного ряду:

$$\Phi = e^{A\Delta t} = 1 + A\Delta t + \frac{[A\Delta t]^2}{2!} + \frac{[A\Delta t]^3}{3!} + \dots \quad (13)$$

У разі надання матриці A у вигляді (4) матричний ряд перетворюється на матриці розмірності (3×3) , в одній з яких елементи є розкладеннями тригонометричних функцій у ступеневий ряд при орієнтації ЧЕ у стан стійкої рівноваги, іншій – елементи є розкладеннями гіперболічних функцій у ступеневі ряди при орієнтації ЧЕ у стан нестійкої рівноваги. З урахуванням цих перетворень перехідні матриці для оцінки стану стійкої та нестійкої рівноваги набувають вигляду:

$$\Phi^N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_0 \Delta t & \frac{1}{\omega} \sin \omega_0 \Delta t \\ 0 & -\omega \sin \omega_0 \Delta t & \cos \omega_0 \Delta t \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\Phi^S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{ch} \omega_0 \Delta t & \frac{1}{\omega} \text{sh} \omega_0 \Delta t \\ 0 & \omega \text{sh} \omega_0 \Delta t & \text{ch} \omega_0 \Delta t \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Вектор стану системи в момент $t_1 = 0$ задається математичним сподіванням вектора $\hat{x}_{0/0}$ і встановлюється експериментально на підставі вивчення властивостей системи задання початкових умов конкретного ГГ і з урахуванням точності початкової орієнтації ЧЕ відносно площини північ–південь:

$$\hat{x}_{0/0} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_{10} \\ \Delta \hat{x}_{20} \\ \Delta \hat{x}_{30} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Для обчислення оцінки стану, яка використовується на першому кроці $\hat{x}_{k/k-1}$ при $k = 1$, скористаємося співвідношенням:

$$\hat{x}_{k/k-1} = \Phi \hat{x}_{k-1/k-1}.$$

Матрицю коваріацій початкового стану ГГ задамо у вигляді дисперсій початкових відхилень вектора стану (16), причому при $k = 1$ матриця коваріацій має діагональний вигляд:

$$P_{0/0} = \begin{bmatrix} (\Delta \hat{x}_{10})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\Delta \hat{x}_{20})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\Delta \hat{x}_{30})^2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Враховуючи структуру матриці вимірювань C , матриця коваріацій шуму вимірювача має вигляд:

$$L_k = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Отже, використовуючи апріорну інформацію про перехідну матрицю, вектор початкового стану, матриці коваріацій стану системи та шумів вимірювача на першому кроці ($k = 1$), ФК дає змогу рекурентно оцінити стан ГГ, крок за кроком уточнюючи елементи вектора $\hat{x}_{k/k}$.

Інший варіант розв'язку задачі ідентифікації на основі методу найменших квадратів має вигляд [2, 8]:

$$\hat{\alpha}_\Pi = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* l_{\alpha\Pi,i}; \quad \hat{\alpha}_C = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* l_{\alpha C,i}; \quad \hat{\alpha}_S = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* l_{\alpha S,i}.$$

У цьому випадку для визначення вектора стану чутливого елементу використовуються постійні коефіцієнти $l_{\alpha\Pi,j}$, $l_{\alpha C,j}$, $l_{\alpha S,j}$, $j = (n - k + 1), n$. Ці коефіцієнти залежать від частоти коливань ЧЕ ω_0 , коефіцієнта згасання ξ_1 , частоти $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \xi_1^2}$, що використовується в алгоритмі ідентифікації, інтервалу часу δ_d між відліками, що надходять від ДК.

Усі перераховані величини можуть бути визначені з деякою похибкою та змінюватися на декілька відсотків під дією різних дестабілізуючих факторів у процесі експлуатації засобів вимірювань лінійних прискорень. Окрім того, кількість k відліків кута, що використовується для розрахунку вектора стану, також може бути обрана різною в залежності від потрібної швидкості та просторової роздільної здатності засобів вимірювань. Усе це вимагає адаптації та оптимального настроювання параметрів в алгоритмах оцінювання для зменшення додаткової похибки вимірювань, обумовленої складними та нестационарними умовами вимірювань.

Адаптація та оптимальне настроювання параметрів алгоритму оцінки можуть бути виконані в

процесі адаптації та навчання штучної нейронної мережі, на основі якої пропонується реалізовувати алгоритм оцінки. Вбудовані алгоритми та методи настроювання вагових коефіцієнтів мережі і є головною перевагою штучної нейронної мережі у порівнянні зі звичайними неадаптивними засобами обробки вимірюваної інформації [11, 12].

Для оцінки вектора стану чутливого елемента будемо використовувати штучну нейронну мережу, що складається з ліній затримки та трьох адаптивних лінійних нейронів (рис. 1). Навчання такої мережі та настроювання її вагових коефіцієнтів будемо виконувати на основі навчального правила Відроу-Хоффа, що є модифікацією методу найменших квадратів [11].

Ступінь наближення вихідного сигналу мережі $\hat{Z}_N = (\hat{\alpha}_\Pi, \hat{\alpha}_C, \hat{\alpha}_S)^T$ до точного значення $Z_N = (\alpha_\Pi, \alpha_C, \alpha_S)^T$ може бути оцінений функціоналом якості роботи мережі. Наприклад, для першого виходу мережі цей функціонал $J_{\alpha\Pi} = E[F(\Delta_{\alpha\Pi}(\alpha_n, \hat{\alpha}_\Pi, \tilde{c}))] \rightarrow \min$, де $E[F(\Delta_{\alpha\Pi}(\alpha_n, \hat{\alpha}_\Pi, \tilde{c}))]$ – математичне сподівання функції втрат $F(\Delta_{\alpha\Pi}) = (\Delta_{\alpha\Pi})^2$ від помилки $\Delta_{\alpha\Pi} = \hat{\alpha}_\Pi - \alpha_\Pi$ мережі. Результатом навчання є оптимальний вектор коефіцієнтів $c^* = (l_{\alpha\Pi, n}^*, l_{\alpha\Pi, n-1}^*, \dots, l_{\alpha\Pi, n-k+1}^*)^T$, що мінімізує функціонал $J_{\alpha\Pi}$ та враховує вплив дестабілізуючих факторів і нестационарних умов вимірювань. Значення $\tilde{c} = c^*$ може бути знайдено з рівняння $\nabla J_{\alpha\Pi}(\tilde{c}) = E[\nabla F(\Delta_{\alpha\Pi}(\tilde{c}))] = 0$.

Рекурентний алгоритм навчання штучної нейронної мережі:

$$\tilde{c}(q) = \tilde{c}(q-1) - \Gamma(q) \times \nabla F(\Delta_{\alpha\Pi}(\alpha_{n\Pi}, \hat{\alpha}_\Pi, \tilde{c}(q-1)), \tilde{c}(q-1)), \quad (19)$$

де $q=1, N_{\text{навч}}$ – номер кроку рекурентного алгоритму навчання з сигналом $\alpha_{n\Pi}$; $N_{\text{навч}}$ – тривалість процедури навчання (загальна кількість кроків); $\Gamma(q)$ – матриця підсилення, що впливає на швидкість процедури навчання,

$$\frac{\partial F}{\partial l_{\alpha\Pi, n}} = \frac{\partial (\Delta_{\alpha\Pi}^2)}{\partial l_{\alpha\Pi, n}} = -2\alpha_{n,r} \left(\alpha_{n\Pi} - \sum_{j=n-k+1}^n \alpha_{n,j} l_{\alpha\Pi j} \right) = -2\alpha_{n,r} (\alpha_{n\Pi} - \hat{\alpha}_\Pi). \quad (20)$$

Підставляючи (20) у (19), отримуємо:

$$\tilde{c}(q) = \tilde{c}(q-1) + \Gamma(q) \cdot 2\alpha_{n,r} \cdot (\alpha_{n\Pi} - \hat{\alpha}_\Pi), \quad (21)$$

На основі (21) отримуємо остаточний вираз для обчислення вагових коефіцієнтів нейронів в процесі навчання для кожного з виходів мережі:

$$\tilde{l}_{\alpha\Pi, j}(q) = \tilde{l}_{\alpha\Pi, j}(q-1) + 2\alpha_{n,r} \cdot (\alpha_{n\Pi} - \hat{\alpha}_\Pi) \cdot \gamma_n / \|\alpha_n\|;$$

$$\tilde{l}_{\alpha C, j}(q) = \tilde{l}_{\alpha C, j}(q-1) + 2\alpha_{n,r} \cdot (\alpha_{nC} - \hat{\alpha}_C) \cdot \gamma_n / \|\alpha_n\|;$$

$$\tilde{l}_{\alpha S, j}(q) = \tilde{l}_{\alpha S, j}(q-1) + 2\alpha_{n,r} \cdot (\alpha_{nS} - \hat{\alpha}_S) \cdot \gamma_n / \|\alpha_n\|,$$

де $\|\alpha_n\| = \alpha_n^T \cdot \alpha_n$ – евклідова норма вектору відліків навчального сигналу на вході мережі.

Ознакою завершення процедури навчання штучної нейронної мережі є виконання умов:

$$\alpha_{n\Pi} - \hat{\alpha}_{n\Pi}(q) \leq \varepsilon_{\alpha\Pi}; \quad \alpha_{nC} - \hat{\alpha}_{nC}(q) \leq \varepsilon_{\alpha C};$$

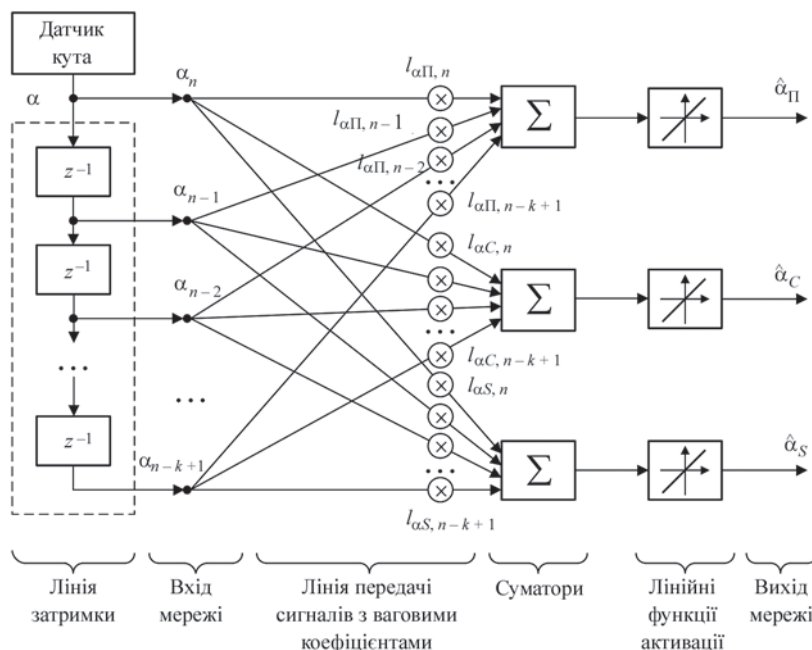


Рис. 1. Структурна схема оцінки вектора стану вимірювача лінійних прискорень на основі штучної нейронної мережі

$$\alpha_{HS} - \hat{\alpha}_{HS}(q) \leq \varepsilon_{\alpha S}, \quad (22)$$

де $\varepsilon_{\alpha\Pi}$, $\varepsilon_{\alpha C}$, $\varepsilon_{\alpha S}$ – допустимі значення похибки оцінки стану вектора стану вимірювача лінійних прискорень (похибки виходу штучної нейронної мережі). Будемо вважати, що $\varepsilon_{\alpha\Pi} = \varepsilon_{\alpha C} = \varepsilon_{\alpha S}$. Тоді для математичної моделі (2) середньоквадратичне значення похибки сигналу $\alpha(t)$, обумовлене похибками (22), дорівнює: $\sigma_{\alpha} = \varepsilon_{\alpha\Pi} / \sqrt{3} \leq \sigma_{\text{ДК}} / 3$, де $\sigma_{\text{ДК}}$ – середньоквадратичне значення похибки ДК. Звідси:

$$\alpha_{\Pi} - \hat{\alpha}_{\Pi}(q) \leq \sigma_{\text{ДК}} / \sqrt{3};$$

$$\alpha_{\text{HC}} - \hat{\alpha}_{\text{HC}}(q) \leq \sigma_{\text{ДК}} / \sqrt{3};$$

$$\alpha_{\text{HS}} - \hat{\alpha}_{\text{HS}}(q) \leq \sigma_{\text{ДК}} / \sqrt{3}.$$

Ці співвідношення визначають завершення процедури навчання штучної нейронної мережі та гарантують теоретично обчислену точність оцінок вектора стану вимірювачів лінійних прискорень у несприятливих і нестационарних умовах вимірювань.

Висновки

Ефективним шляхом підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень є ідентифікація стану ЧЕ цих вимірювачів на основі алгоритмічних методів. Отримано розв'язок задачі ідентифікації на основі фільтра Калмана у реальному часі. Це дозволяє оцінити вектор стану ЧЕ при наявності завад детермінованого та випадкового характеру.

Пропонується реалізація алгоритму ідентифікації на основі штучної нейронної мережі. Адаптація та оптимальне настроювання параметрів алгоритму можуть бути виконані в процесі адаптації та навчання цієї мережі. Для оцінки вектора стану ЧЕ розроблено схему, що складається з ліній затримки та трьох адаптивних лінійних нейронів. Результатом є зменшення додаткової похибки вимірювань, обумовленої складними та нестационарними умовами вимірювань.

Напрямок подальших досліджень може бути теоретична оцінка похибок математичної моделі по відношенню до рівняння руху ЧЕ. У подальшому також доцільно розглянути можливості використання інших типів штучних нейронних мереж для компенсації додаткової похибки вимірювань параметрів руху ЧЕ. Отримані результати можуть бути використані для побудови високоточних навігаційних та гравіметричних систем.

Список літератури

1. Коломієць Л.В. та ін. (2009) *Метрологія у галузі зв'язку. Книга 1. Загальні електрорадіовимірювання: Посібник*. Одеса, ТОВ «ВМВ».

2. Безвесільна О.М. (2007) *Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Підручник*. Житомир, ЖДТУ.

3. Shi, D., Tylavsky, D.J., Logic, N. (2012) An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1575–1583. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2207468>

4. Кириченко Е. (2003) Эффективность аддитивной и мультипликативной коррекции погрешностей при диагностировании. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*, наук.-техн. зб., Вип. 6, 20–24.

5. Яцук В.О., Малахівський П.С. (2008) *Методи підвищення точності вимірювань: Підручник*. Львів, Бескид Біт.

6. Болоух В.Ф., Вінніченко О.І. (2019) *Балістичний гравіметр для симетричного та несиметричного способів вимірювань прискорення вільного падіння*. Патент на винахід 118620 Україна, МПК G01V 7/14 (2006.01). № а 2017 06239; заявл. 19.06.2017; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.

7. KalmanFilter.NET [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kalmanfilter.net/default.aspx>

8. Безвесільна О.М. (2001) *Вимірювання прискорень: Підручник*. Київ, Либідь.

9. Коваль А.В. (2018) *Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів: Навчальний посібник*. Житомир, ЖДТУ.

10. Дубовой В.М. (2005) *Моделювання систем контролю та керування: Навчальний посібник*. Вінниця, ВНТУ.

11. Руденко О.Г., Бодяньський Є.В. (2006) *Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник*. Харків, ТОВ «Компанія СМІТ».

12. Зайченко Ю.П. (2004) *Основи проектування інтелектуальних систем: Навчальний посібник*. Київ, Видавничий дім «Слово».

References

1. Kolomiets, L.V. et al. (2009) *Metrology in the field of communications. Book 1. General electro-radio measurements: Manual*. Odesa, LLC «VMV» [in Ukrainian].

2. Bezvesilna, O.M. (2007) *Aviation gravimetric systems and gravimeters: Manual*. Zhytomyr, ZhDTU [in Ukrainian].

3. Shi, D., Tylavsky, D.J., Logic, N. (2012) An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements. *IEEE Transact. on Smart Grid*, 3(4), 1575–1583. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2207468>

4. Kirichenko, Ye. (2003) Effectiveness of additive and multiplicative correction of errors in diagnosis. *Legal, regulatory and metrological support of the information protection system in Ukraine: Sci.-Tekh. Coll.*, Issue 6, 20–24 [in Russian].

5. Yatsuk, V.O., Malachivskiy, P.S. (2008) *Methods for increasing measurement accuracy: Manual*. Lviv, Beskyd Bit [in Ukrainian].

6. Bolyukh, V.F., Vinnichenko, O.I. (2019) Ballistic gravimeter for symmetric and asymmetric methods of measuring the acceleration of free fall. Patent 118620 Ukraine, Int. Cl. G01V 7/14 (2006.01). No. a 2017 06239; fill. 19.06.2017; publ. 11.02.2019 [in Ukrainian].

7. KalmanFilter.NET. <https://www.kalmanfilter.net/default.aspx>

8. Bezvesilna, O.M. (2001) *Measurement of accelerations: Manual*. Kyiv, Lybid [in Ukrainian].

9. Koval, A.V. (2018) *Identification and modeling of technological objects: Textbook*. Zhytomyr, ZhDTU [in Ukrainian].

10. Dubovoj, V.M. (2005) Modeling of monitoring and control systems: *Textbook*. Vinnytsya, VNTU [in Ukrainian].

11. Rudenko, O.G., Bodiansky, E.V. (2006) *Artificial neural networks: Manual*. Kharkiv, LLC «SMIT Company» [in Ukrainian].

12. Zaichenko, Yu.P. (2004) *Fundamentals of designing intelligent systems: Manual*. Kyiv, Slovo [in Ukrainian].

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHMIC METHOD FOR IDENTIFICATION OF THE STATE VECTOR OF A SENSITIVE ELEMENT

O.M. Bezvesilna, T.O. Tolochko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: prilad168t@gmail.com; asnk@kpi.ua

Today, the use of algorithmic methods for increasing the accuracy of gravimetric and navigation systems is extremely promising and relevant. This requires the creation of highly accurate and effective algorithmic methods for processing the output signal of linear acceleration meters. The use of an artificial neural network is proposed to increase the accuracy of measurements in non-stationary and adverse conditions, which is accompanied by the appearance of a number of interferences that are added to the output signal of the sensitive element of these meters. All these features were taken into account when developing algorithms for identifying the state of linear acceleration meters with increased metrological characteristics. The development of an algorithmic method for identifying the state vector of the sensitive element of linear acceleration meter ensures an increase in the accuracy of such meters in adverse and non-stationary measurement conditions. The solution of the identification problem based on the Kalman filter in real time is obtained. This allows to estimate the state vector of the sensitive element in the presence of deterministic and random interference. The implementation of the identification algorithm based on an artificial neural network is also proposed. The adaptation and optimal tuning of the algorithm parameters are performed in the process of adaptation and training of this network. To estimate the state vector of the sensitive element, a scheme consisting of delay lines and three adaptive linear neurons has been developed. The result is a reduction in the additional measurement error caused by complex and non-stationary measurement conditions. 12 Ref., 1 Fig.

Keywords: algorithmic methods, identification, state vector, artificial neural network, Kalman filter

Отримано 26.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 24.12.2024

Прийнято 10.03.2025

ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.				
	місяць	два місяця	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-2374 (Print). ISSN 3041-234X (Online). Передплатний індекс 70031	–	300	–	900	1800
«Сучасна електromеталургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-238 (Print). ISSN 3041-2331 (Online). Передплатний індекс 70693	–	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2366 (Print). ISSN 3041-2358 (Online). Передплатний індекс 74475	–	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X (Print). ISSN 3041-2293 (Online). Передплатний індекс 21971.	600	1200	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

** 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 електromеталургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр», «Меркурій» 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. На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 рр.

Адреса видавництва

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com

ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ІЗ КОМБІНОВАНИМ НАМАГНІЧУВАННЯМ

Г.М. Сучков, С.Ю. Плєснецов, М.Е. Кальницький, Ю.Ю. Кошкарів, І.М. Олексенко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.
E-mail: suchkov@gmail.com

Застосування в промисловості методів і засобів збудження ультразвукових імпульсів поперечних хвиль за допомогою електромагнітно-акустичних перетворювачів знаходить все більше застосування. Проте перетворювачі на основі постійних потужних магнітів мають недоліки, які полягають у сильному їх притяганні до феромагнітних виробів і в налипанні феромагнітних часток, що призводить до спотворення результатів неруйнівного контролю та зниження чутливості. З часом поступово такі магніти втрачають свої магнітні властивості. Відомі перетворювачі з імпульсним намагнічуванням можуть працювати з незначними частотами зондування з-за нагрівання. Запропоновано використати одночасно постійні магніти з відносно невеликою індукцією магнітного поля і додаткове імпульсне намагнічування. Таке технічне рішення підвищує чутливість контролю та значно знижує притягання перетворювача до феромагнітного виробу, а також дає можливість суттєво збільшити частоту зондування об'єкта контролю. Бібліогр. 16, рис. 5.

Ключові слова: феромагнітний виріб, неруйнівний контроль, ультразвукові імпульси, електромагнітно-акустичний перетворювач, магнітне поле, імпульсне намагнічування

Вступ. Для неруйнівного контролю металовиробів, найчастіше феромагнітних, часто використовують імпульси ультразвукових хвиль [1]. При традиційному контролі з використанням контактної рідини з поверхні об'єктів необхідно видаляти іржу, фарбу, бруд тощо [1–3], що призводить до значних матеріальних втрат. Проблему дозволяє вирішити використання електромагнітно-акустичного (ЕМА) способу збудження та прийому ультразвукових імпульсів [2, 4–6], для якого нема потреби у спеціальному зачищенні поверхні металовиробів, таких як труби, листи, заготовки тощо.

Відомо, що чутливість ЕМА способу збудження та прийому ультразвукових імпульсів квадратично залежить від величини індукції магнітного поля [4–5]. Тому багато фахівців розроблюють ЕМА перетворювачі (ЕМАП) із джерелами магнітного поля великої потужності [7]. Проте виникає протиріччя. З однієї сторони, чутливість ЕМАП зростає, а з іншої – суттєво збільшується сила притягання ЕМАП до об'єкта контролю (ОК), виготовленого з феромагнітного матеріалу. Окрім того, на ЕМАП налипають відлучені феромагнітні частки, наприклад окалина, що призводить до формування потужних завад [8]. Для виключення вказаних недоліків багато дослідників пропонують використовувати імпульсні джерела магнітного поля [9–16], які мають можливість отримати потужне магнітне поле при струмах живлення імпульсних магнітів 2...3 кА. Але котушки імпульсного джерела швидко нагріваються [9], що не дає можливості викону-

вати дефектоскопію та товщинометрію ОК із необхідною частотою зондування металовиробу.

У даній роботі наведено результати вдосконалення ЕМАП шляхом використання постійного магніту невеликої потужності та імпульсного намагнічування при живленні котушок джерела магнітного поля силою струму меншою, ніж 2 кА. Такий підхід дозволяє значно зменшити вищевказані недоліки відомих ЕМАП.

Мета досліджень – порівняльний аналіз чутливості ЕМАП із комбінованим намагнічуванням.

