

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

А.Я. Недосека (заст. гол. ред.),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, С.А. Недосека,

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар)

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

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія

М.Л. Казакевич

Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського

НАН України, м. Київ

О.М. Карпаш, П.М. Райтер

Івано-Франківський нац. техн. університет нафти і газу

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

В.М. Учанін

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

України, м. Львів

А.Г. Протасов, С.К. Фомічов

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

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія

В.О. Стороженко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Г.М. Сучков

Національний університет «Харківський політехнічний інститут»

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка

НАН України, м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і

природокористування України, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2023

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія: 1120 грн. за річний комплект

з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 1120 грн. за річний комплект

(випуски журналу надсилаються електронною поштою

у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера

передплатника надається доступ до архіву журналу).

За зміст рекламних матеріалів

редакція журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

Висока нагорода..... 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ЯВОРСЬКИЙ І.М., ЮЗЕФОВИЧ Р.М., ЛИЧАК О.В.,

СЛЕПКО Р.Т., ВАРИВОДА М.З., СЕМЕНОВ П.О.

Діагностика пошкоджень зубчастих пар методами біперіодично корельованих випадкових процесів. Частина 1.

Теоретичні аспекти проблеми 4

МАХНЕНКО О.В., КАНДАЛА С.М. Вплив залишкових

технологічних напружень на опір крихкому руйнуванню

вигородки реактора ВВЕР-1000 в умовах аварійної ситуації 12

СТОРОЖИК Д.В., ПРОТАСОВ А.Г. Технології опрацювання

зображень на основі комплексування даних (Огляд)..... 17

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

СТОРОЖЕНКО В.О., МЯГКИЙ О.В., ОРЕЛ Р.П., МЕШКОВ

С.М. Зниження рівня завад при тепловому неруйнівному

контролі з урахуванням особливостей теплофізичних і

морфологічних характеристик об'єктів 27

ГОПКАЛО О.П., ГОПКАЛО О.Є., ЗЕМЦОВ М.П.,

КОВАЛЕНКО Є.В., БОДУНОВ В.Є. Експресна оцінка

якості виготовлення гусеничних траків за результатами

вимірювання коерцитивної сили 33

ЮХИМЕЦЬ П.С., ДМИТРИЄНКО Р.І., ПАЛІЄНКО О.Л.,

ЄГОРЕНКО В.М. Механічні властивості металу критично

потоншених ділянок теплопроводу та особливості

їх руйнування..... 41

W. SHARATCHANDRA SINGH, C.K. MUKHOPADHYAY

Дослідження деформаційної поведінки вуглецевої сталі

AISI 1025 з різною мікроструктурою з використанням

методів магнітної пам'яті металу та акустичної емісії..... 47

ІНФОРМАЦІЯ

Конференція «Зварювання та технічна діагностика для

відновлення економіки України» 57

Дати, події, факти з історії технічного контролю 61

Видання журналу підтримують:

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

Yu.M. Posypaiko,

I.Yu. Romanova (execut. secretary)

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

Krzysztof Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland

Janez Grum

University of Ljubljana, Slovenia

M.L. Kazakevich

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

O.M. Karpash, P.M. Raiter

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

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

A.G. Protasov, S.K. Fomichov

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

Adriana Savin

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

V.O. Storozhenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

H.M. Suchkov

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
Ukraine

V.O. Stryzhalo

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

M.G. Chausov

National University of Life and Environmental Sciences
of Ukraine, Kyiv

Founders

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

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.
Tel./Fax: +38 (044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration
of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2023

Subscription index 74475.