ЕМАП із комбінованим намагнічуванням і методика його дослідження. Розглянемо як приклад суміщений ЕМАП для збудження та прийому імпульсів ультразвукових зсувних хвиль у феромагнітному металовиробі нормально до його поверхні. Основу ЕМАП, що пропонується, складає джерело магнітного поля (ДМП), яке можливо відобразити так, як це наведено на рис. 1. У найпростішому варіанті це постійний магніт та котушка імпульсного намагнічування.

Очевидно, що елементи ДМП повинні відповідати низці вимог: матеріал постійного магніту повинен бути стійким до нагрівання та мати низьку електропровідність; розміри постійного магніту повинні забезпечувати переважну орієнтацію вектора індукції магнітного поля нормально до поверхні ОК (перетин полюса магніту повинен знаходитися в інтервалі $30 \times 30 \dots 50 \times 50$ мм², висота 50...60 мм [9]) і заданою робочою зоною дії магніту, що перекриває робочу зону високочастотної

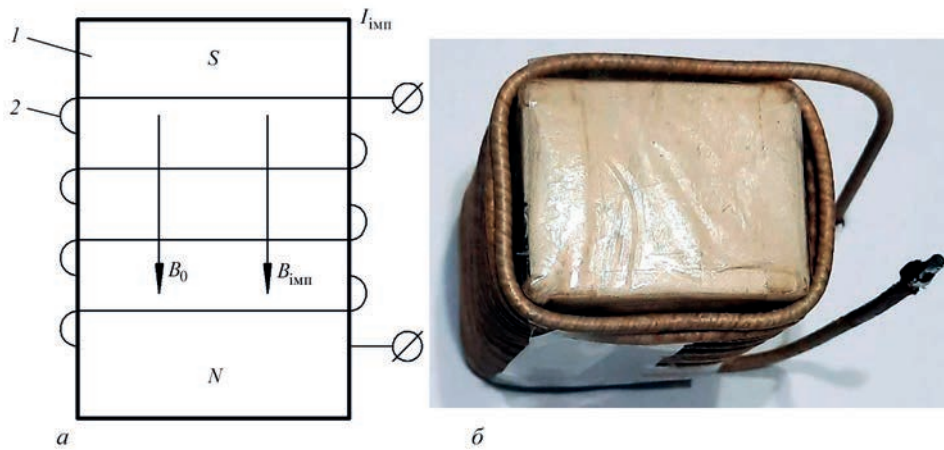


Рис. 1. Спрощене зображення джерела магнітного поля, вектор індукції якого орієнтується нормально до поверхні феромагнітного металовиробу: конструкція ДМП (а) та його зображення (б); 1 – постійний магніт; 2 – котушка імпульсного намагнічування; B_0 – величина індукції магнітного поля, що створена у котушці імпульсного намагнічування; $B_{\text{имп}}$ – величина індукції імпульсного магнітного поля

котушки індуктивності [4]; котушка імпульсного намагнічування повинна мати мінімальну індуктивність, що необхідно для формування короткого імпульсу намагнічування.

Спрощений макет суміщеного ЕМАП на базі джерела магнітного поля з комбінованим намагнічуванням може бути виконано наступним чином (рис. 2). Стрілками в об'ємі феромагнітного електропровідного металовиробу показані напрямки поширення ультразвукових імпульсів.

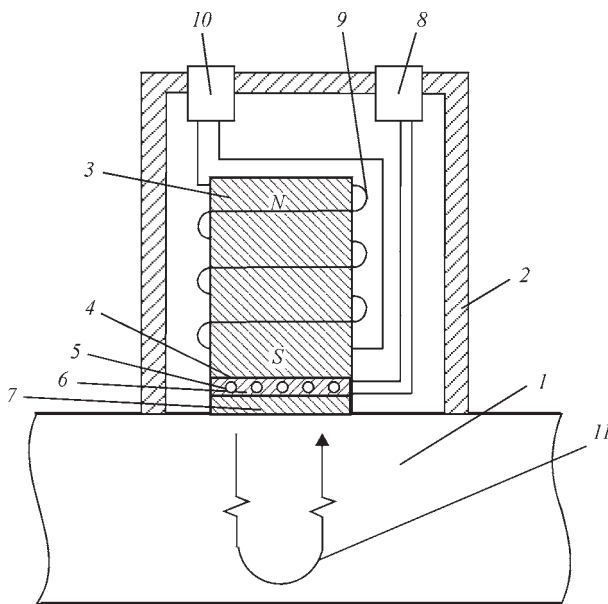


Рис. 2. Спрощена конструкція ЕМАП із постійним та імпульсним намагнічуванням: 1 – феромагнітний електропровідний металовиріб; 2 – корпус; 3 – постійний магніт; 4 – полюс постійного магніту; 5 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 6 – діелектрична основа; 7 – захисний протектор; 8 – електричний з'єднувач для живлення високочастотної котушки індуктивності; 9 – котушка імпульсного намагнічування; 10 – електричний з'єднувач для живлення котушки імпульсного намагнічування; 11 – імпульси ультразвукових хвиль в ОК

Для виконання досліджень було виготовлено макет (спрощений блок), схему якого наведено на рис. 3. Джерело магнітного поля складається з постійного магніту 1 на основі металокераміки NeFeV, на якому намотана котушка 2 намагнічування (див. рис. 1). Котушка живиться від блоку 3 імпульсами струму намагнічування. Високочастотна котушка 4 індуктивності живиться високочастотними імпульсами струму від блоку 5. Збуджені у виробі 6 ультразвукові імпульси 7 відбиваються з об'єму металу та приймаються високочастотною котушкою 4. Прийняті з виробу 6 ультразвукові імпульси 7 посилюються блоком 8, з якого вони надходять на блок 9, де оброблюються та візуалізуються. Управління та синхронізацію роботи елементів стану виконує блок 10. $B_{\text{имп}} + B_0$ – напрямок вектора індукції результуючого магнітного поля.

При дослідженнях розміри постійного магніту склали $30 \times 40 \times 60$ мм. Матеріал магніту виготовлений на основі NeFeV. Котушка імпульсного магніту мала 21 виток дроту діаметром 2,4 мм. Відстань від полюса джерела магнітного поля до поверхні ОК зі сталі ст.45 завтовшки 39 мм скла-

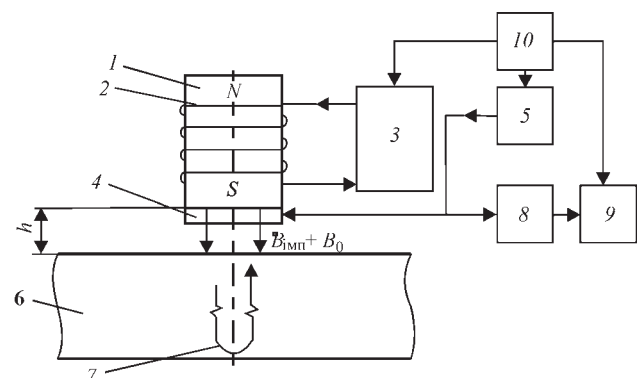


Рис. 3. Стенд для досліджень можливостей ЕМАП із комбінованим намагнічуванням

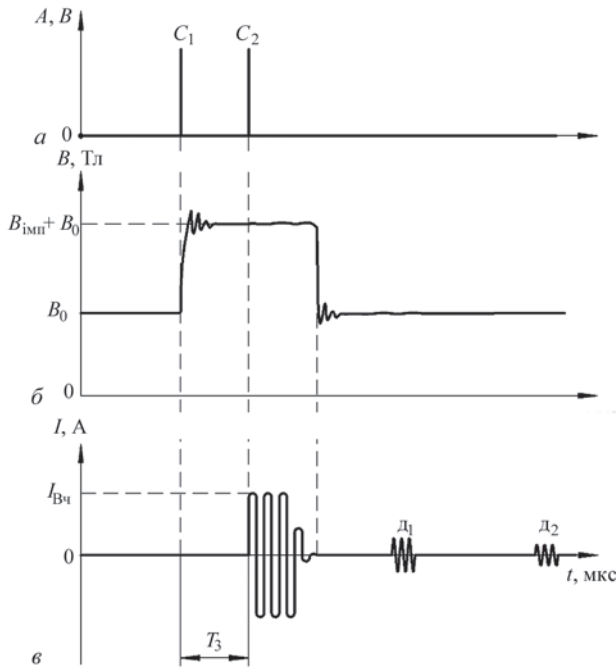


Рис. 4. Функціональна схема роботи стенду з комбінованим намагнічуванням ОК одним циклом зондування ультразвуковими імпульсами

дала 10,6 мм. Піковий струм у котушці намагнічування досягав 270 А. Затримка високочастотного пакетного імпульсу відносно початку імпульсу намагнічування перевищує 50 мкс. Тривалість пакетного високочастотного імпульсу дорівнювала трьом періодам частоти заповнення 2,3 МГц.

На рис. 4 наведено функціональну схему роботи стенду з комбінованим намагнічуванням.

Стенд працює наступним чином. ЕМАП розміщується над поверхнею ОК б, так що відстань від полюса постійного магніту 1 до металовиробу б складає h (як правило, кілька міліметрів). У поверхневому шарі ОК формується постійне магнітне поле B_0 . Блок 10 управління та синхронізації подає на блок 3 синхронізуючий імпульс C_1 (рис. 4, а). Блок 3 збуджує в котушці 2 намагнічування імпульс струму часовою тривалістю в

кілька десятків мікросекунд, який збуджує в поверхневому шарі ОК індукцію $B_{\text{имп}}$. Магнітні поля, створені котушкою 2 намагнічування та магнітом 1, співпадають за напрямком і складаються з $B_{\text{имп}} + B_0$ (рис. 4, б). Далі блок 10 управління та синхронізації подає на блок 5 синхронізуючий імпульс C_2 (рис. 4, а) із затримкою T_3 , який збуджує у високочастотній котушці 4 індуктивності пакетний імпульс високочастотного струму. У результаті в поверхневому шарі ОК б у зоні дії $B_{\text{имп}} + B_0$ збуджується високочастотний вихровий струм $I_{\text{вч}}$ (рис. 4, в). Взаємодія магнітного поля $B_{\text{имп}} + B_0$ і вихрового струму $I_{\text{вч}}$ у поверхневому шарі ОК б за рахунок електромагнітно-акустичного перетворення призводить до збудження ультразвукових пакетних імпульсів у металовиробі (рис. 3 поз. 7). Відбиті з ОК б ультразвукові імпульси, наприклад донні сигнали D_1 і D_2 , приймаються високочастотною котушкою індуктивності 4 за рахунок зворотного електромагнітно-акустичного перетворення. Прийняті та перетворені котушкою 4 електричні імпульси, що несуть інформацію про якість металовиробу б, посилюються блоком з низьким шумом 8 (рис. 3), з якого вони надходять на блок 9, де оброблюються та візуалізуються.

У результаті за рахунок додаткового магнітного поля $B_{\text{имп}}$ потужність збудженого ультразвукового імпульсу суттєво збільшується і, відповідно, чутливість ультразвукового контролю підвищується, оскільки збільшується відношення амплітуди корисного сигналу по відношенню до амплітуди шуму. Такий висновок підтверджується результатами експериментальних досліджень (рис. 5), виконаних із використанням стенду (рис. 3).

З аналізу даних, отриманих при експериментальних дослідженнях, встановлено, що збільшення амплітуди донних імпульсів за рахунок використання імпульсного намагнічування, досягло 40 %. Тобто чутливість контролю феромагнітних металовиробів підвищується. Окрім того, сила притя-

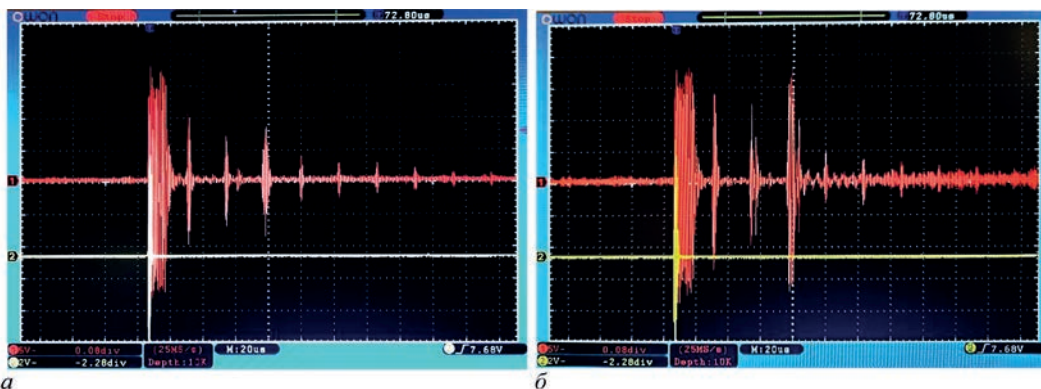


Рис. 5. Реалізації з послідовностями перевідбитих в ОК донних імпульсів, що отримані при відсутності імпульсного намагнічування (а) і при сумісній роботі постійного та імпульсного намагнічування (б)

гання магніту до ОК зменшилася, що поліпшило процес сканування оператором поверхні феромагнітного ОК портативним ЕМАП.

Висновки

Встановлено, що для підвищення чутливості контролю доцільно використовувати джерело магнітного поля з одночасним використання постійного та імпульсного магнітного поля.

Для забезпечення підвищення амплітуди корисного сигналу по відношенню до шумів необхідно затримувати дію високочастотного імпульсу по відношенню до початку імпульсу намагнічування не менше ніж на 50 мкс.

Використання додаткового імпульсного намагнічування дає можливість підвищити амплітуду донних імпульсів по відношенню до заводів до 40 % при зазорах між поверхнею ОК і ДМП більше 10 мм.

При такому технічному рішенні сила притискування ЕМАП до феромагнітного ОК зменшується, що поліпшило процес сканування оператором поверхні феромагнітного ОК портативним ЕМАП.

Список літератури

1. Троїцький В.О. (2023) Борис Патон фундатор науки з дефектоскопії та моніторингу конструкцій. НК інформ, Київ, Інтерсервіс.
2. Український науково-дослідного інститут неруйнівного контролю [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.autondt.com/>.
3. Познякова М.Є. (2021) Ультразвуковий метод та засіб для виявлення внутрішніх дефектів залізничних осей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 24 с.
4. Десятніченко О.В. (2015) Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями: дис. канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 172 с.
5. Плеснецов С.Ю. (2021) Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.11.13. Харків, 40 с.
6. Innerspec Website [electronic source]. URL: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors>.
7. Суворова М.Д. (2019) Розробка намагнічувальних джерел для ЕМА перетворювачів на основі потужних постійних магнітів. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворююча техніка, 1, 63–73.
8. Сучков Г.М. (2005) Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.11.13. НТУ ХПІ. Харків, 37 с.
9. Донченко А.В., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Кропачек О.Ю. (2024) Накладний суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач з імпульсним намагнічуванням для контролю феромагнітних металовиробів. Патент на корисну модель № 156088. Заявка № U202304534 від 25.05.2023 р. Опубл. 08.05.2024. Бюл. № 19.
10. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. (2014) Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet. In: *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT)*, Chengdu, China, 20–23 June 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272>
11. Hernandez-Valle, F., Dixon, S. (2011) Pulsed electromagnet EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 53(2), 96–99. DOI: <https://doi.org/10.1784/insi.2011.53.2.96>

12. Ogata, S., Uchimoto, T., Takagi, T., Dobmann, G. (2018) Development and performance evaluation of a high-temperature electromagnetic acoustic transducer for monitoring metal processing. *Int. J. Appl. Electrom.*, 58(3), 309–318. DOI: <https://doi.org/10.3233/JAE-180016>
13. Hernandez-valle, F., Dixon, S. (2010) Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet. *NDT & E International*, 4(2), 171–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.10.009>
14. Guofu Zhai, Bao Liang, Xi Li et al. (2022) High-temperature EMAT with doublecoil configuration generates shear and longitudinal wave modes in paramagnetic steel. *NDT & E International*, 125, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102572>
15. Salam Bussi, Suchkov, G., Mygushchenko, R. et al. (2019) Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic measurements, testing and diagnostics of ferromagnetic metal products. *Український метрологічний журнал*, 4, 41–49. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2019.195956>
16. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang et al. (2020) Electromagnetic acoustic detection of steel plate defects based on high-energy pulse excitation. *Applied Sciences*, 10(16), 5534. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10165534>

References

1. Troitskiy, V.O. (2023) *Boris Paton, founder of the science of flaw detection and structural monitoring*. Kyiv, Interservis [in Ukrainian].
2. Ukrainian science and research Institute of non-destructive testing. URL: <https://www.autondt.com/> [in Ukrainian].
3. Pozniakova, M.Ye. (2021) Ultrasonic method and tool for detecting internal defects in railway axles. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*. Kharkiv [in Ukrainian].
4. Desiatnichenko, O.V. (2015) Electromagnetic-acoustic thickness gauge for checking metal products with dielectric coatings. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*. Kharkiv [in Ukrainian].
5. Pliesnetsov, S.Yu. (2021) Development of methods and tools for electromagnetic-acoustic testing of rod, tubular and sheet metal products. In: *Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree*. Kharkiv [in Ukrainian].
6. Innerspec Website URL: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors>
7. Suvorova, M.D. (2019) Development of magnetization sources for EMO converters on the basis of powerful permanent magnets. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Elektroenerhetyka ta Peretvoriuvalna Tekhnika*, 1, 63–73 [in Ukrainian].
8. Suchkov, H.M. (2005) Development of the theory and practice of creating devices for electromagnetic-acoustic control of metal products. In: *Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree*. KhPI, Kharkiv [in Ukrainian].
9. Donchenko, A.V., Myhushchenko, R.P. Suchkov, H.M., Kropachek O.Yu. (2024) Surface-mounted combined electromagnetic-acoustic transducer with pulsed magnetization for inspection of ferromagnetic metal products. Utility model patent 156088, U202304534, fill. 25.05.2023, publ. 08.05.2024 [in Ukrainian].
10. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. (2014) Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet. In: *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT)*, Chengdu, China, 20–23 June 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272>
11. Hernandez-Valle, F., Dixon, S. (2011) Pulsed electromagnet EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 53(2), 96–99. DOI: <https://doi.org/10.1784/insi.2011.53.2.96>
12. Ogata, S., Uchimoto, T., Takagi, T., Dobmann, G. (2018) Development and performance evaluation of a high-temperature electromagnetic acoustic transducer for monitoring metal processing. *Int. J. Appl. Electrom.*, 58(3), 309–318. DOI: <https://doi.org/10.3233/JAE-180016>
13. Hernandez-valle, F., Dixon, S. (2010) Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet. *NDT & E Intern.*, 4(2), 171–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.10.009>
14. Guofu Zhai, Bao Liang, Xi Li, Yuhang Ge, Shujuan Wang (2022) High-temperature EMAT with double coil configuration generates shear and longitudinal wave modes in para-

- magnetic steel. *NDT & E Intern.*, **125**, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102572>
15. Salam Bussi, Suchkov, G., Mygushchenko, R., Kropachek, O., Plesnetsov, S. (2019) Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic measurements, testing and diagnostics of ferromagnetic metal products. *Ukrainskyi Metrolohichnyi Zh.*, **4**, 41–49. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2019.195956>
16. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin, Qingxin Yang (2020) Electromagnetic acoustic detection of steel plate defects based on high-energy pulse excitation. *Appl. Sci.*, **10**(16), 5534. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10165534>

ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC CONVERTER WITH COMBINED MAGNETIZATION

H.M. Suchkov, S.Yu. Pliesnetsov, M.Ye. Kalnitskyi, Yu.Yu. Koshkarov, I.M. Oleksenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kyrpichova Str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: suchkov@gmail.com

The use in industry of methods and means of excitation of transverse waves ultrasonic pulses using electromagnetic-acoustic converters is becoming increasingly widespread. However, converters based on permanent powerful magnets have disadvantages, which consist in their strong attraction to ferromagnetic products and in the adhesion of ferromagnetic particles, which leads to distortion of the results of non-destructive testing and a decrease in sensitivity. Over time, such magnets gradually lose their magnetic properties. Known converters with pulse magnetization can only operate with low probing frequencies due to heating. It is proposed to use permanent magnets with a relatively low magnetic field induction and additional pulse magnetization simultaneously. Such a technical solution increases the sensitivity of the inspection and significantly reduces the attraction of the converter to the ferromagnetic product, and also makes it possible to significantly increase the frequency of probing the control object. 16 Ref., 5 Fig.

Keywords: ferromagnetic product, non-destructive testing, ultrasonic pulses, electromagnetic-acoustic converter, magnetic field, pulsed magnetization

Отримано 29.01.2025

Отримано у переглянутому вигляді 13.02.2025

Прийнято 25.03.2025

27–29
травня
2025



XXIII МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

Місце проведення: Україна, м. Київ, МВЦ, Броварський пр-т, 15

НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ СЕМІНАРИ

«3D ДРУК МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ»

27 травня 2025 р.

модератор семінару д.т.н., проф. В.В. Квасницький

«НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ»

28 травня 2025 р.

модератор семінару Ю.М. Посипайко

Запрошуємо взяти участь в роботі науково-практичних семінарів «3D друк металевих виробів» та «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану», які будуть проведені під час роботи XXIII Міжнародного промислового форуму (м. Київ, Броварський проспект, 15).

Для участі в роботі семінарів необхідно надіслати заявку в Оргкомітет (участь безкоштовна).

Контрольні дати.

Подання заявок та тез/доповідей до 30.04.2025

Подання заявок без доповіді до 26.05.2025

Розсилка програм семінарів до 15.05.2025

Час та місце проведення семінарів буде наведено в програмах.

Вартість публікації.

Одна сторінка в збірці тез/доповідей – 150 грн.

Надання індексу DOI для тези/доповіді – 150 грн.

Надання сертифіката учасника – 100 грн.

Рахунок для оплати надається за запитом учасника.

До початку семінарів буде видано збірку тез/доповідей. Об'єм публікацій необмежений.

Збірку тез/доповідей в електронному вигляді буде розміщено за посиланням <http://ip.if.ua/ukr/3D-NDT-2025>.

Тривалість доповідей до 20 хвилин (15 хвилин на доповідь і 5 хвилин на обговорення). Презентація доповідей на мультимедійному проекторі.

Організатори.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

НАН України

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Оргкомітет.

Олександр Зельніченко, тел.: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua, patonpublishinghouse@gmail.com

<http://ip.if.ua/ukr/3D-NDT-2025>

БАГАТОШАРОВІ КОМПОЗИТНІ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМИ ЗАПОБІГАННЯ ЗЛЕДЕНІННЮ ЛІТАКА

М.Л. Казакевич¹, О.І. Семенець², В.М. Казакевич³

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: kazakevich.m@gmail.com

²АТ «АНТОНОВ». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1

³ТОВ «НДТ Україна». E-mail: m_kazakevich@ukr.net

Вивільнення від льоду критичних поверхонь літальних апаратів має важливе значення при польотах в умовах зледеніння. Наявність на поверхні літака льодоутворень призводить до порушення рівномірного потоку повітря та погіршення аеродинамічних характеристик поверхонь літака, що значно впливає на безпеку польоту. Розроблено нагрівальні елементи на основі композитних наноструктурованих форм вуглецю, їх оптимізований склад та методи неруйнівного контролю для надання ефективних властивостей системам проти зледеніння. Бібліогр. 6, рис. 3.