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

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

\$104, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

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

CONTENT

High award 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

**JAVORSKYJ I.M., YUZEFOVYCH R.M., LYCHAK O.V.,
SLYEPKO R.T., VARYVODA M.Z., SEMENOV P.O.** Diagnos-
tics of gear pair damage using the methods of bi-periodically
correlated random processes. Part 1. Theoretical aspects of
the problem..... 4

MAKHNENKO O.V., KANDALA S.M. Influence of residual
process stresses on brittle fracture resistance of WWER-1000
reactor baffle in case of an emergency 12

STOROZHYK D.V., PROTASOV A.G. Image processing
technologies based on complexing data (Review)..... 17

INDUSTRIAL

**STOROZHENKO V.O., MESHKOV S.M., OREL R.P.,
MIAHKYI O.V.** Reducing the level of interference at thermal
non-destructive testing considering the specific thermal phys-
ical and morphological characteristics of the object..... 27

**GOPKALO O.P., GOPKALO O.E., ZEMTSOV M.P.,
KOVALENKO E.V., BODUNOV V.E.** Express evaluation of
the quality of producing caterpillar tracks by the results of
coercive force measurement..... 33

**YUKHYMETS P.S., DMYTRIENKO R.I., PALIENKO O.L.,
YEHORENKO V.M.** Mechanical properties of metal of criti-
cally thinned sections of heat pipelines and features of their
destruction 41

W. SHARATCHANDRA SINGH, C.K. MUKHOPADHYAY
Study of deformation behavior of AISI 1025 carbon steel with
different microstructures using metal magnetic memory and
acoustic emission testing..... 47

INFORMATION

Conference «Welding and technical diagnostics for recovery
of the economy of Ukraine» 57

Dates, events, facts in the history of technical non-destruc-
tive testing 61

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»

ВИСОКА НАГОРОДА



23 листопада 2022 р. на засіданні Президії НАН України було прийнято рішення про присудження Золотої медалі імені Б.Є. Патона Національній академії наук України. Нагорода була заснована у 2022 р. за видатні досягнення у створенні інноваційних науково-технічних розробок, які знайшли широке практичне використання, з метою увічнення пам'яті академіка Бориса Патона.

За результатами конкурсу 2022 р. нагороду було присуджено заступнику директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України академіку НАН України Леоніду Михайловичу Лобанову за створення технології бездеформаційного зварювання виробів ракетно-космічної техніки та розроблення й впровадження методів лазерної інтерферометрії оцінювання якості зварних з'єднань.

Слід зазначити, що Золота медаль імені Б.Є. Патона Національній академії наук України була присуджена вперше.

Щиро вітаємо Леоніда Михайловича з присудженням цієї високої нагороди та бажаємо міцного здоров'я, творчої наснаги і подальших успіхів на благо України!

Академік Національної академії наук України **ЛОБАНОВ Леонід Михайлович**



Академік НАН України Лобанов Леонід Михайлович – визначний вчений в галузі матеріалознавства, зварювання, міцності та діагностики матеріалів і зварних конструкцій.

Наукові праці Л.М. Лобанова присвячені дослідженню поведінки матеріалів при зварюванні, розвитку теорії зварювальних напруг та деформацій, розробці методів дослідження і регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань, створенню високоефективних зварних конструкцій нової техніки та розробці методів і засобів їх діагностики.

Завдяки працям Л.М. Лобанова та його учнів сформовано новий науковий напрямок – бездеформаційне зварювання конструкцій, який базується на регулюванні термодеоформаційних процесів під час зварювання

і створенні попередніх перед зварюванням напружено-деформованих станів, оптимізованих стосовно зварювальних напружень і деформацій. Для всіх типів зварних з'єднань розроблено способи визначення оптимальних параметрів попередніх напружено-деформованих станів, що дозволяють усунути залишкові зварювальні деформації. Розроблені методи і технічні засоби усунення зварювальних деформацій було використано при створенні комплексу «Енергія-Буран» та інших ракетно-космічних систем. Принципово новою є розроблена ним технологія бездеформаційного зварювання стрингерних панелей та оболонок, які використовуються для виготовлення корпусів ракет та в авіабудуванні. Проведені випробування дослідних зразків великогабаритних стрингерних панелей і оболонок з високоміцного алюмінієвого сплаву АМгБНН показали, що такі вироби відповідають вимогам щодо міцності і точності виготовлення та дають можливість підвищити в 3-4 рази коефіцієнт використання дороговартісного матеріалу. Рекомендації зі збирання та бездеформаційного зварювання тонкостінних панелей і оболонок з поздовжнім орєбренням, а також технічна документація на обладнання для їх реалізації передані конструкторському бюро «Південне». Розроблена також технологія бездеформаційного зварювання стрингерних панелей із високоміцного титанового сплаву ВМ-20. Вона рекомендована для промислового виробництва авіаційних панелей. Нові можливості бездеформаційного зварювання листових конструкцій із алюмінієвих і титанових сплавів в авіакосмічній промисловості надає запропонована Л.М. Лобановим технологія електродинамічної обробки металу шва імпульсами струму високої щільності безпосередньо в процесі зварювання.

ДІАГНОСТИКА ПОШКОДЖЕНЬ ЗУБЧАСТИХ ПАР МЕТОДАМИ БІПЕРІОДИЧНО КОРЕЛЬОВАНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ.

Частина 1. Теоретичні аспекти проблеми

І.М. Яворський^{1,2}, Р.М. Юзефович^{1,3}, О.В. Личак¹, Р.Т. Слєпко¹, М.З. Варивода¹, П.О. Семенов⁴

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

²Бидгощська Політехніка. 85796, Польща, Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

³Національний університет «Львівська політехніка». 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

⁴Одеський національний морський університет. 65029, м. Одеса, вул. І. Мечнікова, 34

Запропоновано та проаналізовано модель вібрації зубчастої пари у формі біперіодично корельованих випадкових процесів (БПКВП), що описує її стохастичну повторюваність з двома різними періодами. Показано, що запропоновані раніше в літературі моделі можна вважати окремими випадками БПКВП. Зазначається, що у разі пошкодження лише однієї з шестерень діагностику механізму можна проводити в рамках апроксимації БПКВП у вигляді періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП). Першим етапом у запропонованому підході є оцінка періоду нестационарності (основної частоти) зміни в часі моментних функцій першого та другого порядку. Отримано оцінки найменших квадратів (НК) періодів детермінованої частини вібраційного сигналу та потужності часових змін його стохастичної частини, а також проаналізовано амплітудні спектри детермінованих коливань і дисперсії стохастичних коливань для різних ступенів пошкодження зубчастої передачі. Запропоновано ефективні індикатори ступеня розвитку пошкодження зубчастої пари, які формуються на основі сум амплітуд компонент спектру детермінованої складової вібрації. Бібліогр. 20.

Ключові слова: діагностика, біперіодичні корельовані випадкові процеси, періодична нестационарність, детерміновані коливання, амплітудний спектр, стохастична високочастотна модуляція

Вступ. Вібраційні сигнали обертових машин характеризуються різноманітністю ритміки, основними ознаками якої є циклічність і стохастичність. Несправності у поведінці машин призводять до виникнення нелінійних ефектів, а отже нелінійність спостерігатиметься у властивостях вібраційного сигналу. Взаємодія циклічності та стохастичності кількісно характеризується параметрами, що описують періодичну або майже періодичну зміну в часі моментних функцій першого та другого порядку циклоstationарних випадкових процесів [1–3] (такі процеси також називають періодично або майже періодично корельованими випадковими процесами [4–6]). Тому ці параметри доцільно обирати для побудови індикаторів виявлення несправностей [7–12] для діагностики зубчастих пар.

Вібрація зубчастої пари збуджується двома основними факторами, а саме – періодичною зміною жорсткості зубів протягом фази зачеплення та неточностями виготовлення власне пари. До похибок виготовлення пари відносяться постійні та змінні похибки кроку зубів. Періодична зміна жорсткості зачеплення зумовлює появу гармонійних складових частоти зачеплення $f_m = rf_1 = nf_2$ та кратних їй частот, де f_1 і f_2 – частоти обертання

коліс, r і n – натуральні числа. Випадкова похибка кроку зачеплення та неузгодженість осей валів проявляється появою гармонік з частотами обертання, а також комбінаційними частотами $pf_m + kf_1$, $pf_m + lf_2$, де p , k , l – цілі числа. Крім того, спектри вібраційного сигналу можуть включати компоненти, що лежать у певній смузі частот навколо резонансної частоти зубчастої пари у разі виникнення режиму віброудару.