Ключові слова: система запобігання зледенінню, нагрівальні елементи, неруйнівний контроль

Вступ. На даний час існують декілька принципів, на яких базуються системи захисту від зледеніння: механічні, хімічні або теплові. Системи проти зледеніння з механічним принципом дії забезпечують видалення льоду внаслідок механічної деформації поверхні, яку захищають. Хімічний захист від зледеніння оснований на подачі на поверхню рідини проти зледеніння, яка утворює з водою розчин з температурою замерзання значно нижче 0 °С. Тепловий принцип застосовується для випаровування води, що осіла, або для відтаювання прошарку льоду, що контактує з поверхнею, яку захищають.

За принципом управління системи проти зледеніння також поділяють на системи постійної дії (запобігання утворенню льоду) та циклічної дії (видалення льоду з поверхні). Ці два принципи поділяють відповідно на anti-icing та de-icing. Для великих транспортних літаків зазвичай застосовують теплові системи проти зледеніння, у той час як механічні та хімічні системи застосовуються переважно в малій авіації.

Необхідна енергія для роботи теплових систем відбирається від двигунів. Існують два типи теплових систем: повітряно-теплові, що використовують гаряче стиснене повітря, а також електротеплові, які працюють від електричної системи літака. Певний тип системи обирають на початкових етапах проєктування з урахуванням аеродинамічних особливостей літака та потужностей, які можна відібрати від двигуна. Системи проти зледеніння повинні забезпечувати необхідний рівень безпеки польотів, а також задану економічність та експлуатаційні характеристики.

Електротеплові системи зазвичай виконують циклічної дії. Це дозволяє покращити економічні характеристики. Основним елементом електротеплової системи є нагрівальні елементи (НЕ), які складаються зі струмопровідного матеріалу, який нагрівається та захищений з усіх сторін діелектриком.

Дротові нагрівальні елементи на основі полімерних матеріалів із використанням нанотрубок, а також нагрівачі із графеном порівняно з сучасними системами характеризуються малою вагою, швидким і рівномірним нагріванням, ефективним енергоспоживанням у порівнянні з металевими системами нагрівання [1, 2].

Циклічні електротермічні системи проти зледеніння періодично видаляють невеликі скупчення льоду, розплавляючи поверхню льоду на високій швидкості за допомогою провідного матеріалу, який виділяє тепло та захищений з усіх боків діелектриком. Плівка стрічок з вуглецевих наноматеріалів досить тонка, щоби забезпечити радіочастотну (РЧ) передачу. Це неметалева, надлегка, міцна та масштабована прозора радіопровідна покриття з використанням нанотрубок або графену може значно зменшити розмір і вартість покриттів проти зледеніння для радіочастотного обладнання. Це важливо для багатьох застосувань в авіації.

Оскільки конструкції сучасних літаків виготовляються з полімерних композитів, армованих вуглецевими волокнами, постає завдання неруйнівного контролю, у тому числі, якості композитної композиції з графеном або вуглецевими нанотрубками. Протизледеніння критичних поверхонь літака є важливим під час польотів в умовах зледеніння. Наявність льодових утворень на поверхні літака призводить до порушення рівномірного

потоків повітря та погіршення аеродинамічних характеристик поверхонь літака, що істотно впливає на безпеку польотів.

Різноманітні нові вуглецеві наноматеріали, включаючи електропровідні композити з вуглецевими нанотрубками та графеном, досліджувалися як нагрівальні елементи в [3, 4]. Нанотрубки мають дуже високу міцність на розрив. Замість того, щоб розриватися або ламатися, УНТ починає перебудовувати свої молекулярні орбіталі, пристосовуючись до нової форми (стаючи більш подовженою, стиснутою або зігнутою).

Метою роботи є розробка матеріалів електропровідної композиції та захисних слоїв НЕ, технології їх виготовлення та неруйнівного контролю НЕ електротеплової системи проти зледеніння для літака.

Авторами розроблено багат шарове покриття «ЕТМ-ЕМКАН» з оптимальним вмістом вуглецевих наноматеріалів, що дозволить ефективно реалізувати технологію захисту конструкцій літака від обмерзання. Багат шарове покриття має: перший ґрунтовий шар електроізоляційного матеріалу (антикорозійний ґрунт) і тепловиділяючий шар, який містить полімерну основу, теплопровідний діелектрик, армуючу основу та вуглецеві наноматеріали, з'єднані з вихідними контактами, та другий ґрунтовий шар електроізоляційного матеріалу і шар авіаційної фарби.

Проаналізовано залежність нагріву композитів із вуглецевих нанотрубок залежно від густини теплового потоку та потужності струму. Визначено оптимальні показники. Температуру поверхні графенової плівки можна легко контролювати, змінюючи енергоспоживання. Запропонована стратегія може стати значним прогресом у впровадженні енергозберігаючих конструкцій у сфері авіаційного транспорту.

Дослідження [5], проведені за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM) для оптимізації складу вуглецевих наповнювачів (графену та вуглецевих нанотрубок) у композиційних матеріалах для створення електропровідних елементів проти зледеніння конструкцій літаків пока-

зали, що нанотрубки забезпечують більший енергетичний ефект.

На рис. 1 показано типові SEM зображення вуглецевих нанотрубок, нанесених з дисперсії в етилацетаті на металеву підкладку. На рис. 1, а в мікрометричному масштабі можна побачити суцільний шар, утворений переплутаними нанотрубками. На зображенні в масштабі сотні мікрометрів спостерігається переривчаста структура з великими агрегатами, які утворюють сітку з порожнинами розміром до сотень мікрон (рис. 1, б). Цей ефект пояснюється агрегацією нанотрубок за рахунок взаємодії функціональних груп на їх поверхні.

За результатами дослідження шару нанотрубок з полімером можна припустити, що наночастинки вуглецю розподілені в полімерній матриці достатньо рівномірно, щоби забезпечити високі функціональні характеристики, необхідні для створення авіаційних систем проти зледеніння.

Відпрацювання на експериментальному стенді та визначення параметрів різних варіантів НЕ для впровадження на літаках. Контроль якості поверхні проводили візуальним і термічним методами. Термічний неруйнівний контроль заснований на реєстрації температурних полів об'єкта контролю. Температурне поле реєструється тепловізором, який дає видиме зображення розподілу температури. Термограма підтверджує якість (рівномірність покриття, відсутність тріщин тощо). Крім того, він дозволяє фіксувати робочу температуру. Термоконтроль використовується на завершальному етапі підключення готових НЕ до електромережі та проводиться тестування.

Полімеризаційну усадку вимірювали згідно з ДСТУ ISO 28199-1:2015. На зразок легкого тканого матеріалу розміром 140×30 мм наносили аерозоль «ЕТМ ЕМКАН». Зразок висували на клейкій поверхні (тефлон) в ексікаторі. Геометричні розміри до нанесення аерозолу та після висихання до ступеня 3 вимірювали штангенциркулем з абсолютною похибкою 0,05 мм. Відносна усадка зразка після висихання складала 2 %.

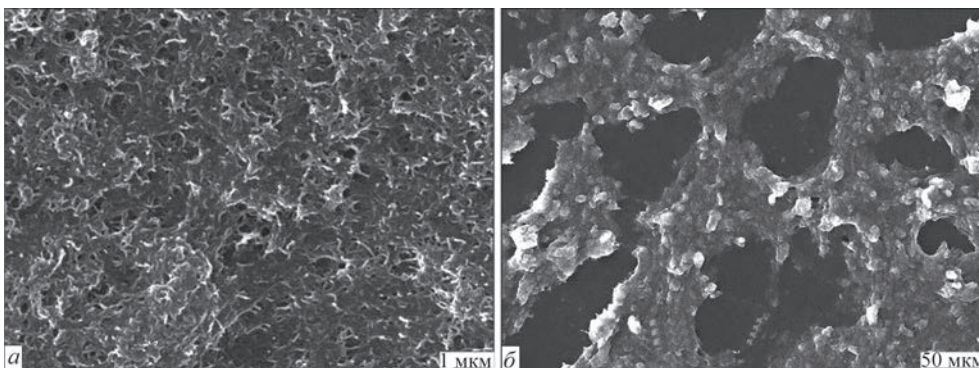


Рис. 1. SEM вуглецевих нанотрубок, нанесених із дисперсії в етилацетаті на металеву підкладку, в різних масштабах

Адгезію матеріалу «ЕТМ ЕМКАН» до металевих пластин із нанесеною авіаційною ґрунтовкою визначали методом ґратчастого надрізу згідно з ДСТУ ISO 4624:2019. На металевий зразок розміром 100×100 мм із нанесеним ґрунтом розпилювали аерозоль і після висихання до 3 ступеня скальпелем у трьох місцях робили ґратчасті надрізи з утворенням сітки з осередком 1×1 мм. Встановлено, що краї розрізів абсолютно рівні, ознак відшарування немає в жодному квадраті сітки. Адгезія оцінюється в 1 бал.

Клас термостійкості (250 °С) визначено згідно з ДСТУ ISO 4624:2019. На металеву пластину розміром 100×100 мм нанесено «ЕТМ ЕМКАН». Після висушування до ступеня 3 мультиметром визначали споживану зразком електроенергію при напрузі 115 В, а тепловізором – температуру на поверхні. Після вимикання зразок поміщали в термокамеру, нагрівали до 250 °С і витримували 15 хв. При повторному вмиканні до 115 В електроенергію, споживану зразком при 115 В, знову визначали за допомогою мультиметра (рис. 2), а температуру на поверхні – за допомогою тепловізора (рис. 3). Значення потужності та температури збігалися в межах похибки. Картина зони нагріву на тепловізорі також не змінилася.

Для визначення значення питомого теплового потоку до контактів зразка прикладали електричну напругу 115 В. Для контролю температури на поверхні зразка використовували тепловізор Flir TG267. Після досягнення температури поверхні постійних значень кількість спожитої електроенергії визначали мультиметром Keweisi KWS-AC300. Величина питомого теплового потоку розраховується шляхом ділення величини електричної потужності (90,6 Вт) на площу поверхні зразка, яку покриває «ЕТМ ЕМКАН», і дорівнює $74 \times 12 \times 6 \text{ мм} = 5,31 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Питома теплоємність для цього зразка становить $1,7 \text{ Вт/см}^2$. Електричний опір дослідного зразка, що пройшов термічні випробування, становить 145 Ом.

Композит із вуглецевих нанотрубок «ЕТМ ЕМКАН» є сучасною та вигідною заміною відомим нам систем захисту від зледеніння: він зменшує масу авіаційної конструкції, економічніший,



Рис. 2. Параметри зразка на мультиметрі



Рис. 3. Індикатори тепловізора

прозорий для радіочастотної діагностики, простий у використанні та обслуговуванні.

Неруйнівний контроль. Отримані результати випробувань дослідного зразка також дозволяють контролювати дотримання вимог якості та цілісності НЕ. Удосконалення методів неруйнівного контролю поверхонь композитних конструкцій (капілярного, ультразвукового, теплового) передбачає використання наукового комплексного підходу, що враховує властивості контрольованих поверхонь і засобів дефектоскопії. Синтез екологічно безпечних пенетрантів і нових матеріалів, у тому числі з використанням наночастинок, різко розширює ефективність і сферу застосування методів випробувань. Так, наприклад, використання сполук перехідних металів дозволяє принципово змінити технологію пошуку поверхневих мікродефектів за допомогою змінних електромагнітних полів і виявляти пошкодження магнітних і немагнітних матеріалів. Застосування комбінованих капілярно-польових методів дає змогу вивчати топологію мікродефектів та аналізувати приховані пошкодження конструкцій в авіації.

Прикладом нетрадиційних підходів до розробки методів дефектоскопії поверхонь є використання магнітних рідин з наночастинками для магнітопорошкової дефектоскопії та нових фізико-хімічних явищ, таких як комплексний ультразвуковий капілярний ефект, розроблений за нашою участю [6].

Одним із найважливіших інструментальних методів технічної діагностики потенційно небезпечних об'єктів є дистанційна інфрачервона тепловізійна діагностика, заснована на реєстрації

температурного поля, на принципі теплової діагностики, заснованому на порівнянні теплових полів еталонного та контрольованого об'єктів. Температурні аномалії є індикаторами дефектів, а величина температурних сигналів та їх поведінка в часі дозволяє дати кількісні оцінки параметрів об'єкта. А саме, за допомогою тепловізорів здійснюється неруйнівний термоконтроль панелей ракет і літаків. Вони виявляють дефекти: тріщини, структурні зміни, місця проникнення води.

Висновки

Одним із пріоритетних напрямків пошуку нових матеріалів і методів випробувань в авіації є розробка струмопровідних композицій і виготовлення нагрівальних елементів для електротермічної системи проти зледеніння літальних апаратів та їх неруйнівний контроль. Використовують полімерні матеріали з нанотрубками, а також нагрівачі на основі графену, що мають малу вагу, швидкий і рівномірний нагрів, а також ефективне енергоспоживання.

Проведено дослідження за допомогою скануючого електронного мікроскопа щодо оптимізації складу вуглецевих наповнювачів (графену та вуглецевих нанотрубок) у композиційних матеріалах для створення електропровідних елементів проти зледеніння конструкцій літаків.

Електропровідні композитні плівки повинні бути надзвичайно міцними з хорошою адгезією до нагрітої поверхні. Така плівка повинна бути легкою та дешевою, з фізичними характеристиками, які дозволяють покривати великі вигнуті поверхні.

Принцип теплової діагностики використовує порівняння теплових полів еталонного та контрольованого об'єкта. Температурні аномалії є індикаторами дефектів, а величина температурних

сигналів і їх поведінка в часі дозволяє дати кількісні оцінки параметрів об'єкта. Тому за допомогою тепловізійних приладів здійснюється основна частина неруйнівного контролю якості НЕ. Він дозволяє виявити такі дефекти, як тріщини, структурні зміни, місця просочування води.

Розробка стратегії нагрівальних елементів на основі композитних наноструктурованих форм вуглецю є перспективною для надання ефективних властивостей системам проти зледеніння. Розроблена технологія забезпечує систему захисту від зледеніння літака, яка може бути невід'ємною частиною аеронавігаційних панелей, а отже, конструкції літака. Таким чином, авторами запропоновано конструкцію нагрівальних елементів, їх оптимізований склад та методи неруйнівного контролю.

Список літератури/References

1. Yao, X., Hawkins, S.C., Falzon, B.G. (2021) A repairable carbon nanotube web-based electro-thermal heater and damage sensor for aerospace applications. *The aeronautical j.*, 125(1292), 1833–1843. DOI: <https://doi.org/10.1017/aer.2021.40>
2. Redondo, O., Prolongo, S.G., Campo, M. et al. (2018) Anti-icing and de-icing coatings based Joule's heating of graphene nanoplatelets. *Composites Science and Technology*, **164**, 65–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.05.031>
3. Vertuccio, L., Santis, F.De., Pantani, R. et al. (2019) Effective de-icing skin using graphene-based flexible heater. *Composites Part B*, **162**, 600–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.045>
4. (2019) *WT Chee, Carbon nanotube anti-icing and de-icing means for aircraft*. Patent US 10,457,404 B2 (45). Date of Patent: Oct. 29, 2019.
5. Kazakevych, M.L., Semenets, O.I., Kazakevych, V.M. et al. (2023) Creation and non-destructive control of electric heating elements of the aircraft icing prevention system. Proceedings of 13th The European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), 03–07 July 2023, Vol. 1(1), Lisbon, Portugal. DOI: <https://doi.org/10.58286/28081>
6. 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>

MULTI-LAYER COMPOSITE ELECTRIC HEATING ELEMENTS OF THE AIRCRAFT ICING PREVENTION SYSTEM

M.L. Kazakevych¹, O.I. Semenets², V.M. Kazakevych³

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: kazakevich.m@gmail.com

²SC «Antonov». 1 Acad. Tupolev str., 03062, Kyiv, Ukraine

³LLC «NDT Ukraine». E-mail: m_kazakevich@ukr.net

Freezing critical aircraft surfaces from ice is important when flying in icing conditions. Presence of ice formations on the surface of the aircraft leads to disruption of the uniform flow of air and deterioration of the aerodynamic characteristics of the aircraft surfaces, which significantly affects flight safety. Heating elements based on composite nanostructured forms of carbon, their optimized composition and non-destructive testing methods have been developed to provide effective properties to anti-icing systems. 6 Ref., 3 Fig.

Keywords: aircraft icing system, heating elements, non-destructive testing

Отримано 30.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 11.12.2024

Прийнято 20.02.2025

МАЛОГАБАРИТНА ТЕХНОЛОГІЧНА ПРОБА ДЛЯ ОЦІНКИ СХИЛЬНОСТІ МЕТАЛУ ШВІВ ДО УТВОРЕННЯ ХОЛОДНИХ ТРІЩИН

Л.С. Захаров, А.Р. Гаврик

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: leza45@gmail.com

Розроблено новий тест на зварюваність, який дозволяє експериментально визначити критичну температуру попереднього підігріву, необхідну для запобігання утворенню холодних тріщин у зварних з'єднаннях. Нова геометрія зварного блоку дозволяє поєднати згинальні напруження з нормальними поперечними та поздовжніми, що підвищує жорсткість випробування. Конструкція запропонованої проби має меншу металомісткість і дозволяє неодноразове її використання. Із застосуванням нового тесту досліджено зварюваність гартівних сталей з різним ступенем легування. Результати випробувань узгоджуються з результатами, отриманими в інших дослідженнях зварюваності сталей, і рекомендовані для умов виробництва. Бібліогр. 20, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: зварні з'єднання, холодні тріщини, зварювальні тести

Вступ. Найнебезпечнішим дефектом зварних з'єднань є холодні тріщини, що мають місце при зварюванні гартівних сталей. Їх утворення є наслідком дії комплексу факторів, в яких одними із головних є структурні напруження, що виникають у результаті мартенситного чи бейнітного перетворення, і наявність водню в металі. Появи холодних тріщин може також сприяти утворення сегрегаційних прошарків, неметалевих включень і т.п.

На процес утворення холодних тріщин суттєво впливають режими зварювання, оскільки від режиму зварювання залежить ширина зони термічного впливу (ЗТВ), швидкість охолодження шва і ЗТВ, рівень післязварювальних напружень. Для оцінки схильності металу зварного з'єднання до утворення холодних тріщин використовують різноманітні технологічні проби. Такі технологічні проби мають переваги перед повномасштабними випробуваннями зварних конструкцій, насамперед, за рахунок меншої металоємності та вартості [1]. Дослідження з розробки методів оцінки схильності зварних швів до холодного розтріскування розпочалися ще в тридцятих роках минулого століття та тривають донині [2–6].

Технологічні проби відрізняються конструкціями, розмірами, умовами і технологією зварювання, способом виявлення наявності чи відсутності тріщин, показниками стійкості проти тріщин. Кожна проба передбачає інтенсивний розвиток одного або декількох факторів, що обумовлюють утворення холодних тріщин. Такими факторами можуть бути: концентрація водню; прискорене охолодження з метою підвищення ступеня

загартування; підвищений рівень напружень. Проблеми різних конструкцій мають різну ефективність оцінки схильності матеріалів до утворення холодних тріщин.

У світовій практиці досліджень зварюваності сталей і сплавів відома велика кількість проб для оцінки їх схильності до утворення холодних тріщин [7]. Більшість тестів, як і методів розрахункової оцінки опору холодним тріщинам, були розроблені та апробовані на класичних високомісних низьколегованих сталях. Однак останнім часом все ширше застосовуються високолеговані мартенситні сталі, які часто значно відрізняються за реакцією на навантаження, що виникають під час зварювання.

Основною особливістю високохромистих мартенситних сталей є те, що їх багатофазний склад перебуває на стику аустенітних, феритних і мартенситних структур. Це обумовлює значні труднощі їх зварювання, оскільки в залежності від температури та тривалості нагрівання та швидкості охолодження аустеніт і мартенсит можуть мати «гарні» та «погані» модифікації: рейковий або пластинчастий мартенсит; залишковий, реверсний або алотриоморфний і відманштеттовий аустеніт і т.д. У багатьох випадках при контролі на зварюваність необхідно застосовувати різні варіанти жорсткості тестів.

Наприклад, дослідження [8] вказує на те, що при тестуванні зварного шва модифікованої мартенситної сталі 9Cr-1Mo необхідна більша жорсткість, ніж у стандартних тестів. Навпаки, у разі мартенситно-аустенітного металу шва, який має

вищу пластичність, холодні тріщини спостерігаються при нижчій жорсткості з'єднання [9]. Аналогічну тенденцію показало застосування витратних зварювальних матеріалів Cr-Ni типу [10].

Випробування на холодні тріщини дають якісні (тріщина/відсутність тріщин) або кількісні результати (визначення параметрів випробувань для зварних швів без тріщин) для досліджуваних комбінацій базового матеріалу, присадкового матеріалу та параметрів зварювання. Крім зазначених критеріїв, важливо брати до уваги трудомісткість механічної підготовки заготовок для проб, металомісткість і можливість їх подальшого використання. Розроблено багато різних методів випробувань для визначення потенційного ризику появи тріщин шляхом створення особливих умов закріплення зварного шва, як наведено в численних оглядах з цього питання [11].

Основна частина лабораторних випробувань складається з тієї чи іншої окремої форми кутового або стикового зварного шва, підвищення жорсткості яких забезпечується або жорсткістю самих випробувальних зразків, або за допомогою анкерних швів, болтів, кондукторів та інших утримуючих пристосувань або їх поєднанням [12]. У той же час встановлено [13], що для достовірної оцінки впливу тих чи інших факторів на утворення тріщин у зварних з'єднаннях та вибір оптимальної процедури зварювання конструкцій у процесі виробництва, при тестуванні має бути додана інтенсивність обмеження при згинанні. Однак наявність лабораторних проб, які максимально відповідають вірогідності появи холодних тріщин завдяки тому, що шви одночасно піддаються не тільки розтягуванню, алей згину, дуже обмежена.

Додаткове вимірювання згинальних напружень разом із нормальними поперечними та поздовж-

німи на тривимірному випробувальному стенді ВАРМ 2-MN [14] показало помітне підвищення згинального моменту за обмеженням кутової деформації, особливо в критичній кореневій зоні, із супутнім ризиком появи тріщин. Встановлено значення, які в декілька разів перевищують аналогічні параметри щільного тесту [15]. Це свідчить про те, що напруження вигину при зварюванні зростають і викликають вищі локальні залишкові напруження. На жаль, складна конструкція обмежує широке використання такої проби.

Достатньо інформативним є CJC-тест [16], в якому напружено-деформований стан з'єднань регулюється спеціальним пристроєм, що дозволяє поєднувати кутове напруження з поперечним (рис. 1). Суттєвою вадою цього тесту є велика металомісткість і необхідність застосування складного кондуктора.

Малогабаритним тестом, в якому при зварюванні фіксуються згинальні напруження, є тест WIC [1], який використовується при зварюванні трубопроводів із високоміцних сталей (рис. 2). Змінюючи висоту ребра жорсткості базової плити, можна моделювати високі інтенсивності вигину зварних швів. Інтенсивність обмеження в поперечному напрямку зварювання може бути змінена в залежності від довжини анкерних швів між зразком WIC і базовою плитою [7]. Як показала практика, тест є достатньо інформативним, однак слід зазначити високу металомісткість, суттєві витрати на монтаж блоку, складну фіксацію зазору між пластинами та одноразове використання блоку.