Огляд методів для аналізу вібраційних сигналів зубчастих передач. Методи, запропоновані в [7, 13] для аналізу вібрації зубчастої пари, базуються на моделі похибки передачі, яку розглянуто в [14]:

$$x(\theta) = x_e(\theta)[W + x_m(\theta) + x_1(\theta) + x_2(\theta)], \quad (1)$$

де W – постійне навантаження; $\theta = \theta(t)$ – кутове положення шестерні. Члени $x_m(\theta)$ і $x_e(\theta)$ описують контактні властивості шестерень, а $x_1(\theta)$ і $x_2(\theta)$ – похибки виготовлення зубчастої пари. Вважається, що кожен доданок $x_i(\theta)$ $i = 1, 2$, є періодичним з періодом обертання $P_i = 1/f_i$ відповідної шестерні. Модель (1) містить три періодичні члени, а саме: $x_e(\theta)[W + x_m(\theta)]$, $x_e(\theta)x_1(\theta)$ і $x_e(\theta)x_2(\theta)$, які є періодичними функціями з періодами, $P_m = 1/f_m$, P_1 і P_2 . Модель у вигляді циклоstationарного процесу, запропоновану в [7, 13],

Юзефович Р.М. – <https://orcid.org/0000-0001-5546-453X>, Яворський І.М. – <https://orcid.org/0000-0003-0243-6652>,

Личак О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5559-1969>

© І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, О.В. Личак, Р.Т. Слєпко, М.З. Варивода, П.О. Семенов, 2022

отримано введенням випадкової величини, що моделює флуктуації кутового положення зубчастих коліс. Математичне сподівання цього випадкового процесу містить гармонічні складові на частотах $f_m, f_1, i f_2$. Кореляційна функція включає три типи гармонік, а саме: гармоніки з частотами, які є лінійною комбінацією частот обертання $k f_1 + l f_2$, гармоніки частоти зачеплення $n f_m$ та гармоніки з частотами, які є лінійною комбінацією частоти зачеплення та частот обертання, тобто $n f_m + k f_1$. Наявність нестационарності першого та другого порядків обґрунтовано обробкою вібраційних сигналів, вимірюваних для систем зубчастих передач [7, 13], а величини, що описують структуру циклостационарності (оцінену за допомогою синхронного усереднення) запропоновано використовувати для виявлення несправностей.

У [15, 16] вібраційний сигнал після застосування синхронного усереднення з періодом P_1 або P_2 подано у вигляді:

$$g(t) = \sum_{l=1}^M A_l [1 + a_l(t)] \cos(2\pi f_l t + b_l(t) + \phi_l) \quad (2)$$

де M – число гармонік зачеплення, а A_l та ϕ_l – відповідно амплітуда та фаза l -ї гармоніки. Ефекти модуляції описуються функціями $[1 + a_l(t)]$ і $b_l(t)$, які є періодичними з заданим періодом обертання. Ці функції дуже близькі до детермінованої складової сигналу, що відповідає одному оберту вибраної зубчастої передачі. Виходячи з моделі (2), у [15, 16] запропоновано методи для покращення результатів аналізу вібросигналу. Один з них полягає у виключенні з (2) гармонік із частотою зачеплення зубів та кратних їм. Отриманий таким чином результуючий сигнал часто чіткіше демонструє ознаки несправностей, ніж вихідний (2). Ефективною технологією для виявлення локальних несправностей типу зламаний зуб є фільтрація сигналу (2) навколо l -ї гармоніки зачеплення зубчастого колеса та аналіз її амплітудно-фазової модуляції [15, 16].