Мета роботи – розробити спрощену конструкцію проби для оцінки схильності металу швів до утворення холодних тріщин.

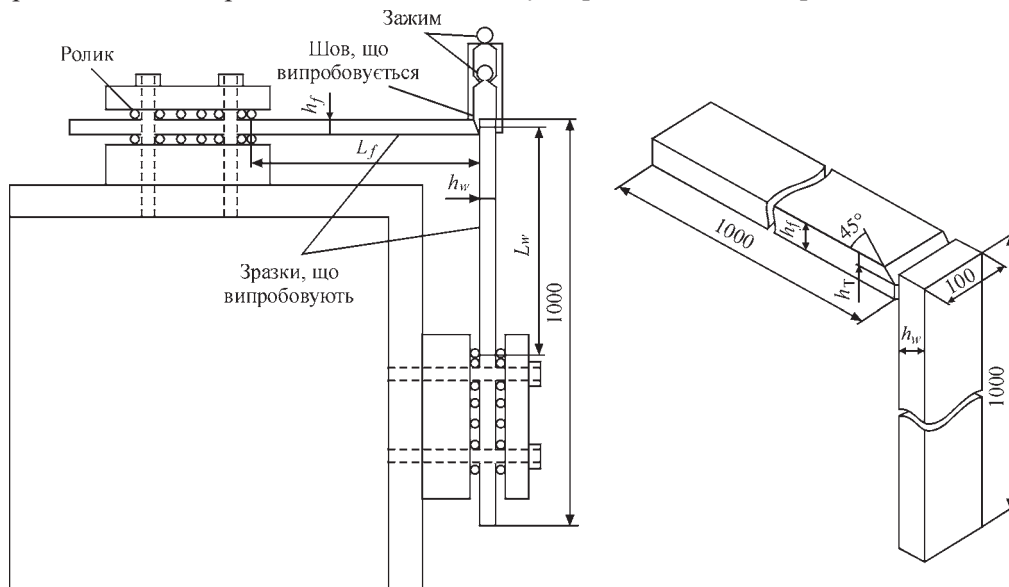


Рис. 1. Конструкція CJC-тесту

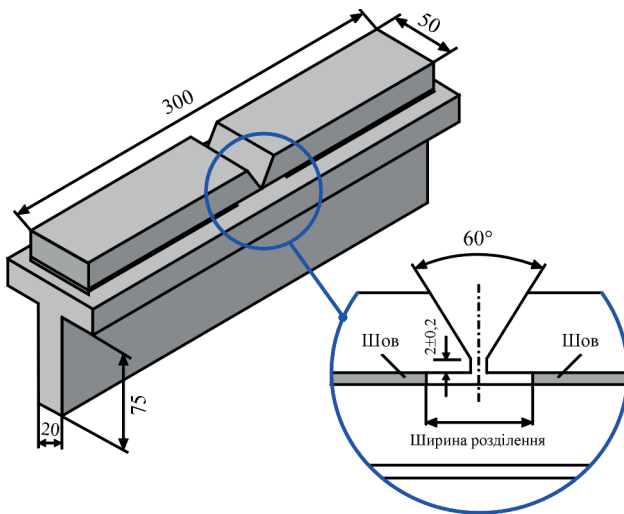


Рис. 2. Конструкція WIC-тесту

Розробка конструкції спрощеного технологічного тесту та його практичне застосування.

Нами проведено дослідження з розробки економічної малогабаритної технологічної проби на схильність зварного шва до утворення холодних тріщин. Для фіксації згинального моменту обидві пластини закріплені вертикально. Це дозволяє поєднати згинальні напруження з нормальними поперечними та поздовжніми. Тестові пластини завтовшки 20 мм фіксуються за допомогою анкерних болтів або кондуктора (рис. 3, 4). Пази для тестування розташовуються в торцях пластин (рис. 1, 2). Геометрія пазів може обиратися за потребою – Y, V, U-подібна та інші. Нами обрано V-подібне розроблення, оскільки тріщини в ЗТВ сучасних мартенситних сталей практично відсутні.

Зазвичай довжина контрольного шва в малогабаритних тестах обирається в межах 50...100 мм. Обрано довжину 85 мм, оскільки, як встановлено [17], у цьому випадку в зварному шві забезпечуються найвищі як поздовжні, так і поперечні залишкові напруження. Ширина щілини між пластинами фіксується вкладишем діаметром 2 мм на відстані від поверхні 15 мм (рис. 1). При необхідності жорсткість тесту можна регулювати за раху-

нок зміни відстані фіксуючого вкладиша від кореневої зони. При виготовленні тестового блоку на анкерних болтах розробку крайок можна робити по його периметру, що дозволяє використати один блок чотири рази. При застосуванні кондуктора (рис. 4) при фіксованій ширині тестових пластин можна необмежено збільшувати їх довжину, що також дає можливість багаторазового використання одного тестового блоку.

Конструкція тестового з'єднання дозволяє виключити необхідність складної обробки крайок, як, наприклад, у пробі Tekken, що особливо важливо при великій товщині зварювальних матеріалів. Крім того, значно спрощується вирізка темплетів для металографічного аналізу. При цьому метал зразків майже повністю зберігається для подальшого використання при багаторазових випробуваннях.

Вимоги до виготовлення зразків і процедури, які слід виконувати при використанні розробленого спрощеного технологічного тесту (СТТ), встановлено за рекомендаціями ДСТУ EN ISO 17642-2:2019 [18].

Тест застосовується переважно, але не виключно, для мартенситних легованих і високолегованих сталей при дуговому зварюванні покритими електродами та напівавтоматичному зварюванні в захисному газі суцільним і порошковим дротом. Пластини з'єднують болтами діаметром 12 мм. Крутний момент, що прикладається до болтів, 100 ± 5 Нм. Зварювання виконують у нижньому положенні, наявність тріщин у зразках контролюють візуально або з допомогою лупи при збільшенні $\times 2 \dots 4$. Також відсутність тріщин може бути підтверджена при обстеженні поперечних мікрошліфів за збільшенням приблизно $\times 100 \dots 200$.

На основі запропонованого тесту проведено експерименти з оцінки схильності до холодних тріщин зварних з'єднань мартенситних сталей 25X2MНФА, 15X5M та X10CrMoVNb91 (P91) завтовшки 20 мм. Зварювання виконували електрода-

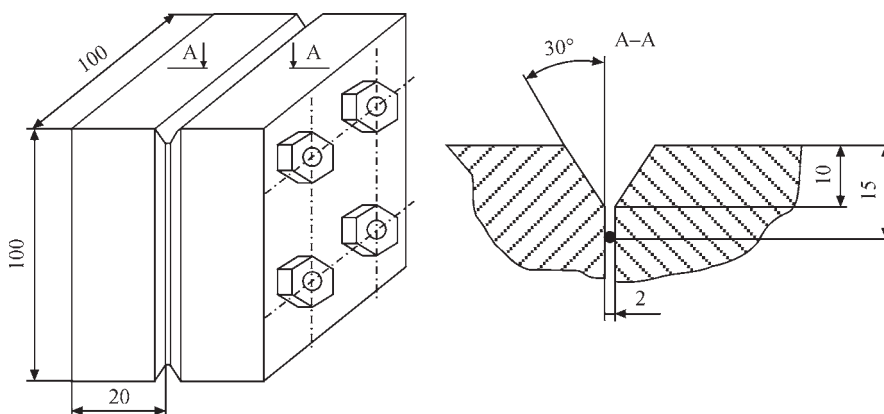


Рис. 3. Конструкція розробленої проби

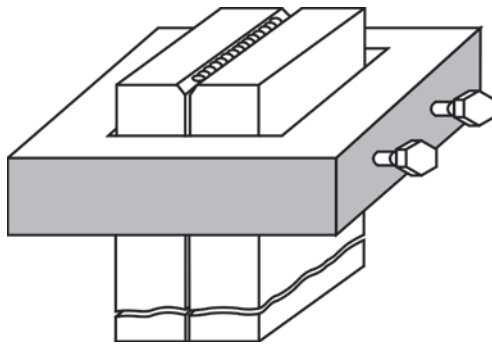


Рис. 4. Конструкція проби з кондуктором ми діаметром 3 мм. Хімічний склад матеріалів наведено в таблиці.

Зварювання виконували на постійному струмі зворотної полярності. Джерело зварювального струму – ВДУ-505. Струм зварювання – 100 А. Перед початком зварювання електроди прожарювали в печі при температурі 300 °С 2 години.

Попередній підігрів пластин перед зварюванням робили в муфельній електропечі типу СНОЛ. Хімічний склад застосованих матеріалів

Номер варіанту	Марка матеріалу	Масова доля елементів, %						
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V/Nb
1	Сталь 25X2НМФА	0,24	0,17	0,50	2,20	1,50	0,50	0,2 V
	Електроди Therpanit P 24 (EZ CrMo2VNb B42H5)	0,11	0,24	0,62	2,52	–	0,98	0,24 V
2	Сталь 15X5М	0,11	0,4	0,6	4,8	0,6	0,34	–
	Електроди ЦЛ-17 (Е 10Х5МФ)	0,07	0,45	0,90	4,5	–	0,65	0,25 V
3	Сталь 10Х9МФБ (Р91)	0,10	0,3	0,6	8,9	0,63	0,85	0,06 Nb
	Електроди АНЛ-8 (Е9018-В9)	0,09	0,13	0,72	9,15	0,52	0,83	0,05 Nb

Далі блок переміщали на зварювальний стіл, а дві попередньо приварені хромель-алюмелеві термопари приєднували до пари приладів КСП-4, призначених для реєстрації температурно-часових діаграм. Зварювання починали при досягненні запланованої температури зразка. Тестові блоки зварювали без попереднього нагріву та з попереднім нагріванням з кроком 50 °С. Блоки, зварені без попереднього нагріву, повністю розтріскалися при тестуванні всіх трьох марок сталей (рис. 5).

Дослідження, проведені із застосуванням запропонованого тесту, показали, що в зварних з'єднаннях зварюваних сталей тріщини утворюються виключно в металі шва. Тріщини в ЗТВ відсутні при всіх параметрах тестування.

У залежності від марок сталей встановлено нижню критичну температуру попереднього нагріву для запобігання холодним тріщинам:

при зварюванні сталі 25X2НМФА – 150 °С;

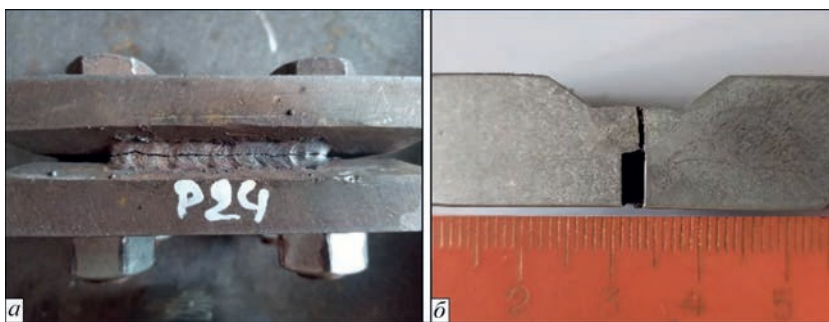


Рис. 5. Холодна тріщина у зразку при зварюванні без підігріву: вид зверху (а), поперечний переріз (б)

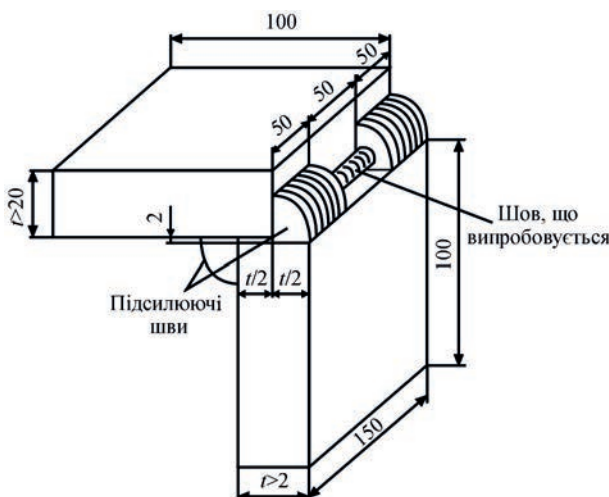


Рис. 6. Конструкція кутової проби



при зварюванні сталі 15X5M – 300 °С;
при зварюванні сталі Р 91 – 200 °С.

Критична температура попереднього підігріву, отримана при зварюванні сталі Р91, добре корелюється з результатом тестування цієї сталі тестом G-BOP (200°C) [19], який вважається найжорсткішим серед лабораторних тестів у дослідженнях. Там же відзначається, що при застосуванні тесту Tekken отримано нижчу критичну температуру –150°C. Аналогічні результати отримано в [20].

Для перевірки інформативності запропонованого тесту зробили напівмаштабне тестування підвищеної жорсткості. Пластини сталі Р91 завтовшки 45 мм зварювали під кутом 90° із зазором 2 мм (рис. 6). Це дозволило виключити необхідність складної обробки крайок, що особливо важливо при великій товщині зварюваних матеріалів. Крім того, значно спрощується вирізка швів і підготовка темплетів для металографічного аналізу, при цьому метал зразків майже повністю зберігається для подальшого використання.

Тестовий шов накладався після виконання анкерних швів із внутрішньої та зовнішніх сторін. Оцінка тріщиностійкості проводилася за критичною температурою попереднього підігріву. Проведене тестування показало, що тріщини в контрольному шві, як і при використанні запропонованої проби, відсутні при температурі підігріву 200°C.

Розглянуті підходи до випробувань схильності до холодних тріщин увійшли у дослідницьку практику, а отримані окремі результати використані при створенні технологічних процесів зварювання елементів котельного, турбінного, гідроенергетичного устаткування з гартівних бейнітних і мартенситних сталей.

Висновки

Запропоновано конструкцію малогабаритної спрощеної технологічної проби для випробування на схильність металу швів до холодних тріщин. Проба дозволяє поєднати згинальні напруження з нормальними поперечними та поздовжніми, що забезпечує високу жорсткість дослідних зварних з'єднань. Особливістю проби є мала металомісткість і можливість її неодноразового використання. Визначені за допомогою розробленого методу теплові умови зварювання гартівних теплостійких сталей з бейнітною та мартенситною структурою рекомендовано для виготовлення зварних вузлів енергетичного устаткування.

Список літератури/References

1. North, T.H., Rothwell, A.B., Glover, A.G., Pick, R.J. (1982) Weldability of High Strength Line Pipe Steels. *Welding J.*, 61(8), 243–257.
2. Swinden, T., Reeve, L. (1938) Metallurgical Aspects of the Welding of Low Alloy Structural Steels. *Trans. Inst. Welding*, 1, 7–18.
3. Leder, P.L.J. (1948) Factors Influencing the Weldability of High Tensile Alloy Steels, and a New Weld Cracking Test. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 159(1), 173–190.
4. Kurji, R., Coniglio, N., Griggs, J., Ghomashchi, R. (2017) Modified WIC test: an efficient and effective tool for evaluating pipeline girth weldability. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(4), 287–299. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1232674>
5. Schaupp, T., Schroeder, N., Schroepfer, D., Kannengiesser, T. (2021) Hydrogen-Assisted Cracking in GMA Welding of High-Strength Structural Steel – A New Look into This Issue at Narrow Groove. *Metals*, 11(6), 904. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11060904>
6. Bourgeois, D., Alexandrov, B. (2022) Hydrogen-Assisted Cracking Fracture Analysis using High-Speed Camera and Delayed Hydrogen Cracking Test. *J. of Failure Analysis and Prevention*, 22, 385–389. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01308-2>
7. Kannengiesser, T., Boellinghaus, T. (2013) Cold cracking tests – an overview of present technologies and applications. *Welding in the World*, 57(1), 3–37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-012-0001-7>
8. Karthikeyan, J., Varadharajan, R., Pitchaimuthu, K. (2015) Investigation of Hydrogen Assisted Crack in Welding by using Y-Groove Test. *International j. of engineering research and technology*, 4(10), IJERTV4IS100187. DOI: <https://dx.doi.org/10.17577/ijertv4is100187>
9. Kasuya, T., Hashiba, Y., Inoue, H., Nose, T., Ito, K., Enoki, M. (2012) Cold cracking susceptibility of austenitic and martensitic weld metals. *Welding in the World*, 56(9), 76–84. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03321383>
10. Zenitani, S., Hayakawa, N., Yamamoto, J., Hiraoka, K., Morikage, Y., Kubo, T., Amano, K. (2007) Development of new low transformation temperature welding consumable to prevent cold cracking in high strength steel welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(6), 516–522. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329307X213675>
11. Kurji, R., Coniglio, N. (2015) Towards the establishment of weldability test standards for hydrogen-assisted cold cracking. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9-12), 1581–1597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6555-3>
12. Макаров Э.Л. (1981) *Холодные трещины при сварке легированных сталей*. М., Машиностроение.
Makarov, E.L. (1981) Cold cracks in welding of alloyed steels. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
13. Masubuchi, K., Ich, N.T. (1970) Computer analysis of degree of constraint of practical butt joints. *Welding J.*, 49(4), 166.
14. Lausch, T., Kannengiesser, T., Schmitz-Niederer, M. (2013) Multi-axial load analysis of thick-walled component welds made of 13CrMoV9-10. *J. of materials processing technology*, 213(7), 1234–1240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.008>
15. Schroepfer, D., Kromm, A., Kannengiesser, T. (2017) Optimization of welding loads with narrow groove and application of modified spray arc process. *Welding in the World*, 61, 1077–1087. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0484-3>
16. Ueda, Y., Nishimura, I., Iiyama, H., Chiba, N. (1977) Effects of intensity of bending restraint on lamellar tearing and root cracking in corner joint. *J. of the Japan welding society*, 46(7), 408–415. DOI: https://doi.org/10.2207/qjws1943.46.7_408
17. Sun, J., Hensel, J., Nitschke-Pagel, T., Dilger, K. (2019) Influence of restraint conditions on welding residual stresses in H-type cracking test specimens. *Materials*, 12(17), 2700. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12172700>
18. ДСТУ EN ISO 17642-2:2019. Испытания разрушительные сварных соединений металлических материалов. Испытания на устойчивость к образованию холодных трещин в сварных соединениях. Дуговая сварка. Часть 2. Испытания на самозакрепленных образцах (EN ISO 17642-2:2005, IDT; ISO 17642-2:2005, IDT)

- EN ISO 17642-2:2005 Destructive tests on welds in metallic materials Cold cracking tests for weldments Arc welding processes Part 2: Self-restraint tests (ISO 17642-2:2005)
19. Chakraborty, G., Rejeesh, R., Ramana, O.V., Albert, S.K. (2020) Evaluation of hydrogen-assisted cracking susceptibility in modified 9cr-1mo steel welds. *Welding in the World*, **64**, 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00812-2>
20. Albert, S.K., Ramasubbu, V., Sundar Raj, S.I., Bhaduri, A.A. (2011) Hydrogen-assisted cracking susceptibility of modified 9Cr-1 Mo steel and its weld metal. *Welding in the World*, **55**, 66–74. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03321309>

DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED PROCESS TEST FOR THE EVALUATION OF COLD CRACK FORMATION IN WELDED JOINTS

L.S. Zakharov, A.R. Havryk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: leza45@gmail.com

A new weldability test has been developed that allows us to experimentally determine the critical preheating temperature required to prevent cold cracks in welded joints. The new geometry of the welded block allows combining bending stresses with normal transverse and longitudinal stresses, which increases the rigidity of the test. The design of the proposed test has a lower metal consumption and allows for its repeated use. The weldability of hardenable steels with different degrees of alloying was studied using the new test. The test results are consistent with those obtained in other studies of steel weldability and are recommended for production conditions. 20 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: welded joints, cold cracks, welding tests

Отримано 01.01.2024

Отримано у переглянутому вигляді 04.12.2024

Прийнято 13.01.2025

ЕНДОСКОП З ПІДСВІЧУВАННЯМ USB/micro USB/Type-C для смартфона 2 м (X00755)



Ендоскоп — пристрій, за допомогою якого ви зможете проникнути всередину та переглянути дрібні елементи у важкодоступних місцях: труби, механізми, кабелі, плати. Такий інструмент знадобиться у роботі з сантехнікою, електрикою та для ремонту побутової техніки.

Камера ендоскопа показує зображення на 70°. Додатково біля камери заходиться ліхтар, який полегшує процес роботи з темними та глибокими механізмами. За допомогою пульта на кабелі ви регулюєте промінь та яскравість світла.

Ендоскоп має три види перехідників. Під'єднати ендоскоп можливо до будь-якого пристрою: телефона, комп'ютера чи планшета. Завдяки тому, що кабель інструмента має змінний перехідник, його можна використовувати з USB, TYPE-C та IMac девайсами.

Щоби під'єднати пристрій до телефона, оберіть потрібний перехідник та під'єднайте до вашого смартфона. Далі підтвердіть з'єднання через вікно, що з'явиться на екрані. У результаті відкриється додаток «Камера» або одна зі спеціальних програм.

Формат фото – jpeg, формат відео – avi, матеріал – метал, водостійкий, розмір – 2 м × 5,5 мм, колір – чорний.



АНАЛІЗ ВИМОГ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ ЩОДО ТЕХНОЛОГІЙ КАПІЛЯРНОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ

Ю.М. Посипайко, С.О. Щупак

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

Процес гармонізації в Україні стандартів Європейського Союзу, що розпочався 2000-х роках, призвів до появи в галузі неруйнівного контролю якості металопродукції біля сотні нових нормативно-технічних документів і відміни раніше діючих. Система стандартизації в Україні характеризується певною закритістю: відсутність офіційних текстів стандартів українською мовою, платний доступ до бази стандартів, відсутність інколи будь-яких текстів офіційно прийнятих документів. Це призвело до недостатньої обізнаності фахівців щодо вимог діючих стандартів. У цій статті виконано аналіз основних вимог і положень міжнародних стандартів у галузі капілярного контролю, одного з часто застосовуваних видів неруйнівного контролю, що проводиться для виявлення несущільностей, таких як тріщини, плівки, складки, пористість і спаї, які виходять на поверхню контрольованого матеріалу. Контроль застосовується переважно до металевих матеріалів, однак може застосовуватися й для контролю інших матеріалів за умови, що вони є інертними до впливу дефектоскопічних матеріалів, а також не занадто пористі (відливки, поковки, зварні шви, кераміка тощо). Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: неруйнівний контроль, капілярний контроль, стандарти, вимоги, пенетрант, очисник, проявник, чутливість, обладнання

Вступ. На початку 2000-х років в Україні розпочався процес гармонізації стандартів Європейського Союзу в галузі неруйнівного контролю якості металопродукції. Ці стандарти, у більшості випадків, були підготовлені Технічним комітетом CEN/TC 138 «Неруйнівний контроль», секретаріат якого веде AFNOR, у співпраці з технічним комітетом ISO/EC 135 «Неруйнівний контроль». На сьогодні в Україні діють у якості ДСТУ практично всі стандарти в галузі неруйнівного контролю, що охоплюють всі види та методи випробувань.