У [14, 17] вібраційний сигнал редуктора моделюється наступним чином:

$$x(\theta) = x_1(\theta) + x_2(\theta) + x_{1,2}(\theta) + x_c(\theta) + n(\theta), \quad (3)$$

де $x_1(\theta)$ і $x_2(\theta)$ описують детерміновані періодичні коливання, що генеруються відповідно обертанням вихідного та вхідного коліс, $x_{1,2}(\theta)$ є періодичною складовою із загальним періодом $P_{12} = r_1 P_1 + r_2 P_2$, $x_c(\theta)$ є циклостационарним процесом другого порядку з періодом P_{12} , а $n(\theta)$ – флуктуаційна складова. Настільки, наскільки це можливо, детерміновану складову сигналу (3) можна виділити за допомогою синхронного усереднення із загальним періодом обертання валів P_{12} [14]. Результати проведеної авторами обробки експериментальних

даних підтверджують їхнє припущення про те, що потужність випадкової складової є незначною порівняно з потужністю детермінованої.

Далі буде показано, що запропоновані в літературі моделі вібрації редуктора можна вважати окремими випадками їх представлення у вигляді БПКВП [6, 18]. Математичне сподівання та кореляційна функція цих процесів є біперіодичними функціями часу. Математичне сподівання описує модуляційну взаємодію детермінованих коливань, а кореляційна функція – взаємодію стохастичних складових. Ряд Фур'є математичного сподівання та кореляційної функції містить гармоніки частот обертання коліс, кратні гармоніки та їх комбінації. Гармоніки частот зачеплення є окремими гармоніками БПКВП представлення сигналу. Конкретний склад гармонік детермінованих і стохастичних коливань залежить від ступеня розвитку дефекту та місця його розташування.

Оцінка всього комплексу характеристик першого та другого порядку БПКВП на основі експериментальних даних може бути трудомісткою та довготривалою, тому доцільно (за можливості) пом'якшувати вимоги, пов'язані з виявленням несправностей, використовуючи параметри БПКВП моделі сигналу. У даній роботі показано, що у випадку появи несправності, коли вона розвивається лише на одному з коліс, можна використовувати підхід періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП).

Основна новизна цієї роботи полягає у наступному:

- проаналізовано властивості моделі вібрації зубчастих передач у формі БПКВП та досліджено можливість використання апроксимації ПКВП для діагностики несправностей;

- для аналізу вібрації використовуються методи пошуку прихованих періодичностей першого та другого порядку;

- запропоновано найефективніші для практичного застосування показники, які формуються на основі амплітудних спектрів.

Окремі випадки біритмічної прихованої періодичності як моделі вібраційних сигналів. Задамо випадковий процес:

$$\xi(t) = \sum_{k,l \in Z} \xi_{kl}(t) e^{i\lambda_{kl} t}, \quad (4)$$

в якому $\xi_{kl}(t)$ – стаціонарно зв'язані випадкові процеси і $\lambda_{kl} = k(2\pi/P_1) + l(2\pi/P_2)$. Як видно, процес (4) є сумою амплітудно- та фазово-модульованих гармонік, у яких частоти λ_{kl} є лінійною комбінацією двох основних частот $\lambda_{10} = k(2\pi/P_1)$ і $\lambda_{01} = l(2\pi/P_2)$.

Виходячи з (4), можна досить легко отримати окремі випадки біритмічної прихованої періодичності:

1. Якщо $\xi_{kl}(t) = c_{kl} + \eta_{kl}(t)$, де $\eta_{kl}(t)$ – некорельовані стаціонарні випадкові процеси, а c_{kl} – деякі комплексні числа, то маємо адитивну модель модуляції:

$$\xi(t) = \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} c_{kl} e^{i\Lambda_{kl}t} + \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} \eta_{kl} e^{i\Lambda_{kl}t} = s(t) + \eta(t),$$

де $s(t)$ – біперіодична функція, а $\eta(t)$ – стаціонарний випадковий процес з кореляційною функцією:

$$R(\tau) = \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} r_{kl}^{(n)}(\tau) e^{i\Lambda_{kl}\tau},$$