У капілярному контролі перші місця в переліку стандартів займають шість документів серії EN ISO 3452 Non-destructive testing. Penetrant testing. Part 1–6 [1–6]. Ці стандарти встановлюють вимоги до капілярного контролю, що проводиться для виявлення несущільностей, таких як тріщини, плівки, складки, пористість і спаї, що виходять на поверхню контрольованого матеріалу. Контроль застосовується переважно до металевих матеріалів, однак може застосовуватися й для контролю інших матеріалів за умови, що вони інертні до впливу дефектоскопічних матеріалів, а також не занадто пористі (відливки, поковки, зварні шви, кераміка тощо). Стандарти також містять вимоги до випробувань процесів і контрольних випробувань, але не передбачають їх використання в якості критеріїв приймання, а також не дають інформації стосовно придатності для спеціальних випадків застосування чи вимог до випробувального обладнання. Далі ми розглянемо основні вимоги стандартів до технології та матеріалів капілярного контролю. Тер-

міни та їх визначення, що використовуються в капілярному контролі, наведені в EN ISO 12706 [7].

Вимоги безпеки. Оскільки при капілярному контролі часто використовуються речовини, що містять небезпечні для здоров'я, легкозаймисті та/або леткі компоненти, потрібно дотримуватися необхідних заходів безпеки. Слід уникати тривалого або багаторазового контакту шкіри чи слизових оболонок із засобом контролю. Відповідно до місцевих інструкцій з техніки безпеки робоче місце має бути забезпечене належною вентиляцією та розташоване на відстані від джерел тепла, іскор чи відкритого полум'я.

Дефектоскопічні матеріали для капілярного контролю та обладнання потрібно використовувати в суворій відповідності до інструкцій виробника.

При застосуванні фільтрованих джерел ультрафіолетового світла потрібно вживати заходів, щоби в очі контролера не потрапляло пряме нефільтроване ультрафіолетове випромінювання. Незалежно від того, чи є фільтр складовою частиною лампи, чи окремим компонентом, він має утримуватися в належному стані. Крім того, потрібно дотримуватися законодавчих вимог (наприклад, Директива 2006/25/ЕС), необхідно забезпечити безпечне впровадження методу.

Вимоги до персоналу. Капілярний контроль повинен виконувати професійний, спеціально навчений і атестований персонал, у разі потреби під наглядом компетентних фахівців, призначених роботодавцем, або за делегуванням таких прав роботодавцем, уповноваженою інспекційною ком-

панією. Для підтвердження належної кваліфікації рекомендовано, щоби персонал був сертифікований відповідно до EN ISO 9712 [8] або до іншої еквівалентно формалізованої системи. Допуск до роботи атестованого персоналу видає роботодавець відповідно до документованої процедури.

Загальний опис етапів контролю. Перед початком капілярного контролю контрольована поверхня має бути очищена та висušена. Потім на зону контролю наносять підходящий пенетрант, що проникає у несучільності, які мають вихід на поверхню. Після завершення необхідного часу у проникнення надлишки пенетранту видаляють

з поверхні та наносять проявник. Проявник вбирає (адсорбує) пенетрант, який проник у несучільність і там залишився, що дає чітко видиму контрастну індикацію несучільності.

Якщо необхідно провести комплексні неруйнівні випробування, капілярний контроль потрібно виконувати першим, якщо тільки інше не погоджено між договірними сторонами, щоби забруднення не потрапили у відкриті несучільності. Якщо капілярний контроль проводять після інших методів НК, поверхня контролю має бути ретельно очищена від забруднень перед його проведенням.

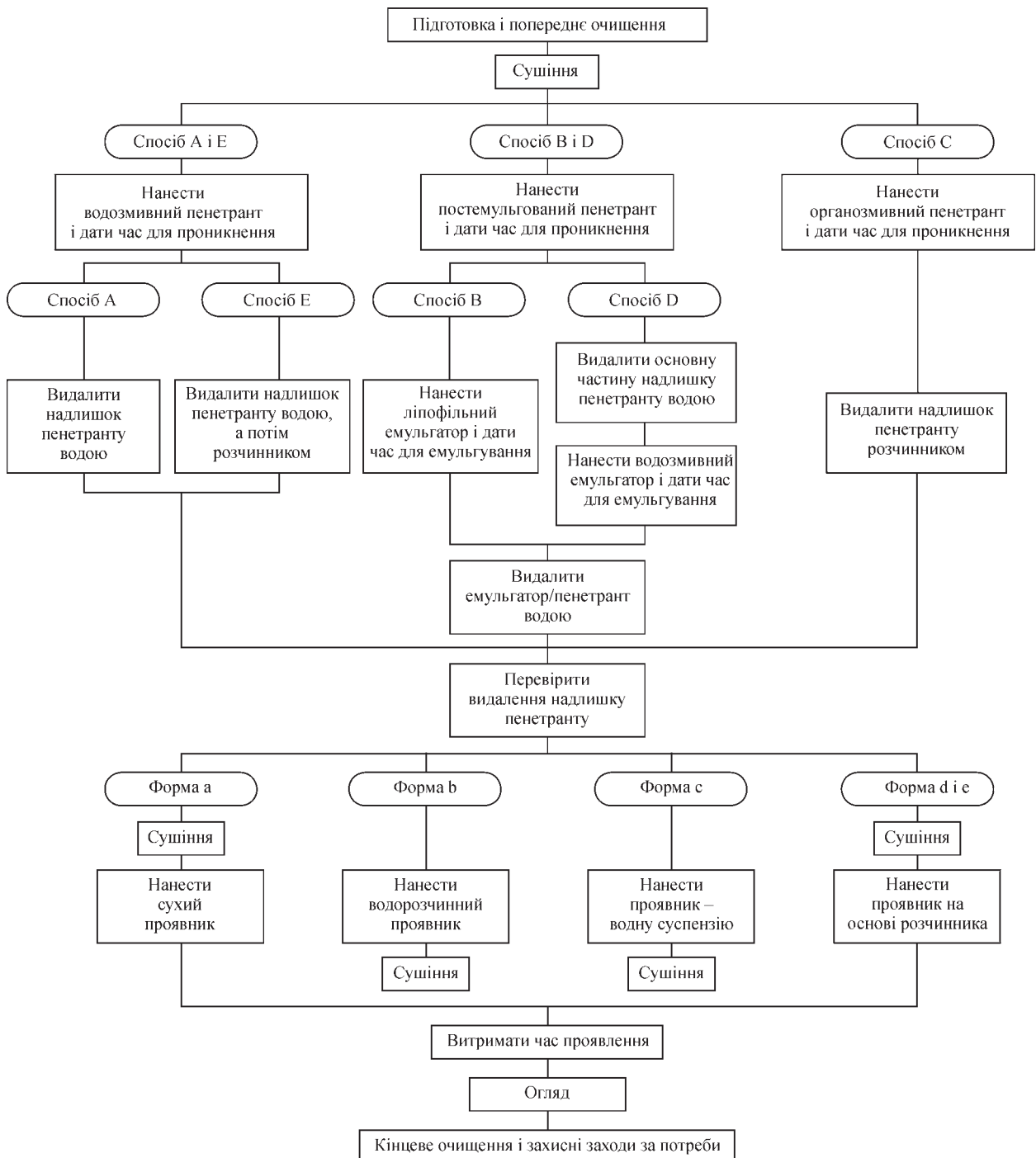


Рис. 1. Основні етапи капілярного контролю та послідовність операцій для загального випадку

Основні етапи капілярного контролю та послідовність операцій для загального випадку, якої слід дотримуватися, наведені в алгоритмі на рис. 1.

Контроль у загальному випадку поділяється на наступні етапи: а) підготовка та попереднє очищення; б) нанесення пенетранту; в) видалення надлишку пенетранту; г) нанесення проявника; д) огляд і реєстрація індикаторних слідів; є) складання протоколу; ж) остаточне очищення.

Обладнання для капілярного контролю залежить від кількості, розмірів і форми деталей, які контролюють, і повинно відповідати вимогам EN ISO 3452-4 [4].

Ефективність капілярного контролю залежить від багатьох факторів, зокрема: а) типів дефектоскопічних матеріалів і обладнання; б) підготовки та стану поверхні; в) матеріалу об'єкта контролю та очікуваних несущільностей; г) температури контрольованої поверхні; д) тривалості проникнення та часу проявлення; є) умов огляду.

Для підтвердження правильного вибору параметрів потрібно виконати контрольні перевірки.

Вимоги до дефектоскопічних матеріалів. У капілярному контролі існують різні дефектоскопічні системи. Під набором дефектоскопічних матеріалів розуміють наступні дефектоскопічні матеріали: пенетрант, засіб для видалення надлишку пенетранту та проявник. При контролі згідно з EN ISO 3452-2 [2] пенетрант і засіб для видалення надлишку пенетранту повинні бути від одного виробника. Засоби, що використовують для контролю, наведені в табл. 1.

Рівень чутливості набору дефектоскопічних засобів потрібно визначати за допомогою контрольного зразка типу I відповідно до EN ISO 3452-3 [3]. Оцінений таким чином рівень чутливості завжди стосується методу, який застосовується для типових випробувань схваленого набору дефектоскопічних засобів.

Схваленому набору дефектоскопічних засобів, що використовуватиметься для капілярного контролю, присвоюється маркування, де вказано тип, спосіб і форма дефектоскопічних засобів, а також

цифрове позначення рівня чутливості, який досягається при випробуванні за допомогою контрольного зразка типу I відповідно до EN ISO 3452-3 [3].

Приклад. Схвалений набір дефектоскопічних засобів, до якого входять флуоресцентний пенетрант (I), вода як засіб для видалення надлишку пенетранту (A), сухий проявник (a), чутливість якого відповідає 2-му рівню, матиме наступне маркування системи капілярного контролю: набір дефектоскопічних засобів IAa Рівень 2.

Дефектоскопічні засоби мають бути сумісними з матеріалом об'єкта контролю та з призначенням контрольованої деталі чи деталей до експлуатації. Дефектоскопічні матеріали мають бути сумісними один з одним. Витратні матеріали потрібно замінити на такі самі матеріали, які можуть належати до іншої партії. Матеріали мають бути від одного виробника.

Хімічні та фізичні властивості деяких неметалічних матеріалів можуть змінюватися під впливом дефектоскопічних матеріалів капілярного контролю. Необхідно переконатися перед контролем у сумісності дефектоскопічних матеріалів з матеріалом контрольованих деталей, з якого вони виготовлені, а також вузлів, що містять такі матеріали. У тих випадках, коли можуть з'явитися забруднення, важливо переконатися, що дефектоскопічні матеріали не чинять ніякого шкідливого впливу на паливні, мастильні матеріали, гідравлічні рідини тощо. При контролі матеріалів, що контактують з ракетним мастилом, вибуховими речовинами (це стосується всіх деталей, що містять порох, детонаційні та піротехнічні матеріали), кисневого обладнання чи ядерних установок, сумісності дефектоскопічних матеріалів потрібно приділяти особливу увагу.

Процедура контролю. Усі випробування слід виконувати відповідно до затвердженої письмової процедури контролю, яка може бути спеціальною або міститися у відповідному стандарті на продукцію.

Попереднє очищення. За необхідності, забруднення, такі як окалина, іржа, мастило, жир або лак, мають бути попередньо видалені механічними або хімічними методами чи їх комбінацією.

Таблиця 1. Засоби контролю

Пенетрант		Засіб для видалення надлишку пенетранту		Проявник	
Тип	Назва	Спосіб контролю	Назва	Форма	Назва
I	Флуоресцентний пенетрант	A	Вода	a	Сухий проявник
II	Кольороконтрастний пенетрант	B	Ліпофільний емульгатор	b	Водорозчинний
III	Пенетрант подвійного призначення (флуоресцентний кольороконтрастний пенетрант)	C	Розчинник – галогенізований – негалогенізований – спеціального застосування	c	Водна суспензія
		D	Ліпофільний емульгатор	d	На основі розчинника (безводний, для типу I)
		E	Вода та розчинник	e	На основі розчинника (безводний, для типу II і III)
				f	спеціального застосування

Попереднє очищення має забезпечити видалення з контрольованої поверхні різних залишків і можливість проникнення пенетранту в несущільність. Зона, яку очищують, повинна бути достатньо великою, щоб уникнути впливу прилеглих ділянок на власне контрольовану ділянку.

Окаліну, шлак, іржу тощо потрібно видаляти відповідними способами, наприклад, щіткою, наждаком, шліфуванням, піскоструминним очищенням або водою під великим напором. Ці способи видаляють забруднення з поверхні та, як правило, непридатні для видалення забруднення з поверхневих несущільностей. У будь-якому випадку потрібно забезпечити, щоби несущільності не були замаскованими пластичними деформаціями або рештками абразивних матеріалів. Якщо необхідно забезпечити, щоби несущільності мали вихід на поверхню, після належної промивки та сушки потрібно провести травлення. Хімічне попереднє очищення потрібно проводити придатними для цього хімічними очисними засобами для видалення залишків мастильних матеріалів, фарби чи засобів травлення.

Залишки процесів хімічного очищення можуть вступати в реакцію з пенетрантом і дуже зменшити його чутливість. Зокрема, кислоти та хромати можуть сильно зменшувати флуоресценцію флуоресцентного пенетранту та забарвлення кольороконтрастного пенетранту. Тому хімічні засоби потрібно видаляти з поверхні контролю після процесу попереднього очищення за допомогою придатних способів очищення, що можуть включати промивання водою.

Завершальним етапом попереднього очищення є ретельне сушіння деталей, що контролюються, так щоб у несущільностях не залишилось ані води, ані розчину. Дефектоскопічний матеріал, контрольована поверхня та температура доквілля мають бути в діапазоні 10...50 °C, за винятком процесів сушіння. Різкі перепади температури можуть спричинити конденсацію, яка може порушити технологію, тому її слід уникати. Для температур, що виходять за межі діапазону 10...50 °C, контроль потрібно проводити відповідно до ISO 3452-5 [5] або ISO 3452-6 [6] залежно від ситуації.

Нанесення пенетранту. Пенетрант можна наносити на контрольовану деталь шляхом розбризкування, пензлем, поливом, зануренням або імерсією. Пенетрант повинен залишатися на контрольованій поверхні впродовж усього часу проникання. Необхідний час проникання залежить від властивостей пенетранту, температури, матеріалу контрольованої деталі та несущільностей, які потрібно виявити. Час проникання повинен бути 5...60 хв і не менше часу, рекомендованого виробником для досягнення необ-

хідної чутливості. Час проникання повинен бути задокументований.

Видалення надлишку пенетранту. Нанесення очисних засобів потрібно здійснювати таким чином, аби пенетрант не видалився з несущільностей. Надлишок водозмивного пенетранту повинен бути видалений змиванням (ополіскуванням), зануренням чи протиранням із використанням води. Потрібно стежити за тим, щоби мінімізувати механічний вплив методу промивання. Надлишок органо-змивного пенетранту повинен бути видалений спочатку за допомогою безворсової тканини, а після цього очищений протиранням чистою безворсовою тканиною, злегка змоченою в розчиннику. Будь-який інший спосіб видалення повинен пройти технічну експертизу на придатність і бути погоджений між договірними сторонами, особливо в тих випадках, коли розчинник як очисний засіб розбризкується безпосередньо на контрольовану деталь.

Видалення гідрофільного постемульгованого пенетранту з контрольованої поверхні його можна зробити водозмивним шляхом нанесення емульгатора. Перед нанесенням емульгатора потрібно провести промивання водою, щоби видалити основну частину надлишку пенетранту з контрольованої поверхні та створити сприятливі умови для рівномірної дії гідрофільного емульгатора, який наносять після промивання. Емульгатор потрібно наносити шляхом занурення або зпінення. Концентрацію та тривалість контакту емульгатора користувач має визначити шляхом попередніх випробувань згідно з інструкціями виробника. Не можна перевищувати попередньо визначений час контакту емульгатора. Після емульгування потрібно провести остаточне змивання.

Видалення ліпофільного (на масляній основі) постемульгованого пенетранту з контрольованої поверхні можна зробити водозмивним шляхом нанесення емульгатора. Цього можна досягти тільки шляхом занурення. Тривалість контакту емульгатора користувач повинен визначити шляхом попередніх випробувань згідно з інструкціями виробника. Ця тривалість має бути достатньою для того, щоби дозволити видалити промиванням водою лише надлишок пенетранту з контрольованої поверхні. Визначений час емульгування перевищувати не можна. Відразу після емульгування потрібно провести змивання.

Під час видалення надлишку пенетранту контрольовану поверхню потрібно перевірити на наявність залишків пенетранту. Для флуоресцентних пенетрантів перевірку потрібно проводити за допомогою ультрафіолетового світильника. Мінімальна освітленість ультрафіолетовим випромінюванням повинна бути не менше ніж 1 Вт/м² (100 мкВт/см²), а видиме світло – не біль-

ше 100 лк. Для кольороконтрастних пенетрантів освітленість білим світлом на контрольованій поверхні має бути не менше 350 лк. Надлишковий фон зазвичай вимагає повторної обробки поверхні, якщо інше не дозволено фахівцем із належної кваліфікацією.

Сушіння. Щоби швидше висушити надлишки води, з деталі потрібно видалити будь-які краплі та скупчення води. За винятком випадків, коли застосовується проявник на водній основі, контрольовану поверхню потрібно висушити якнайшвидше після видалення надлишку пенетранта, використовуючи один із наступних способів:

- а) витирання чистою, сухою, безворсовою тканиною;
- б) випаровування при температурі навколишнього середовища після занурення в гарячу воду;
- в) випаровування при високій температурі;
- г) примусова циркуляція повітря;
- д) комбінація способів а) – г).

Якщо використовується стиснене повітря, особливу увагу потрібно звернути на те, щоби контрольована поверхня була вільна від води та мастила і щоби падаючий на поверхню деталі тиск був якнайнижчий. Якщо використовується система сушіння вентиляванням при низькому тиску (наприклад, сушильна камера), температура повітря не повинна перевищувати 70 °С. Тривалість сушіння повинна бути такою, щоби температура поверхні не піднімалась вище 50 °С. Сушіння деталі, що підлягає контролю, потрібно виконувати таким чином, щоби не висушити пенетрант, який проник у несущільності. Температура поверхні не повинна перевищувати 50 °С під час процесу сушіння, якщо не дозволено інше.

Нанесення проявника. Проявник при використанні потрібно підтримувати в однорідному стані та рівномірно наносити на контрольовану поверхню. Наносити проявник потрібно якнайшвидше після видалення надлишку пенетранту. При застосуванні проявників на водній основі з водозмивними пенетрантами потрібно бути обережним, щоб уникнути вимивання пенетранту з несущільностей.

Сухий проявник потрібно використовувати тільки з флуоресцентними пенетрантами. Проявник потрібно наносити на контрольовану поверхню рівномірно одним із наступних способів: розбризкуванням, електростатичним напилюванням, пневморозпилювачем, псевдозрідженим шаром або у вихровій камері. Контрольована поверхня має бути покрита тонким шаром, локальні скупчення неприпустимі. Надлишок проявника потрібно обережно видалити після завершення часу проявлення та перед оглядом, використовуючи спосіб, який не пошкодить індикації.

Проявник у вигляді водної суспензії слід наносити тонким шаром імерсійно (зануренням) у збовтану суспензію або розбризкуванням за допомогою відповідного обладнання та відповідно до схваленої процедури. Час занурення та температуру проявника має визначати користувач на основі попередніх випробувань згідно з інструкціями виробника. Для забезпечення оптимальних результатів час занурення має бути якнайкоротшим. Деталь потрібно просушити шляхом випаровування і/або у сушильній камері з примусовою циркуляцією повітря.

Проявник на основі розчинника потрібно наносити рівномірно розпилюванням так, щоби контрольована поверхня була рівномірно змочена й утворилась тонка та однорідна плівка.

Водорозчинний проявник слід наносити тонким шаром шляхом занурення або розпилення відповідним обладнанням згідно зі схваленою процедурою. Час занурення та температура проявника мають бути визначені користувачем на основі попередніх випробувань згідно з інструкціями виробника. Для забезпечення оптимального результату час занурення має бути якнайкоротшим. Деталь потрібно просушити шляхом випаровування і/або у сушильній камері з примусовою циркуляцією повітря.

Проявник для спеціального застосування на водній основі чи на основі розчинника (проявник, що відшаровуються) слід використовувати, якщо індикація, відображена процесом капілярного контролю, потребує фіксації. Після завершення рекомендованого часу проявлення треба обережно зняти шар плівки проявника. Індикації проявляються на поверхні плівки у безпосередньому контакті з деталлю. Тривалість проявлення має становити 10...30 хв. Збільшення тривалості появи допускється за погодженням договірних сторін. Час проявлення починається:

- при використанні сухого проявника – відразу після нанесення;
- при використанні мокрого проявника – відразу після сушіння.

Огляд контрольованої поверхні. Умови огляду повинні відповідати вимогам EN ISO 3059 [9].

При флуоресцентному способі контролю очі контролера повинні звикнути до темряви в зоні огляду щонайменше упродовж 1 хв. У деяких випадках зручніше встановити ультрафіолетове фонове освітлення. Ультрафіолетове випромінювання на контрольованій поверхні має бути не менше 10 Вт/м² (1000 мкВт/см²) при низькому рівні видимого світла (максимальне загальне освітлення від ультрафіолетового світильника 20 лк).

При кольороконтрастному способі контролю для проведення огляду освітленість на контрольованій поверхні має бути не менше 500 лк.

Індикації, що з'являються при капілярному контролі, можуть давати обмежену інформацію щодо форми та розмірів несучільностей. У деяких випадках доречно робити перший огляд поверхні відразу після нанесення проявника або шойно просохне проявник. Це допоможе кращій інтерпретації індикацій. Остаточний огляд потрібно проводити після завершення часу проявлення. Можна використовувати допоміжні засоби контролю, такі як збільшувальні інструменти. Реєстрація результатів може здійснюватися будь-яким підходящим методом (наприклад, письмовий опис, ескіз чи фотографія). Вимоги до змісту протоколу капілярного контролю викладені в EN ISO 3452-1 [1]. Кінцеве очищення контрольованої поверхні після завершення огляду необхідно тільки в тих випадках, коли залишки проявника можуть вплинути на подальшу обробку чи використання проконтрольованої деталі. За потреби наносять антикорозійне покриття.

Випробування процесу капілярного контролю. У стандарті EN ISO 3452-1 [1] також наведені вимоги до випробування окремих процесів контролю для моніторингу впровадження методу. З метою збереження цілісності процесу капілярного контролю весь процес та окремі складові системи потрібно регулярно перевіряти, аби пересвідчитись, що вони відповідають стандартам. Ця вимога стосується процесів, де матеріали використовуються повторно, а також продуктів, які постачають в аерозольних упаковках для одиничних інспекцій.