де $r_{kl}^{(n)}(\tau) = E \eta_k(t) \eta_l(t + \tau)$. Якщо $c_{kl} = 0, \forall k \neq 0$ і $\forall l \neq 0$, тоді $s(t)$ є сумою двох періодичних функцій:

$$s(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{k0} e^{ik \frac{2\pi}{P_1} t} + \sum_{l \in \mathbb{Z}} c_{0l} e^{il \frac{2\pi}{P_2} t}.$$

2. Якщо покласти $\xi_{kl}(t) = c_{kl} \eta(t)$, де $\eta(t)$ – стаціонарний випадковий процес, то отримаємо мультиплікативну модель модуляції:

$$\xi(t) = \eta(t) \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} c_{kl} e^{i\Lambda_{kl}t} = \eta(t) s(t). \quad (5)$$

Математичне сподівання процесу (5) і його кореляційна функція:

$$R(t, \tau) = R \eta(t) s(t) s(t + \tau),$$

де $R_\eta(\tau) = E \eta(t) \eta(t + \tau)$, що біперіодично змінюється в часі.

3. Для випадку $\xi_{kl}(t) = c_{kl} + \eta_{k0}(t) + \eta_{0l}(t)$, де $\eta_{k0}(t)$ і $\eta_{0l}(t)$ – взаємостаціонарні випадкові процеси, ми приходимо до адитивної моделі у вигляді суми біперіодичної функції та двох ПКВП з періодами P_1 та P_2 :

$$\begin{aligned} \xi(t) &= s(t) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} \xi_{k0}(t) e^{ik \frac{2\pi}{P_1} t} + \sum_{l \in \mathbb{Z}} \xi_{0l}(t) e^{il \frac{2\pi}{P_2} t} = \\ &= s(t) + \xi_1(t) + \xi_2(t). \end{aligned}$$

4. Для $\xi_{kl}(t) = c_{k0} \xi_{0l}(t)$ отримуємо модель амплітудної модуляції детермінованої несучої за допомогою ПКВП:

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{k0} e^{ik \frac{2\pi}{P_1} t} \sum_{l \in \mathbb{Z}} \xi_{0l}(t) e^{il \frac{2\pi}{P_2} t}.$$

У випадку $\xi_{kl}(t) = \xi_{k0}(t) \xi_{0l}(t)$ отримаємо модель у вигляді добутку двох ПКВП з різними періодами P_1 та P_2 :

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \xi_{k0}(t) e^{ik \frac{2\pi}{P_1} t} \sum_{l \in \mathbb{Z}} \xi_{0l}(t) e^{il \frac{2\pi}{P_2} t} = \xi_1(t) \xi_2(t).$$

Якщо стаціонарні випадкові процеси $\xi_l(t)$ є взаємнокорельованими, то маємо добуток стаціонарного випадкового процесу:

$$\eta(t) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} \xi_l(t) e^{il \frac{2\pi}{P_2} t}$$

та ПКВП $\xi(t) = \eta(t) \xi_1(t)$.

5. Квадратурну модель або модель у представленні Райса отримаємо у випадку, коли $\xi_{kl}(t) = 0, \forall k, l \neq -1, 1$. Припустимо, що:

$$\xi_{1,1}(t) = \frac{1}{2} [\xi_{1,1}^c(t) - i \xi_{1,1}^s(t)],$$

$$\xi_{1,-1}(t) = \frac{1}{2} [\xi_{1,-1}^c(t) - i \xi_{1,-1}^s(t)],$$

$$\xi_{-1,-1}(t) = \overline{\xi_{1,1}(t)}, \quad \xi_{-1,1}(t) = \overline{\xi_{1,-1}(t)}.$$

Тоді:

$$\begin{aligned} \xi(t) &= \xi_{1,1}^c(t) \cos(2\pi(f_1 + f_2)t) + \\ &+ \xi_{1,1}^s(t) \sin(2\pi(f_1 + f_2)t) + \\ &+ \xi_{1,-1}^c(t) \cos(2\pi(f_1 - f_2)t) + \\ &+ \xi_{1,-1}^s(t) \sin(2\pi(f_1 - f_2)t). \end{aligned} \quad (6)$$