Нижче перелічено випробування певних процесів, які потрібно проводити з установленою періодичністю:

1. оцінка ефективності системи випробувань на контрольних зразках;
2. очищення деталей, що слугують контрольними зразками;
3. зовнішній вигляд пенетранту;
4. зовнішній вигляд води для промивання;
5. температура води для промивання;
6. температура сушильної камери;
7. чистота робочої зони;
8. стан фільтрів стисненого повітря;
9. стан ламп і фільтрів ультрафіолетового випромінювання спектру А;
10. вимірювання інтенсивності ультрафіолетового випромінювання спектру А;
11. вимірювання інтенсивності видимого світла в оглядовій кабіні флуоресцентної системи;
12. вимірювання інтенсивності видимого світла в робочій зоні кольороконтрастної системи;
13. вимірювання флуоресцентної яскравості пенетранту;
14. оцінювання інтенсивності кольору пенетранту;

15. випробування концентрації гідрофільного очисника;

16. оцінювання зовнішнього вигляду сухого порошкоподібного проявника;

17. вимірювання концентрації і випробування на змочуваність водорозчинного проявника;

18. вимірювання концентрації і випробування на змочуваність проявника у формі водної суспензії;

19. калібрування ультрафіолетового радіометра, люксметра, термометра, датчика тиску;

20. калібрування контрольного зразка.

Стандарт EN ISO 3452-2 [2] визначає рівні чутливості, технічні вимоги та процедури випробувань дефектоскопічних матеріалів як під час дослідження окремих зразків, так і при дослідженні їх партії.

Рівні чутливості. Рівні чутливості визначають окремо для пенетранту, очисника від надлишку пенетранту, проявника та для набору продуктів у цілому. Рівні чутливості для набору флуоресцентних дефектоскопічних матеріалів визначаються еталонними продуктами:

- рівень чутливості ½ (наднизький);
- рівень чутливості 1 (низький);
- рівень чутливості 2 (середній);
- рівень чутливості 3 (високий);
- рівень чутливості 4 (надвисокий).

Рівень чутливості для набору кольороконтрастних матеріалів визначають за допомогою стандартних зразків типу I відповідно до EN ISO 3452-3 [3]:

- рівень чутливості 1 (нормальний);
- рівень чутливості 2 (високий).

Класифікацію пенетрантів подвійної дії за чутливістю можна виконувати так, як для групи кольороконтрастних пенетрантів. Чутливість флуоресцентної і кольороконтрастної систем визначається шляхом порівняння результатів досліджуваних матеріалів і стандартних еталонних продуктів, із використанням контрольних зразків, наприклад, зразків типу I за EN ISO 3452-3 [3]. Детальний опис процедури визначення чутливості дефектоскопічних матеріалів всіх типів наведено в розділі 6 стандарту EN ISO 3452-2 [2].

Випробування дефектоскопічних матеріалів. Дослідження зразків пенетрантів повинне проводитися лабораторією, акредитованою на це відповідно до ISO/IES 17025 з метою забезпечення вимог EN ISO 3452-2 [2]. Кожна виробнича партія проходить періодичне випробування виробником, щоби забезпечити партії ті ж властивості, які має відповідний затверджений зразок. У випадку пенетранту, упакованого в аерозольні балони, необхідно додатково визначати вміст сірки та галогенів. У процесі використання дефектоскопічних матеріалів дослідження виконує користувач.

Таблиця 2. Властивості дефектоскопічних матеріалів, що мають досліджуватися

Пенетранти	Очищувачі від надлишку пенетранту	Проявники
Зовнішній вигляд	Зовнішній вигляд	Зовнішній вигляд
Чутливість	Чутливість	Чутливість
Густина	Густина	Температура загоряння (лише для форми d)
В'язкість	В'язкість	Корозійні властивості (за виключенням форми a)
Температура загоряння	Температура загоряння	Вміст сірки та галогенів ^a
Змивання пенетранту (лише для пенетрантів способу А)	Поглинання води (лише для пенетрантів способу А)	Вміст твердої речовини (лише для форми d)
Флуоресцентна яскравість (пенетранти типу I)	Корозійні властивості	Продуктивність проявника (за виключенням форми e)
Ультрафіолетова стабільність (пенетранти типу I)	Вміст сірки та галогенів ^a	Дисперсійна здатність (лише для форм c і d)
Температурна стабільність (пенетранти типу I)	Залишок після випаровування/вміст твердої речовини	Густина (рідини-носія) (лише для форми d)
Поглинання води (лише для пенетрантів способу А)	Вміст пенетранту (лише способи B і D)	Розподіл часток за розмірами
Корозійні властивості	Вміст води (способи A і E)	Інші забруднювальні домішки
Вміст сірки та галогенів ^a	Інші забруднювальні домішки	
Вміст води (способи A і E)		

^a Вимагається лише для продукції, позначеної «з низьким вмістом сірки та галогенів».

вач відповідно до вимог EN ISO 3452-1 [1] та EN ISO 3452-3 [3]. У табл. 2 наведено перелік властивостей дефектоскопічних матеріалів, що мають досліджуватися.

Детальний опис методів дослідження дефектоскопічних матеріалів всіх типів, вимоги до них, інтерпретація результатів і необхідне приладдя наведені в розділі 6 та в Додатках стандарту EN ISO 3452-2 [2].

Контрольні зразки. Стандарт EN ISO 3452-3 [3] присвячений опису контрольних (випробувальних) зразків типу I і II. Контрольний зразок типу I складається з набору чотирьох пластин, на які нанесено хромонікелеве покриття завтовшки 10, 20, 30 і 50 мкм відповідно. Пластини з покриттям завтовшки 10, 20 і 30 мкм використовують для визначення чутливості флуоресцентних пенетрантних систем. Чутливість кольороконтрастних пенетрантних систем визначають пластинами з покриттями завтовшки 30

і 50 мкм. Контрольний зразок типу II складається з пластини, на одну половину поверхні якої нанесено електролітичним способом нікелеве покриття та тонкий шар хромового покриття, а друга половина спеціально оброблена для надання ділянкам поверхні різної шорсткості. Частина пластини з нанесеним хромонікелевим покриттям містить п'ять розривів зіркоподібної форми. Пластини контрольного зразка типу I мають прямокутну форму з розмірами 35×100×2 мм (рис. 2). Кожна пластина виготовлена з латуні з нанесеним на неї рівномірним шаром завтовшки 10, 20, 30 і 50 мкм відповідно хромонікелевим покриттям. На кожній пластині розтягуванням її у повздовжньому напрямку зроблені поперечні тріщини. Відношення ширини до глибини кожної тріщини повинне становити приблизно 1:20.

Пластина контрольного зразка типу II (рис. 3) має прямокутну форму з розмірами 155×50×2,5 мм. Матеріалом основи є нержавка сталь типу X2Cr

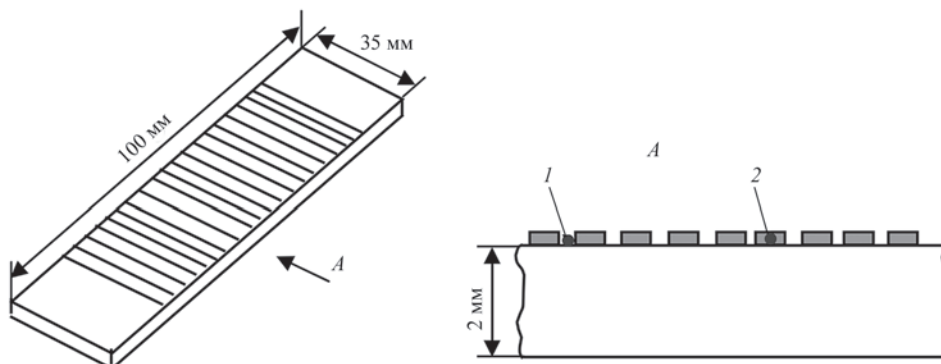


Рис. 2. Пластина контрольного зразка типу I (схематично): 1 – поперечні тріщини, 2 – хромонікелеве покриття завтовшки 10, 20, 30, 50 мкм

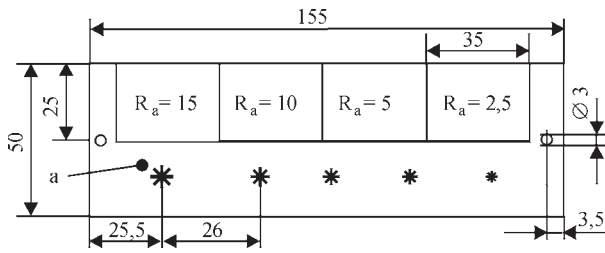


Рис 3. Контрольний зразок типу II

Ni Мо 17-12-3 із початковою твердістю за Віккерсом $HV_{20} = 150 \pm 10$ або еквівалентною. Для перевірки змивання пенетрантів на одній половині пластини виконані з шорсткістю $R_a = 2,5; 5; 10$ і 15 мкм чотири суміжні ділянки розміром 35×25 мм. Ділянка з $R_a = 2,5$ мкм може бути виготовлена піщаноструменевою обробкою, а всі інші ділянки – електроерозійною обробкою.

Ділянка дефектів розташована на другій половині пластини контрольного зразка. Нікелеве покриття завтовшки 60 ± 3 мкм наносять електролітичним способом на поверхню пластини з метою забезпечення значення твердості за Віккерсом у діапазоні $HV_{0.2} = 500 \dots 600$. На нікелеве покриття наносять шар твердого хрому завтовшки $0,5 \dots 1,5$ мкм. Потім пластини піддається термообробці для досягнення значення твердості за Віккерсом у діапазоні $HV_{0.3} = 900 \dots 1000$, наприклад, за допомогою нагрівання до температури $405^\circ C$ протягом 70 хв. Шорсткість R_a хромового покриття повинна бути в межах $1,2 \dots 1,6$ мкм.

П'ять вм'ятин, розташованих на однаковій відстані одна від одної, виготовляються навантаженням 2; 3,5; 5,0; 6,5 і 8 кН, яке прикладається до сторони, оберненої щодо контрольованої поверхні (області з покриттям). Вм'ятини для отримання штучних дефектів утворюються з використанням машини для стиснення (зусилля 120 кН) або машини для вимірювання твердості за Віккерсом, оснащеної напівсферичним індентором. Конструкцію спеціального індентора наведено в стандарті. Вм'ятини отримують за швидкості прикладання навантаження $0,05$ кН/с і швидкості знімання навантаження $0,5$ кН/с при безперервному прикладанні навантаження. Розмір кожного штучного дефекту визначають оптичними засобами як найбільший діаметр, використовуючи калібрувальні шкали.

Кожен випробувальний зразок типу I (комплект пластин) повинен бути ідентифікованим як такий, що відповідає вимогам EN ISO 3452-3, з наступною ідентифікацією постачальника та за серійним номером. Кожен випробувальний зразок типу II повинен бути ідентифікованим як такий, що відповідає вимогам ISO 3452-3, з ідентифікацією постачальника та за серійним номером.

Стандарт EN ISO 3452-4 [4] визначає характеристики обладнання, що використовується при капілярному контролі. Характеристики обладнання,

необхідного для капілярного контролю, залежать від об'єму контролю та від розміру виробів, які будуть випробовуватись. У цей стандарт включено два види обладнання:

- обладнання, придатне для перенесення до місця здійснення контролю;
- стаціонарне обладнання.

Обладнання, що використовується в капілярному контролі, має вибиратись і застосовуватись відповідно до наступних вимог:

- обладнання має бути придатним для реалізації технології капілярного контролю;
- мають бути виконані всі вимоги щодо техніки безпеки, охорони здоров'я та навколишнього середовища;
- мають бути умови застосування відповідно до вимог EN ISO 3452-1 [1], EN ISO 3452-2 [2] та EN ISO 3452-3 [3].

У якості переносного обладнання, що використовується для контролю поза робочим місцем, може застосовуватись наступне: переносне обладнання для розпилення; щітки; персональне захисне обладнання; безворсисті серветки та одяг; джерела білого світла; джерело УФ-А світла.

Виробниче стаціонарне обладнання, що використовуються в капілярному контролі, наприклад, баки, трубопроводи чи системи каналів, мають бути стійкими до дії продуктів, що застосовуються в повному робочому циклі. Крім того, ці матеріали не мають викликати будь-які зміни властивостей дефектоскопічних матеріалів, що використовуються.

Обладнання має встановлюватись там, де відсутня можливість його забруднення робочими речовинами із зовнішніх джерел, наприклад, витоком із підвісного паропроводу. Крім того, баки з дефектоскопічними матеріалами повинні мати кришки, які закриваються на час простою обладнання.

Якщо підприємство має систему для обробки стічних вод або переробки води, система має бути розроблена таким чином, щоби будь-яка рідина, що попадає у стічні води, відповідала місцевим вимогам щодо стічних вод. Крім того, перероблена вода повинна бути такої якості, щоби можна було полоскати деталі.

Коли використовується система вентиляції, наприклад, при розпиленні пенетранту, то вона має повністю відповідати місцевим вимогам щодо норм техніки безпеки та охорони здоров'я, а також місцевим законам про викиди в атмосферу. Всі хімічні речовини, що використовуються в капілярному контролі, мають зберігатись у закритих контейнерах, а їх зберігання має відповідати вимогам техніки безпеки та охорони здоров'я.

Обладнання дільниці (робочого місця) підготовки та попереднього очищення об'єктів

контролю повинне гарантувати, що вироби знежирені та очищені відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 3452-1 [1]. Якщо необхідно, має бути обладнання для охолодження виробів перед застосуванням пенетранту. Засоби для знежирення, очищення та охолодження мають бути в необхідній кількості для здійснення технологічного процесу контролю виробів. Знежирення парами рідини, що включає галогенізований вуглець, має відповідати вимогам щодо забруднення повітря.

Дільниця (робоче місце) застосування пенетранту повинна мати обладнання для нанесення пенетранту за допомогою пневматичного розпилення, безповітряного або електростатичного розпилення, розпилення з аерозольного балончика, щіткою, наливом або зануренням у бак з пенетрантом. Баки, що використовуються для відпрацьованих дефектоскопічних речовин, повинні мати піддон для збору стоку. При використанні люмінесцентних пенетрантів і ручного обладнання для розпилення необхідно користуватись джерелом світла типу УФ-А для перевірки поверхні, вкритої пенетрантом. При застосуванні розпилення використовується відповідне обладнання для захисту.

Дільниця видалення надлишку пенетранту повинна включати:

- робоче місце для змивання пенетранту зануренням, оснащеним баками для миття, які мають засоби для кондиціонування води та контролю температури води;
- робоче місце для змивання пенетранту розпиленням повинно мати обладнання для ручного або автоматичного розпилення, наприклад, водний або повітряний/водний пістолет для утворення необхідного струменя низького тиску при температурі, що не перевищує 50 °С;
- робоче місце емульсування повинно бути обладнано баками для нанесення гідрофільного чи ліпофільного емульгаторів способом занурення, які повністю вміщують контрольовані вироби в розчині протягом часу емульсування;
- робоче місце сушіння виробів від води повинне мати відповідне обладнання, наприклад, систему вакуумування, барабан, що обертається, генератор гарячого повітря з температурою до 80 °С, піч із потоком стисненого повітря тощо.

Дільниця застосування проявника повинна мати наступне обладнання:

- для нанесення на вироби тонкого рівномірного шару порошкоподібного проявника: камеру вихрову порошкову; електростатичний розпилювач; порошокорозпилювач; перекидний механізм; повітряний інжектор; камеру флюїдизації;
- для нанесення суспензійного проявника на основі води робоче місце повинне бути обладнане ба-

ком, що має кришку, а його розміри повинні забезпечити повне занурення виробів. Бак повинен мати апаратуру для тривалого перемішування проявника за допомогою чистого повітря або механічним чином, мати пристрої для підтримання температури проявника на рівні рекомендацій виробника та мати систему стоку надлишку проявника в резервуар;

- для нанесення суспензійного проявника на основі розчинника робоче місце повинне мати обладнання для розпилення проявника всередині камери. Проявник може бути нанесений за допомогою повітря або електростатичним розпиленням. Обладнання повинне забезпечити за допомогою відповідного механічного перемішування збереження проявника в стані суспензії. Якщо необхідно, розпилювач повинен підключатись до джерела чистого, сухого відфільтрованого повітря. Проявник можна розпилити з аерозольного балончика.

Дільниця огляду повинна бути достатньо просторою, щоби персонал міг вільно пересуватись і переміщувати контрольовані вироби, а поверхня робочих столів повинна бути такою, що не відбиває світло. Для люмінесцентного контролю необхідні відповідні лампи УФ-А типу, що відповідають вимогам EN ISO 3059 [3]. Ультрафіолетові лампи також використовуються для фонові освітлення. Лампи мають бути розташовані таким чином, щоби рівень видимого світла навколишнього середовища не перевищував 20 лк. Для контролю кольороконтрастним пенетрантом джерело білого світла має створювати на поверхні контрольованого виробу освітлення не менше 500 лк.

Цілий ряд стандартів установлюють додаткові вимоги до технологій контролю окремих видів продукції та наводять рівні приймання за результатами капілярних випробувань. Стандарт EN ISO 23277:2014 [10] установлює три рівні приймання для зварних швів металевих матеріалів за розміром лінійних та округлих індикацій. Стандарт ISO 4987:2010 [11] установлює рівні приймання для сталевих відливок за розміром лінійних чи округлих індикацій та їх розташуванням на найбільш неблагополучній ділянці розміром 105×148 мм. Порівняльні рисунки індикацій на таких ділянках наведені в стандарті. Стандарти EN 1371-1:2011 [12] та EN 1371-2:2015 [13] установлюють рівні приймання для металевих відливок за розміром лінійних чи округлих індикацій та їх розташуванням на найбільш неблагополучній ділянці розміром 105×148 мм. Таблиці та порівняльні рисунки індикацій на таких ділянках наведені в стандарті. Стандарт EN 10228-2:2016 [14] установлює чотири рівні приймання для сталевих поковок за розміром лінійних чи округлих індикацій та їх розташуванням на найбільш неблагополучній ділянці

розміром 105×148 мм. Числові значення недопустимих індикацій наведені в таблиці.

Висновки

Положення міжнародних стандартів, названих у цій статті, раніше на промислових підприємствах України не застосовувалися.

Стандарт [1] формалізує п'ять базових технологічних схем капілярного контролю та встановлює вимоги до технологічних операцій.

Стандарт [2] визначає рівні чутливості, технічні вимоги та процедури випробовувань дефектоскопічних матеріалів як під час дослідження окремих зразків, так і при дослідженні їх партії.

Стандарт [3] описує контрольні (випробувальні) зразки типу I і II, які використовуються для перевірки працездатності комплектів дефектоскопічних матеріалів та їх чутливості.

Стандарт [4] визначає характеристики обладнання, що використовується при капілярному контролі. Характеристики обладнання, необхідного для капілярного контролю, залежать від об'єму контролю та від розміру виробів, які будуть випробовуватись.

Для температур, що виходять за межі діапазону 10...50 °С, контроль потрібно проводити відповідно до стандартів [5] або [6] залежно від ситуації.

Стандарти [10–15] установлюють додаткові вимоги до технологій контролю окремих видів продукції і наводять рівні приймання за результатами капілярних випробувань зварних з'єднань, сталевих литва, поковок і безшовних труб.

Список літератури/References

1. EN ISO 3452-1:2021 Non-destructive testing — Penetrant testing — Part 1: General principles. (ДСТУ EN ISO 3452-1:2022, Неруйнівний контроль – Капілярний контроль – Частина 1: Загальні вимоги).
2. EN ISO 3452-2:2021 Non-destructive testing — Penetrant testing — Part 2: Testing of penetrant materials (ДСТУ EN ISO

- 3452-2:2022, Неруйнівний контроль – Капілярний контроль – Частина 2: Випробування дефектоскопічних матеріалів).
3. EN ISO 3452-3:2021 Non-destructive testing – Penetrant testing – Part 3: Reference test blocks (ДСТУ EN ISO 3452-3:2022 Неруйнівний контроль – Капілярний контроль – Частина 3: Контрольні випробувальні зразки).
4. EN ISO 3452-4:2020 Non-destructive testing – Penetrant testing – Part 4: Equipment (ДСТУ EN ISO 3452-4:2020 Неруйнівний контроль – Капілярний контроль – Частина 4: Обладнання).
5. EN ISO 3452-5:2014 Non-destructive testing – Penetrant testing – Part 5: Penetrant testing at temperatures higher than 50 degrees C (ДСТУ EN ISO 3452-5:2014 Неруйнівний контроль – Капілярний контроль – Частина 5: Капілярний контроль при температурах понад 50 °С).
6. EN ISO 3452-6:2014 Non-destructive testing – Penetrant testing – Part 6: Penetrant testing at temperatures lower than 10 degrees C (ДСТУ EN ISO 3452-6:2014 Неруйнівний контроль – Капілярний контроль – Частина 6: Капілярний контроль при температурах нижче 10 °С).
7. EN ISO 12706:2009 Non-destructive testing – Penetrant testing – Vocabulary (ДСТУ EN ISO 12706:2016 Неруйнівний контроль – Капілярний контроль – Словник).
8. EN ISO 9712:2022 Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel (ДСТУ EN ISO 9712:2022 Неруйнівний контроль – Кваліфікація і сертифікація персоналу неруйнівного контролю).
9. EN ISO 3059:2012 Non-destructive testing – Penetrant and magnetic particle testing – Viewing conditions (ДСТУ EN ISO 3059:2016 Неруйнівний контроль – Капілярний і магнітопорошковий контроль – Умови огляду).
10. EN ISO 23277:2009 Non-destructive testing of welds – Penetrant testing of welds – Acceptance levels. (EN ISO 23277:2014 Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Капілярний контроль зварних з'єднань. Рівні приймання).
11. ISO 4987:2010 Steel casting – Liquid penetrant inspection. (ДСТУ ISO 4987:2015 Сталеві відливки. Капілярний контроль).
12. EN 1371-1:2011 Founding – Liquid penetrant testing – Part 1: Sand, gravity die and low pressure die castings (ДСТУ EN 1371-1:2015 Литво. Капілярний контроль. Частина 1. Відливки, виготовлені литтям в піщані форми та литтям в цокіль під дією сили тяжіння і під низьким тиском).
13. EN 1371-2:2015 Founding – Liquid penetrant inspection – Part 2: Investment castings (ДСТУ EN 1371-1:2015 Литво. Капілярний контроль. Частина 2. Відливки, виготовлені точним литтям).
14. EN 10228-2:2016 Non-destructive testing of steel forgings — Part 2: Penetrant testing (ДСТУ EN 10228-2:2017 Неруйнівний контроль поковок зі сталі. Частина 2. Капілярний контроль).
15. EN ISO 10893-4:2011 Non-destructive testing of steel tubes — Part 4: Liquid penetrant inspection of seamless and welded steel tubes for the detection of surface imperfections (ДСТУ EN ISO 10893-4:2015 Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 4).

ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS OF INTERNATIONAL STANDARDS REGARDING CAPILLARY CONTROL TECHNOLOGIES FOR METAL PRODUCTION

Yu.M. Posypaiko, S.A. Shchupak

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

The process of harmonization of European Union standards in Ukraine, which began in the 2000s, led to appearance of about a hundred new regulatory and technical documents in the field of non-destructive quality control of metal products and the cancellation of previously valid ones. The standardization system in Ukraine is characterized by a certain closedness: lack of official texts of standards in the Ukrainian language, paid access to the standards base, sometimes lack of any texts of officially accepted documents. This led to insufficient awareness of specialists regarding the requirements of current standards. This article analyzes the main requirements and provisions of international standards in the field of capillary control, one of the frequently used types of non-destructive testing, which is conducted to detect discontinuities such as cracks, films, folds, porosity and junctions, which appear on the surface of the tested material. This testing is mainly applied to metallic materials, but it can also be used to control other materials, provided that they are inert to the influence of flaw detection materials and are not too porous (castings, forgings, welds, ceramics, etc.). 15 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: non-destructive testing, capillary testing, standards, requirements, penetrant, cleaner, developer, sensitivity, equipment

Отримано 02.12.2024

Отримано у переглянутому вигляді 10.01.2025

Прийнято 15.03.2025

Ю.М. ПОСИПАЙКУ – 75!



У січні 2025 р. виповнилося 75 років від дня народження Юрія Миколайовича Посипайка – провідного інженера ІЕЗ ім. Є.О. Патона, активного учасника та модератора багатьох науково-технічних проєктів і розробок, учасника Антарктичних експедицій на станції «Академік Вернадський», автора книг, журнальних публікацій, доповідей, організатора конференцій.

Сімнадцятирічним юнаком Ю.М. Посипайко приїхав з Черкащини та вступив на радіофізичний факультет Київського державного університету ім. Тараса Шевченка, а по його закінченню протягом чотирьох років у НДІ «Квант» досліджував фізичні процеси в плазмових панелях та освоював розробку електронних блоків систем відображення інформації.

З 1976 р. і до сьогодні Ю.М. Посипайко працює в ІЕЗ ім. Є.О. Патона у відділі неруйнівних фізичних методів контролю якості зварних з'єднань.

Ю.М. Посипайко брав участь у багатьох важливих науково-технічних проєктах. Серед них технології та обладнання неруйнівного контролю багатопарових труб великого діаметру, технології та обладнання для контролю герметичності теплообмінних труб та агрегатів космічного базування, оболонки підземних траншейних і наземних циліндричних резервуарів для зберігання нафтопродуктів. Проводив роботи з удосконалення технологій комплексного технічного контролю різних виробів і споруд. Сферою його наукових інтересів стали контроль герметичності, капілярний, магнітний, вихрострумний, візуальний та інші види контролю, а також комплексний технічний контроль металоконструкцій.

З 1985 р. одним з напрямків його діяльності є технічне обстеження резервуарів. Ю.М. Посипайко виконував роботи на резервуарах різних типів на підприємствах Держрезерву СРСР, РФ та Укра-

їни, на всіх нафтопереробних заводах України, на «Севродонецькому Азоті», численних нафтобазах, а також неруйнівний контроль паливних резервуарів «Морський старт». Зважаючи на багаторічний досвід в діагностуванні резервуарів ІЕЗ ім. Є.О. Патона командував його для виконання подібних робіт на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» у 2016 та 2019 роках.

Ю.М. Посипайко підготував більше 150 публікацій. Це – книги, наукові статті, доповіді на численних конференціях, авторські свідоцтва, учбові посібники, інформаційні публікації про новини у світі неруйнівного контролю тощо. Він веде навчання та атестацію фахівців з неруйнівного контролю, виконує роботи із сертифікації технології та продукції виробництва, готує державні стандарти України.

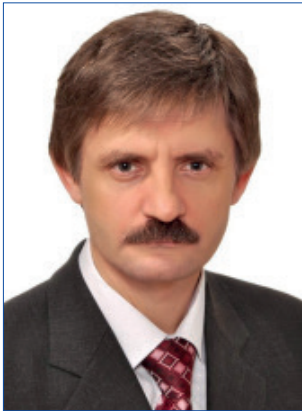
Ю.М. Посипайко був учасником багатьох міжнародних конференцій не тільки в Україні, а й за кордоном – у Данії, Італії, Іспанії, Німеччині, Чехії, Польщі, Ірані. У 1990 р. він був серед ініціаторів створення Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики та був його ученим секретарем у перші найважливіші 10 років становлення. І сьогодні він є членом правління УТ НКТД, оргкомітетів конференцій, що проводить Товариство, редколегії журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Три головні завдання чоловіка Юрій Посипайко виконав: збудований дім, посаджений сад, дочка і син в самостійному житті. Він, як і всі ми, жив, працював і радів разом з Україною, від Народного Руху і проголошення Незалежності до Майдану Гідності і підлого нападу агресивного сусіда, а з 25 лютого 2022 р. тримав в руках автомат в складі одного з підрозділів тероборони.

Ю.М. Посипайко має багато друзів – від однокласників та однокурсників до колег по професії та фанатів Антарктики. Від їх всіх та від співробітників ІЕЗ ім. Є.О. Патона щиро вітаємо Юрія Посипайка з ювілеєм та бажаємо міцного здоров'я, творчих успіхів, нових подорожей та ентузіазму!



П.М. РАЙТЕРУ – 60!



Редколегія та редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» щиро вітають члена редколегії журналу доктора технічних наук, професора Петра Миколайовича Райтера з ювілеєм!

Петро Райтер народився 12 січня 1965 р. у Івано-Франківську. У 1982 р. поступив до Івано-Франківського інституту нафти і газу, який закінчив у 1987 р. за спеціальністю «Автоматизація і комплексна механізація хіміко-технологічних процесів». З 1988 по 1991 рр. навчався в аспірантурі. З 1992 р. почав свою наукову та педагогічну діяльність в Івано-Франківському державному університеті нафти і газу (зараз Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу – ІФНТУНГ) науковим співробітником НДІ університету і асистентом кафедри методів та приладів контролю якості та сертифікації продукції. У 1982 р. захистив кандидатську дисертацію на тему «Розробка та дослідження віброакустичного методу і системи контролю фазового складу газоконденсатного потоку». У цьому ж році почав працювати доцентом кафедри методів та приладів контролю якості та сертифікації продукції, а з 2005 р. – доцентом кафедри технічної діагностики та моніторингу. Як науковець продовжував активно займатись дослідницькою роботою. Проведені наукові дослідження лягли в основу докторської дисертації на тему «Наукові засади та методи і система контролю складу газоводоконденсатних потоків з високим газовмістом», яку він захистив у 2012 р. З 2015 р. – професор, з 2016 р. – завідувач кафедри енергетичного менеджменту і технічної діагностики. З 2023 р. займає посаду професора кафедри інформаційно-вимірювальних технологій ІФНТУНГ.

Петро Миколайович має 30-річний досвід виконання науково-технічних проєктів у галузі інформаційно-вимірювальної техніки, неруйнівного контролю, технічної діагностики та енергетичного менеджменту. Працював експертом з підготовки проєктів з енергозбереження та сталого розвитку на рівні міста та регіону в межах проєкту «Місцеві плани дій з питань довкілля та енергетики (LEAPs) для сталого розвитку, енергетичної диверсифікації та громадської активності громад в Україні» (здійснювався за підтримки Державного департаменту США) 2013–2016 рр. Як локальний

координатор працював у проєкті «Місцеві Ініціативи Задля Стабільної України (LINK) з компонентом LESP – Планування заходів з енергетичної безпеки на місцевому рівні» (фінансувався Норвезьким Міністерством Клімату і Довкілля) 2016–2017 рр. З 2016 р. – голова Спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 з правом прийняття до розгляду та проведення захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора (кандидата) технічних наук за спеціальностями 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин і 05.13.07 – Автоматизація процесів керування до жовтня 2021 р. З 2017 по 2021 рр. – член спеціалізованої вченої ради Д 35.226.01 Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України. З 2018 по 2022 рр. – експерт секції «Приладобудування» Наукової Ради МОН України. З 2024 р. – тренер груп «Навчання енергоаудиторів процесів», проєкт TEAD (Training for Energy Auditors and Technical Designers), що виконується Консорціумом на чолі з Kommunalkredit Public Consulting GmbH (Австрія) за фінансової підтримки Європейського Союзу. Нагороджений Почесною грамотою МОН України.

Наукові інтереси П.М. Райтера присвячено вдосконаленню методів та систем для опрацювання інформації та комп'ютерного моделювання в галузі енергетики та нафтогазовидобутку, розробці апаратного та програмного забезпечення вбудованих систем і мікропроцесорних модулів інформаційно-вимірювальних систем, визначенню складу та вимірюванню витрати газорідних потоків, дослідженню характеристик твердих побутових відходів як енергетичного ресурсу. П.М. Райтер – відомий вчений у галузі інформаційно-вимірювальних систем для вимірювання витрати газорідних потоків і приладів неруйнівного контролю та технічної діагностики нафтогазового обладнання. Ним розроблено теоретичні основи та методи контролю складу та витрат газорідних потоків з високим газовмістом. Він є автором наукових доробок із застосування алгоритмів штучних нейронних мереж в інформаційно-вимірювальних системах і системах неруйнівного контролю. За період роботи в університеті ним опубліковано біля 200 наукових праць, видано п'ять навчальних посібників і дві монографії. Він є автором багатьох авторських свідоцтв на винаходи та патентів.

Петро Миколайович Райтер все своє життя присвятив науковій діяльності, його праці – безцінний внесок у розвиток науки і техніки нашої країни! Щиро бажаємо ювіляру міцного здоров'я, успіхів і благополуччя!



**НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**
член Європейської федерації з неруйнівного контролю
член Міжнародного комітету з неруйнівного контролю



**Вітаємо нових індивідуальних членів
Українського товариства НКТД**

- **Алексенка Анатолія Павловича**
майстра з навчання ПРАТ «Полтавський ГЗК»,
м. Горішні Плавні
- **Андрієнка Володимира Олександровича**
к.т.н., доцента, директора Черкаського полі-
технічного фахового коледжу
- **Зозулю Едуарда Володимировича**
к.т.н., доцента кафедри матеріалознавства На-
ціонального технічного університету «Хар-
ківський політехнічний інститут»
- **Телюту Руслана Васильовича**
к.т.н., доцента кафедри електротехнічних сис-
тем Центральноукраїнського національного
технічного університету, м. Кропивницький

**Підтвердили членство в УТ НКТД
на новий термін**

- **Базіло Костянтин Вікторович**
д.т.н., професор кафедри приладобудування,
мехатроніки та комп'ютеризованих техноло-
гій Черкаського державного технологічного
університету
- **Близнюк Олена Дмитрівна**
молодша наукова співробітниця Національно-
го авіаційного університету, м. Київ
- **Бондаренко Максим Олексійович**
д.т.н., професор, завідувач кафедри приладо-
будування, мехатроніки та комп'ютеризова-
них технологій Черкаського державного тех-
нологічного університету
- **Гальченко Володимир Якович**
д.т.н., професор кафедри приладобудування, ме-
хатроніки та комп'ютеризованих технологій Чер-
каського державного технологічного університету
- **Мешков Сергій Миколайович**
к.т.н., доцент кафедри фізики Харківського
національного університету радіоелектроніки
- **Мягкий Олександр Валерійович**
к.т.н., доцент кафедри фізики Харківського
національного університету радіоелектроніки
- **Орел Роман Петрович**
к.т.н., доцент кафедри фізики Харківського
національного університету радіоелектроніки

- **Тичков Володимир Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри приладобудування, ме-
хатроніки та комп'ютеризованих технологій
Черкаського державного технологічного уні-
верситету
- **Тичков Дмитро Володимирович**
науковий співробітник Державного НДІ ви-
пробування і сертифікації озброєння та вій-
ськової техніки, м. Черкаси
- **Тичкова Наталія Борисівна**
аспірантка кафедри приладобудування, ме-
хатроніки та комп'ютеризованих технологій
Черкаського державного технологічного уні-
верситету
- **Топтун Анна Володимирівна**
PhD, викладачка кафедри приладобудування, ме-
хатроніки та комп'ютеризованих технологій Чер-
каського державного технологічного університету
- **Трембовецька Руслана Володимирівна**
д.т.н., доцентка кафедри приладобудування,
мехатроніки та комп'ютеризованих техноло-
гій Черкаського державного технологічного
університету
- **Туз Вячеслав Валерійович**
к.т.н., доцент кафедри приладобудування, меха-
троніки та комп'ютеризованих технологій Чер-
каського державного технологічного університету
- **Трушаков Дмитро Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри автоматизації вироб-
ничих процесів Центральноукраїнського на-
ціонального технічного університету, м. Кро-
пивницький
- **Філімонов Сергій Олександрович**
к.т.н., доцент кафедри приладобудування, ме-
хатроніки та комп'ютеризованих технологій
Черкаського державного технологічного уні-
верситету
- **Чубукін Олександр Сергійович**
к.т.н., доцент Харківського національного уні-
верситету радіоелектроніки
- **Ящеріцин Євген Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри безпеки праці та навко-
лишнього середовища Національного техніч-
ного університету «Харківський політехніч-
ний інститут»

ПРО НАГАЛЬНУ ПОТРЕБУ СТВОРЕННЯ В УКРАЇНІ НАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СЕРТИФІКАЦІЇ ПЕРСОНАЛУ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Микола Хорло

фахівець з рівня з методів UT, RT, MT, PT, VT, екзаменатор

У 2012 р. Європейським Союзом було ухвалено стандарт Міжнародної організації зі стандартизації (International Organization for Standardization, ISO) ISO 9712, і країни ЄС почали здійснювати процедуру сертифікації персоналу, що виконує промисловий неруйнівний контроль у добровільній сфері, відповідно до стандарту EN ISO 9712 [1]. В Україні цей нормативний документ прийнято як національний стандарт ДСТУ EN ISO 9712:2014 відповідно до наказу Мінекономрозвитку України № 1494 від 30.12.2014 р. У даний час діє сучасна редакція стандарту ДСТУ EN ISO 9712:2022 (EN ISO 9712:2022, IDT), яка набула чинності від 25.06.2023 р.

Отже, у нормативно-правовому полі технічного регулювання України даний стандарт діє вже більше 10 років. Це більш ніж достатній період часу, для того щоби були отримані знання та накопичений практичний досвід щодо застосування чинного стандарту для сертифікації фахівців НК. Весь цей час у середовищі фахівців, які професійно займаються сертифікацією персоналу в галузі НК, постійно триває дискусія щодо того, чи достатньо для здійснення процесу сертифікації застосовування виключно вимог, викладених у стандарті ДСТУ EN ISO 9712, чи необхідно створення Органом, що здійснює оцінку відповідності персоналу (зазвичай використовується термін: Орган із сертифікації персоналу, ОСП), власної адаптованої Схеми проведення екзаменів і сертифікації персоналу НК.

Для відповіді на це запитання буде доречним спочатку розглянути нормативні вимоги, викладені у відповідних стандартах. У нашому випадку такими стандартами є:

- ДСТУ EN ISO/IEC 17024:2019 (EN ISO/

IEC 17024:2012, IDT; ISO/IEC 17024:2012, IDT) Оцінка відповідності. Загальні вимоги до органів, що проводять сертифікацію персоналу;

- ДСТУ EN ISO 9712:2022 (EN ISO 9712:2022, IDT; ISO 9712:2021, IDT) Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю.

Якщо розглянути вимоги ДСТУ EN ISO/IEC 17024:2019 [2], то вимога щодо наявності, змісту та вимог до Схеми сертифікації ОСП ретельно регламентована. Розділ 8 стандарту «Схеми сертифікації» формулює ці вимоги наступним чином (дослівне цитування тексту документа):

8.1 Для кожної категорії сертифікації повинна існувати схема сертифікації.

8.2 Схема сертифікації повинна містити наступні елементи:

- a) сфера сертифікації;
- b) опис роботи та завдань;
- c) необхідну компетентність;
- d) здібності (якщо це застосовують);
- e) передумови (якщо це застосовують);
- f) кодекс поведінки (якщо це застосовують).

Примітка 1. Здібності можуть включати фізичні можливості, наприклад зір, слух і мобільність.

Примітка 2. Кодекс поведінки описує етичну або особисту поведінку, яку вимагає схема.

8.3 Схема сертифікації повинна містити наступні вимоги до процесу сертифікації:

- a) критерії для первинної та повторної сертифікації;
- b) методи оцінювання для первинної та повторної сертифікації;
- c) методи та критерії для нагляду (якщо

це застосовують);

д) критерії для призупинення і скасування сертифікації;

е) критерії для зміни сфери або рівня сертифікації (якщо це застосовують).

Порівняння вимог розділу 8 стандарту ДСТУ EN ISO/IEC 17024:2019 та вимог, викладених у ДСТУ EN ISO 9712:2022, дає підставу для висновку, що стандарт ДСТУ EN ISO 9712:2022 у повній мірі відповідає вимогам стандарту ДСТУ EN ISO/IEC 17024:2019 щодо Схеми сертифікації. Присутні й певні уточнення щодо формулювання вимог до Схеми сертифікації (дослівне цитування тексту ДСТУ EN ISO 9712:2022):

5.2.2 Орган з сертифікації:

а) повинен ініціювати, просувати, підтримувати та адмініструвати схему сертифікації відповідно до ISO/IEC 17024 та цього документа;

д) публікує інформацію про сферу застосування схеми сертифікації та загальний опис процесу сертифікації.

Як можна побачити, стандарт ДСТУ EN ISO 9712:2022 ніяким чином не відмінює наявності в ОСП *власної Схеми сертифікації*. Причиною цього є необхідність подальшої конкретизації вимог, викладених у стандарті. Серед таких вимог можуть бути:

– вимоги до кандидата (базової освіти, теоретичної підготовки з НК, виробничого досвіду, зору, медичних вимог до фізичного стану кандидата (для радіографічного методу НК), віку та ін.);

– вимоги до проведення кваліфікаційного іспиту (процес розробки та відбору екзаменаційних питань і зразків, методологію та процедури забезпечення справедливості, валідності, надійності та загальної ефективності екзаменів, конфіденційність і безпеку екзаменаційних питань і зразків);

– вимоги до процесу сертифікації кандидата (докази сертифікації, які можуть бути досягнуті шляхом видачі паперового або цифрового сертифіката та/або шляхом електронного завантаження та відображення відповідної інформації в базі даних на веб-сайті ОСП; заходи для запобігання фальсифікації; процедури видачі, продовження, призупинення, скасу-

вання або переоформлення сертифікатів; інші вимоги);

– вимоги що забезпечують адаптацію національних особливостей технічного регулювання (наприклад: включення в схему сертифікації специфічних промислових секторів).

Доцільним буде й загальний огляд і вивчення досвіду схем сертифікації, що діють в інших країнах (або об'єднаннях країн), що також застосовують стандарт ISO 9712:2021. Як приклад серед подібних документів можуть бути розглянуті:

– RC/C 14 «Rules for the Certification of Non-Destructive Test Operators according to ISO 9712:2021 standard» (Правила сертифікації операторів неруйнівного контролю у відповідності до стандарту ISO 9712:2021); Власник Схеми сертифікації: Holding Company RINA S.p.A. (Італійський морський реєстр, італ.: Registro Italiano Navale, RINA);

– SQMV02 REV. 11.2 VERFAHRENS-BESCHREIBUNG für die Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) (Опис Процедури кваліфікації та атестації персоналу з неруйнівного контролю (НК); Власник схеми сертифікації: SECTOR Cert – Gesellschaft für Zertifizierung GmbH;

– NORDTEST DOC GEN 010 ed. 7.2 2024:09 EN ISO 9712/Nordtest Scheme; Власник схеми сертифікації: NORDTEST, організація північно європейських країн, що діє як об'єднаний орган у сфері компетенції та експертизи в питаннях гармонізації норм і методів.

Оскільки вищезгадані документи захищені авторським правом і відповідними законодавчими правилами на їх використання, вони не можуть бути відтворені або процитовані, повністю або частково, без дозволу їх власників. Ознайомитись з цими документами можна за посиланнями на їх офіційні сторінки в мережі Інтернет. Обмежимось загальними висновками щодо їх змісту.

Основні передумови, що спричинили ініціювання розроблення та створення вищезгаданих схем сертифікації наступні:

1. Стандарт EN ISO 9712 містить загальні вимоги, що стосуються процедури атестації та сертифікації, водночас вимоги до технічного змісту, принципів ухвалення рішень

або якісного рівня проведення кваліфікаційного іспиту в EN ISO 9712 чітко не викладено. У зв'язку з цим, існує необхідність мати додаткові нормативні документи, що регламентують конкретний порядок проведення іспитів.

2. Додаткові вимоги до підготовки кандидатів, змісту та проведення кваліфікаційних іспитів і процедури сертифікації загалом забезпечили необхідні умови для поліпшення загальної якості послуг з НК для споживачів.

3. Були досягнуті умови для забезпечен-

Країна	Схема сертифікації	Організація – власник Схеми	Відповідність стандарту
Велика Британія	PCN (Personnel Certification in Non-Destructive Testing) Certification Scheme	BINDT (British Institute of Non-Destructive Testing) Британський інститут неруйнівного контролю	Базується на ISO 9712. Схема враховує вимоги європейських і міжнародних стандартів, адаптована до різних галузей промисловості, включаючи авіацію, енергетику, транспорт і нафтогазовий сектор
Німеччина	DIN ISO 712, DPZ Certification Scheme	DIN (Deutsches Institut für Normung) Німецький інститут стандартизації спільно з DGZfP (Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung) Німецьке товариство неруйнівного контролю	Повністю відповідає вимогам EN ISO 9712. Схема враховує специфіку промисловості та законодавства Німеччини. Адаптована до потреб конкретних галузей, таких як авіація, енергетика, транспорт і металургія
Франція	COFREND Certification Scheme.	COFREND (Confédération Française pour les Essais Non Destructifs) Французька конфедерація з неруйнівного контролю	Повністю відповідає вимогам EN ISO 9712. Схема передбачає адаптацію до національних потреб і стандартів (вимог конкретних галузей, таких як ядерна енергетика, авіація, транспорт тощо)
Канада	CAN/CGSB-48.9712 Certification Scheme	CGSB (Canadian General Standards Board) Канадська генеральна рада з національних стандартів	CAN/CGSB-48.9712, ідентичний ISO 9712. Сертифікація за стандартом CAN/CGSB-48.9712 є обов'язковою для роботи у багатьох промислових секторах Канади. Стандарт адаптований до застосування в галузях: авіація, нафтогазова промисловість, енергетика (включаючи атомну), транспорт, металургія
Індія	ISNT Certification Scheme for NDT Personnel	ISNT (Indian Society for Non-Destructive Testing) Індійське товариство неруйнівного контролю	Адаптована версія ISO 9712. Схема приділяє увагу певним специфічним індійським галузевим стандартам і вимогам, особливо в таких галузях, як енергетика, суднобудування, авіація або інші ключові індустрії в Індії
Японія	JSNDI Certification Scheme for NDT Personnel	JSNDI (Japanese Society for Non-Destructive Inspection) Японське товариство неруйнівного контролю	Гармонізована з ISO 9712. Схема враховує специфіку японських стандартів у виробництві, таких як JIS (Japanese Industrial Standards). Це особливо важливо для таких галузей, як атомна енергетика, авіація, морська промисловість і автомобілебудування, де Японія має високі стандарти безпеки
Китай	CSNDT Certification Scheme for NDT Personnel	CHSNDT (Chinese Society for Non-Destructive Testing) Китайське товариство неруйнівного контролю	Ґрунтується на ISO 9712. Важливим аспектом схеми є адаптація сертифікації до специфічних вимог китайської промисловості та національних стандартів
Південна Корея	KSNT Certification Scheme for NDT Personnel	KSNT (Korean Society for Non-destructive Testing) Корейське товариство неруйнівного контролю	Стандарт KS A ISO 9712. Схема передбачає сертифікацію персоналу за специфічними вимогами різних індустріальних секторів. Це може включати специфічні стандарти для таких секторів, як: атомна енергетика, автомобільна промисловість, морська промисловість, авіація
Австралія та Нова Зеландія	AINDT Certification Scheme for NDT Personnel	AINDT (Australian Institute for Non-Destructive Testing) Австралійський інститут неруйнівного контролю	Адаптована версія ISO 9712. Схема сертифікації передбачає сертифікацію не тільки за методами NDT, але й за специфічними галузями застосування таких як: авіація, енергетика (особливо атомна енергетика), будівництво, автомобільна промисловість, морська промисловість, нафта і газ

ня єдиного кваліфікаційного рівня персоналу з НК, який визнається, приймається, а іноді й вимагається державними органами та споживачами послуг НК.

Необхідно також акцентувати увагу на тому важливому аспекті, що зміст вищезазначених документів містить лише додаткові вимоги до схеми, викладеної в EN ISO 9712, і деякі її уточнення. У всіх інших випадках розглянути Схеми сертифікації повністю відповідають змісту вимог стандарту EN ISO 9712.

На завершення, зробимо загальний огляд Національних схем сертифікації фахівців НК, які розроблені та відповідно впровадженні в різних країнах світу. До розгляду берем тільки ті Національні схеми сертифікації фахівців НК, які засновані на вимогах стандарту ISO 9712. Нижче наведені приклади таких схем.

Висновки, які можна зробити за результатами аналізу таблиці:

1. Національні Схеми сертифікації адаптують вимоги стандарту ISO 9712 до особливостей промисловості країни, спрямованості їх основних галузей індустрії.

2. Національні схеми сертифікації включають вимоги національних і специфічних (для певної галузі) стандартів.

3. Ініціатором і розробником Схеми сертифікації зазвичай є національне товариство неруйнівного контролю. Крім того, товариство неруйнівного контролю постійно займається просуванням, визнанням, підтримкою та адмініструванням схеми сертифікації.

Все вищеописане в повній мірі має віддзеркалення по відношенню до національної системи сертифікації персоналу України. В Україні органи із сертифікації (на сьогоднішній день – вісім акредитованих ОСП) наразі проводять роботи з сертифікації за власними схемами. Ці схеми у значній мірі різняться між собою. Якість змісту власних схем, а отже і якість робіт з сертифікації доволі часто не відповідають очікуванням замов-

ників. Все це призводить до зниження рівня компетенції та кваліфікації фахівців з неруйнівного контролю, що працюють у промисловості, та зрештою до знецінення в цілому системи сертифікації персоналу України.

У висновку – система сертифікації персоналу України потребує об'єднання зусиль для створення єдиної національної схеми сертифікації. Вирішення цього питання цивілізованим шляхом, з урахуванням світового досвіду, полягає в тому, що ініціатором та розробником схеми сертифікації має стати Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики. Шановні колеги, прийшов час діяти.

Список літератури

1. ДСТУ EN ISO 9712:2022 Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю (EN ISO 9712:2022, IDT; ISO 9712:2021, IDT). <https://uas.gov.ua/>
2. ДСТУ EN ISO/IEC 17024:2019 Оцінка відповідності. Загальні вимоги до органів, що проводять сертифікацію персоналу (EN ISO/IEC 17024:2012, IDT; ISO/IEC 17024:2012, IDT). <https://uas.gov.ua/>
3. RC/C 14 Rules for the Certification of Non-Destructive Test Operators according to ISO 9712:2021 standard. <https://www.rina.org/en/>
4. SQMV02 REV. 11.2 VERFAHRENSBESCHREIBUNG für die Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP). <https://www.sectorcert.com/>
5. NORDTEST DOC GEN 010 ed.7 Handbook for Nordtest certification bodies / Nordtest scheme for examination and certification of NDT personnel. <https://www.nordtest.info/wp/>
6. PCN Personnel Certification in Non-Destructive Testing. <https://www.bindt.org/Certification/pcn-examinations/>
7. DGZfP Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung. <https://www.dgzfp.de/>
8. COFREND Confédération Française pour les Essais Non Destructifs. <https://www.cofrend.com/>
9. CGSB Canadian General Standards Board. <https://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/>
10. ISNT Indian Society for Non-Destructive Testing. <https://www.isnt.in/>
11. JSNDI Japanese Society for Non-Destructive Inspection. <https://english.jsndi.jp/>
12. CHSNDT Chinese Society for Non-Destructive Testing. <https://www.chsndt.org/>
13. KSNT Korean Society for Nondestructive Testing. <https://eng.ksnt.or.kr/>
14. AINDT Australian Institute for Non-Destructive Testing. <https://aindt.com.au/>



У цьому випуску продовжуємо екскурс в історію УТ НКТД і згадуємо про зустрічі фахівців у сфері неруйнівного контролю на конференціях та семінарах, що відбулися в Україні у 2005 році.

Рік 2005

10-та Міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2005» у Славську

З 14 по 19 лютого 2005 р. у засніжених Карпатах у Славському Львівській області вдесьте зібралися спеціалісти з неруйнівного контролю на свою Ювілейну міжнародну науково-технічну конференцію «ЛЕОТЕСТ-2005. Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів». Цього разу конференція була присвячена питанням електромагнітного та акустичного контролю.

Організатором цієї щорічної конференції виступили Українське товариство НКТД, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН

України (Львів), Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу, Науково-виробнича фірма «Зонд» (Івано-Франківськ) та Науково-виробнича фірма «Ультракон-Сервіс» (Київ). Організаційне бюро конференції – Центр «Леотест-Медіум». У конференції взяли участь понад 60 спеціалістів.

Відкрили конференцію заступник директора ФМІ ім. Г.В. Карпенка, член-кореспондент НАН України З.Т. Назарчук і голова оргкомітету конференції, голова Західного відділення УТ НКТД, директор Центру «Леотест-Меді-



ум» к.т.н. В.М. Учанін. Від імені організаторів конференції вони побажали плідної праці її учасникам і нагородили грамотами тих, хто найактивніше протягом 10 років сприяв її становленню. Серед відзначених – В.О. Троїцький, О.Л. Шекеро, Ю.М. Посипайко, О.М. Карпаш, Г.Г. Луценко, Г.Я. Безлюдько, В.Г. Рибачук, В.Я. Дереча, В.Я. Прохоренко, С.В. Серебренников, Л.П. Теліпко. Присутні також прослухали вітальне звернення, надіслане головою УТ НКТД проф. В.О. Троїцьким.

На конференції було представлено близько 30 доповідей, а у виставці засобів ПК взяли

участь 6 експонентів.

В цілому, конференція пройшла у діловій, привітній та доброзичливій атмосфері, чому сприяло у значній мірі та її місце проведення – пансіонат «Бойківщина», що розташований на околиці Славська в оточенні багаторічних сосен, ялин і смерек, поблизу гірськолижних трас. Незважаючи на напружену наукову програму, учасники конференції мали змогу деяку годину посвятити відпочинку на гірських лижах. До того ж, треба відзначити як цікавий феномен той факт, що наукові дискусії під час цього відпочинку не припинялися.

Українські дефектоскопісти втретє зібралися на конференції в Туреччині

З 30 квітня по 7 травня 2005 р. відбулася Третя науково-практична конференція «Організація неруйнівного контролю якості продукції в промисловості». Цього разу конференція проходила у п'ятизірковому готелі Justiniano Park Conti, район м. Аланія, Туреччина. Організаторами конференції були: Українське товариство НКТД, НВФ «Діагностичні прилади», НВФ «Ультракон», УІЦ «Наука. Техніка. Технологія», ПП «ДП-Тест». Втретє

провідні фахівці у галузі НК могли безпосередньо поспілкуватися як між собою, так і з керівниками підприємств-споживачів продукції для НК.

У науковій програмі конференції було представлено 32 доповіді. Серед учасників конференції – 6 докторів і 8 кандидатів наук. З великим інтересом було вислухано доповіді Л.М. Лобанова, В.О. Троїцького, М.Г. Білого, О.М. Карпаша, В.Л. Найди, Ю.Г. Гордієнко, А.А. Землян-



ського, Є.К. Лисецької, О.В. Павлія, І.В. Павлія, О.В. Мозгового, В.І. Слівінського, А.С. Мазницького, Л.Г. Лук'янової, О.М. Козіна.

Велику увагу викликали представлені на конференції результати досліджень і розробок з вихрострумової та ультразвукової дефектоскопії, рентгеноскопії, рентгенографії, які показали перспективи цих методів. Гаряча дискусія розгорнулася з питання гармонізації нормативної бази у сфері неруйнівного контролю,

яке було розглянуто у доповіді О.М. Козіна.

Гарні умови перебування, тепла погода, ласкаве Середземне море, цікава культурна програма, морська прогулянка на яхті сприяли активному відпочинку та продовженню дискусій і за межами конференц-залу.

Учасники конференції висловили свою щирю вдячність Олександрі Миколайовичу Козіну за його вексок в організацію та успішне проведення конференції.

8-ма конференція-виставка «Неруйнівний контроль-2005»

З 19 по 22 квітня 2005 р. у м. Києві в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відбулася 8-ма конференція-виставка «Неруйнівний контроль-2005», організована Асоціацією «ОКО» за підтримки Українського товариства НКТД, Державної адміністрації із залізничного транспорту, Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Національної атомної енергогенеруючої компанії «Енергоатом», Держспоживстандарту України, Українського інституту неруйнівного контролю, НВФ «Ультракон-Сервіс», НВФ «Промпри-

лад» та низки інших організацій та підприємств.

Пленарне засідання Конференції 19 квітня відкрив голова оргкомітету Конференції Г.Г. Луценко. З вітальним словом від Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України виступив заступник директора академік Л.М. Лобанов. Про стан і розвиток неруйнівного контролю та технічної діагностики в Україні розповів голова УТ НКТД проф. В.О. Троїцький.

За час роботи конференції було проведено засідання семи тематичних секцій, у яких взяли участь близько 250 осіб, та було представ-





лено понад 70 доповідей.

У виставці засобів неруйнівного контролю взяли участь: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (Київ), НВФ «Спеціальні Наукові Розробки» (Харків), НВП «Машинобудування» (Дніпропетровськ), НВП «Інтрон-Сет» (Донецьк), УДПП «Ізотоп» (Київ), ВКФ «Кром» (Дніпропетровськ), компанія «Сперанца» (Жовті Води), МПТПП «ОНІКО» (Київ), НВФ «Ультракон» (Київ), НВФ «Ультракон-Сервіс» (Київ), НВФ «Промприлад» (Київ), НВЦ «Діагностика та контроль» (Миколаїв), ДП «Колоран» (Київ).

У рамках конференції було проведено засідання Правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики та семінар системи сертифікації ОСП Асоціації «Укрексперт».

Конференцію та виставку відвідало понад 500 осіб від різних підприємств та організацій України. Завжди гостинний Київ і цього разу порадував учасників і гостей теплою погодою, дозволивши завершити роботу конференції традиційною вечірньою прогулянкою на теплоході Дніпром.

Неруйнівний контроль на 3-му Міжнародному форумі «Паливно-енергетичний комплекс України: сьогодення та майбутнє»

В останній тиждень вересня 2005 р. у найбільшому виставковому комплексі України – Міжнародному виставковому центрі – відбувся 3-й Міжнародний форум «Паливно-енергетичний комплекс України: сьогодення та майбутнє».

У рамках Форуму проходив Науково-практичний семінар «Застосування спрямованих ультразвукових хвиль для контролю довгомірних об'єктів з обмеженим доступом» (організатори: Українське товариство НКТД, Інсти-



тут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України) за участі компанії «Plant Integrity Ltd» (Велика Британія) групи «TWI», що має колосальний досвід у розробці та експлуатації обладнання для такого контролю.

Технологія LRUT є дуже актуальною при контролі таких об'єктів, як, наприклад, ізольовані трубопроводи, підземні або надземні, підводні або надводні ізольовані трубопроводи, опори вітрогенераторних установок та ін.

Доповідь «Застосування системи «Teletest» компанії «Plant Integrity Ltd» для далекодіючого ультразвукового контролю» та демонстрацію установки на макеті 50-ти метрового трубопроводу зробив інженер компанії «Plant Integrity Ltd» Davide Kliener.

Відбулася дискусія щодо можливого засто-

сування системи «Teletest» у паливно-енергетичному комплексі України.

Українське товариство НКТД увійшло до Міжнародного консорціуму, який займатиметься дослідженнями у цій галузі. Цій темі була присвячена доповідь проф. В.О. Троїцького «Перспективи застосування в Україні далекодіючого ультразвукового контролю трубопроводів без їх розкриття та зачистки. Створення Міжнародного консорціуму».

Результати вже проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України теоретичних та експериментальних досліджень щодо розвитку даного способу контролю були наведені в доповіді «Особливості керованих хвиль, які поширюються у хвилеводах, та практика їх застосування в ультразвуковому контролі протяжних об'єктів».

13-та Міжнародна конференція з неруйнівного контролю в Ялті

З 3 по 7 жовтня 2005 р. у м. Ялта відбулася 13-та Міжнародна конференція та виставка «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики». Органі-

затори конференції: УІЦ «Наука. Техніка. Технологія» (Київ) та НВП «Машинобудування» (Дніпропетровськ) за підтримки Українського товариства НКТД та Дніпропетровського наці-



онального університету. Генеральний спонсор – НВФ «Діагностичні прилади» (Київ). У роботі конференції взяли участь 188 спеціалістів.

На конференцію було подано 11 пленарних, 49 секційних і 36 стендових доповідей, автори яких представили результати своїх досліджень і розробок з широкого спектру методів НК, способів діагностування та прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, з оцінки фізико-механічних характеристик матеріалів і деяких інших напрямків, пов'язаних з НК та ТД.

Паралельно з конференцією проходила ви-

ставка засобів для НК та ТД.

Робота конференції не обмежувалася конференц-залом. Її учасники з раннього ранку до початку офіційних заходів і після їх закінчення на пляжі, у ідальні, під час неформальних зустрічей інтенсивно та корисно знайомилися, спілкувалися, активно та ефективно обговорювали наукові та бізнесові питання. Зближенню учасників безсумнівно допомогла товариська вечерея, героєм якої, безперечно, був Віктор Олександрович Цечаль з його традиційним поетичним зверненням до учасників конференції.

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ПРИ ПІДГОТОВЦІ НАУКОВОЇ РОБОТИ: МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ

Яна Бурлака

журнал «Наука і метрика», 25.02.2025, <https://nim.media/>

Тема використання штучного інтелекту є надзвичайно актуальною в сучасному світі. Технології ШІ проникають у більшість сфер людського життя, від побуту до професійної діяльності, і наукові дослідження не є винятком. Вчені активно обговорюють потенціал ШІ в науці, його можливості та виклики, з якими стикаються дослідники. У цій статті ми розглянемо, які перспективи відкриває ШІ перед науковцями, а також які проблеми виникають у процесі його використання.

Використання ШІ в процесі підготовки та написання наукових робіт відкриває перед вченим багато можливостей. Розглянемо деякі з них.

Переваги використання штучного інтелекту в наукових дослідженнях

Генерація та формулювання нових ідей. У ході наукової роботи дослідники можуть поставати перед труднощами у пошуку нових ідей для своїх досліджень. Технології штучного інтелекту можуть допомогти у виявленні нових тем та перспективних напрямів для наукових досліджень. Крім того, ці ідеї можуть стати джерелом натхнення для розробки власних концепцій автора.

Пошук актуальних джерел. Завдяки використанню технологій штучного інтелекту, дослідники можуть швидко знаходити найбільш актуальні та значущі роботи, що відповідають інтересам як широкої аудиторії, так і наукової спільноти. Це створює нові можливості для створення важливих публікацій, які знайдуть більший відгук серед читачів. В результаті, це може сприяти підвищенню цитованості вченого.

Обробка великих обсягів інформації. Однією з основних переваг використання штучного інтелекту є його здатність обробляти великі обсяги інформації. Це дає можливість авторам швидко та ефективно аналізувати дані, виявляючи приховані патерни та закономірності, які важко виявити традиційними методами. Завдяки високій швидкості роботи алгоритмів ШІ, дослідники можуть значно скоротити час, необхідний для аналізу, що підвищує ефективність дослідження в цілому.

Покращення тексту наукової статті. Штучний інтелект дозволяє авторам покращувати якість текстів, здійснюючи перевірку на

граматичні, пунктуаційні, орфографічні та стилістичні помилки. Це сприяє тому, що текст стає точнішим і професійнішим. Крім того, ШІ може оцінити структуру роботи та обрати ключові слова для оптимального представлення матеріалу. Оскільки науковий стиль вимагає чіткості та відповідного тону, інструменти ШІ можуть надати граматичні та стильові рекомендації, що покращує зв'язність та зрозумілість викладу.

Створення графічного матеріалу. Технології штучного інтелекту дозволяють створювати графічні матеріали, такі як зображення, діаграми, а також покращувати якість і стиль наявних візуальних елементів. Наприклад, розробники ChatGPT вказують, що чат-бот здатний перетворювати 2D-зображення на 3D-моделі. Однак слід пам'ятати, що ці інструменти мають певні обмеження і не завжди можуть досягти бажаного результату з першої спроби або взагалі не виконати завдання.

Перевірка тексту на плагіат. Під час проведеного досліджень та написання наукових статей автори повинні дотримуватися принципів наукової етики, зокрема забезпечення оригінальності роботи. Інструменти штучного інтелекту можуть допомогти виявити плагіат, порівнюючи текст з великими базами даних для виявлення можливих збігів. Деякі з цих інструментів також здатні розпізнавати контент, створений ШІ, що сприяє дотриманню академічних стандартів і забезпечує унікальність дослідження.

Переклад тексту. Штучний інтелект здатен перекладати наукові роботи на різні мови без обмежень на кількість слів чи символів, що є перевагою порівняно з багатьма традиційними перекладачами. Це робить його зручним інструментом для науковців, оскільки дозволяє оперативно перекладати великі обсяги тексту.

Штучний інтелект пропонує науковцям численні можливості під час підготовки досліджень і написання наукових статей. Це лише частина тих можливостей, які ШІ може запропонувати вченим. Проте важливо також враховувати потенційні проблеми та виклики, з якими автор може зіткнутися.

Недоліки використання штучного

інтелекту в наукових дослідженнях

Порушення принципів академічної доброчесності. Необхідно враховувати питання інтелектуальної власності, оскільки ШІ використовує вже наявні дані та моделі. Неправомірне використання ШІ при написанні наукових робіт є порушенням етики, оскільки такі роботи не мають наукової цінності та можуть розглядатися як плагіат. ШІ може бути корисним у дослідженнях, але не повинен замінити науковця. Використання ШІ підіймає проблему прав на текст, тому важливо застосовувати ці технології відповідально в науковій діяльності.

Помилкові результати. Усі рукописи проходять ретельну перевірку перед публікацією. Інструменти для виявлення використання штучного інтелекту можуть іноді давати помилкові результати, коли текст, написаний людиною, неправильно ідентифікується як створений ШІ. Це пов'язано з обмеженнями алгоритмів, які порівнюють структуру тексту з базами даних матеріалів, що були згенеровані ШІ. Проблема хибних результатів була виявлена, зокрема, в детекторі Turnitin, який використовувався в університетах, але був відключений через низьку точність. Тому важливо пам'ятати, що інструменти перевірки не завжди дають точні результати.

Глибина аналізу інформації. Штучний ін-

телект може обробляти великі обсяги інформації, але його аналіз часто буває поверхневим, особливо коли використовуються застарілі джерела. Для проведення всебічного та точного аналізу варто працювати з актуальними даними з надійних джерел, таких як наукові публікації, офіційні статистичні ресурси та спеціалізовані бази даних.

Неточність перекладу тексту. Хоча штучний інтелект може допомогти вам із перекладом наукової статті, повністю покладатися на нього не варто, оскільки академічний переклад потребує спеціальних знань. Недосконалий переклад може стати причиною відхилення статті під час рецензування. Тому для точного перекладу, який відповідає вимогам таких авторитетних баз даних, як Scopus чи Web of Science, краще звертатися до професіоналів.

Штучний інтелект надає науковцям нові можливості для підвищення ефективності досліджень і створення високоякісних наукових робіт. Водночас важливо пам'ятати, що його використання повинно відповідати етичним стандартам, гарантувати конфіденційність і забезпечувати належну відповідальність за авторство. Хоча технології ШІ є потужним інструментом, вони не можуть замінити критичне мислення і глибокий аналіз, які є необхідними для досягнення наукових результатів високого рівня.





ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ
ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ
ВІДДІЛ №4 НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ
ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

пропонує такі послуги:

- Діагностика і моніторинг конструкцій та споруд за допомогою рентген-телевізійного, радіографічного, ультразвукового, магнітного, капілярного, теплового вихрострумовеого, та інших методів НК.
- Розробка та реалізація технологічних рішень, виготовлення супровідної документації.
- Навчання, атестація і сертифікація персоналу згідно з EN ISO 9712, SNT-TC-1A, НПАОП 0.00-1-63-13.
- Технічний огляд та паспортизація промислових споруд.
- Аналіз можливості продовження ресурсу безпечної експлуатації обладнання та конструкцій.
- Ремонт та оновлення дефектоскопічного обладнання.
- Розроблення нормативної документації.
- Гармонізація європейських та міжнародних стандартів.




м. Київ, вул. Казимира Малевича, 23, корп. 6
т. (044) 205-22-15, 200-80-57; e-mail: ndt@paton.kiev.ua




КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ ТА ВИСТАВОК З НКТД

06–09 червня 2025	Штутгарт, Німеччина	37. Control – International trade fair of quality assurance (37-а Міжнародна виставка з забезпечення якості)	P. E. Schall GmbH & Co. KG
09–12 червня 2025	Онтаріо, Канада	Pan-American Conference for Nondestructive Testing (VIII PANNDT) (Панамериканська конференція з неруйнівного контролю)	Canadian Institute for NDE
09–12 червня 2025	Созополь, Болгарія	International Conference NDT Days 2025 (Міжнародна конференція з НК «NDT Days 2025»)	Bulgarian Society for NDT
01–03 липня 2025	Париж, Франція	10 th International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (10-й Міжнародний симпозиум з цифрової промислової радіології та комп'ютерної томографії)	France Society of NDT
20–22 серпня 2025	Кочі, Керала, Індія	International Conference and Exhibition on Nondestructive Evaluation (ICENDE) (Міжнародна конференція та виставка з неруйнівної оцінки)	ASNT India
26–28 серпня 2025	Каїр, Єгипет	«NDT Corner Expo» (Виставка і конференція з НК)	NDT Corner Online Platfom
24–26 вересня 2025	Ізмір, Туреччина	The International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering NDT-CE 2025 (Міжнародний симпозиум з НК в цивільному будівництві)	EGE University
06–09 жовтня 2025	Орландо, США	ASNT 2025 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
11–14 травня 2026	Гаваї, США	17 th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (17-а Азіатсько-Тихоокеанська конференція з неруйнівного контролю)	American Society for NDT
15–19 червня 2026	Верона, Італія	The 14 th European Conference on Non-Destructive Testing (14 th ECNDT) (14-а Європейська конференція з НК)	Italian Society for NDT
15–19 травня 2028	Буенос-Айрес, Аргентина	21 st World Conference on Non-Destructive Testing 2028 (21-а Всесвітня конференція з НК)	Argentine Society for NDT