Введемо випадкові процеси:

$$\begin{aligned} \xi_c(t) &= [\xi_{1,1}^c(t) + \xi_{1,-1}^c(t)] \cos(2\pi f_1 t) + \\ &+ [\xi_{1,1}^s(t) - \xi_{1,-1}^s(t)] \sin(2\pi f_1 t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \xi_s(t) &= [\xi_{1,1}^s(t) + \xi_{1,-1}^s(t)] \cos(2\pi f_2 t) + \\ &+ [\xi_{1,1}^c(t) - \xi_{1,-1}^c(t)] \sin(2\pi f_2 t), \end{aligned}$$

і перепишемо (6) у вигляді:

$$\xi(t) = \xi_c(t) \cos(2\pi f_1 t) + \xi_s(t) \sin(2\pi f_2 t).$$

Квадратурні компоненти у представленні Райса є взаємними ПКВП. Порівняємо представлення БПКВП (4) і окремі випадки, наведені вище, з розглянутими моделями коливань зубчастої пари. Було зазначено, що детермінована частина вібрації містить гармоніки частоти зачеплення та кратних їй частот, лінійних комбінацій частот обертання та лінійної комбінації кожної частоти обертання та частоти зачеплення. Оскільки $f_m = r f_1 = n f_2$, то всі ці частоти належать множині $\{k f_1 + l f_2; k, l \in \mathbb{Z}\}$. Коефіцієнти Фур'є математичного сподівання БПКВП, які описують детерміновану частину вібрації, визначають комплексну амплітуду відповідних гармонік. Коефіцієнти m_{j0} і m_{0n} є амплітудами гармонік для адитивних складових $s_1(t)$ і $s_2(t)$ з періодами P_1 і P_2 :

$$s_1(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} m_{k0} e^{ik \frac{2\pi}{P_1} t}, \quad s_2(t) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} m_{0l} e^{il \frac{2\pi}{P_2} t},$$

причому $m_{lk,0}$ – сума амплітуд для r -ї гармоніки зачеплення, (rk) -ї амплітуди гармоніки обертання вхідного колеса та (nl) -ї амплітуди гармоніки обертання вихідного колеса. Зазначимо, що сума $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$ має спільний період $P = r P_1 = n P_2$ і її також можна представити у вигляді ряду Фур'є. Проте гармоніки цього ряду мають лише формальну математичну інтерпретацію. Частоти

деяких з них, як впливає з $kf = k/(rP_1) = k/(rP_2)$, можуть співпадати з частотами обертання лише в тому випадку, коли відношення між k/r і k/n є натуральними числами. Модуляційні ж взаємодії детермінованих компонентів визначаються амплітудами m_{lk} .

Виходячи з викладеного вище, слід представити математичне сподівання та кореляційну функцію вібросигналу зубчастої пари у вигляді загальних рядів виду:

$$m(t) = E\dot{\xi}(t) = \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} m_{kl} e^{i\Lambda_{kl}t}. \quad (7)$$

$$R(t, \tau) = \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} R_{kl}(\tau) e^{i\Lambda_{kl}t}, \quad (8)$$

причому $m_{lk} = E\dot{\xi}_{kl}(t)$, $R(t, \tau) = E\dot{\xi}(t)\dot{\xi}(t + \tau)$, $\dot{\xi}(t) = \xi(t) - m(t)$, кореляційні компоненти $R_{lk}(\tau)$ можна записати у вигляді наступного ряду:

$$R_{kl}(\tau) = \sum_{p,q \in \mathbb{Z}} r_{p-k, q-l, p, q} e^{i\Lambda_{pq}\tau},$$

де $r_{pqkl}(\tau) = E\dot{\xi}_{pq}(t)\dot{\xi}_{kl}(t + \tau)$, $\dot{\xi}_{pq}(t) = \xi_{pq}(t) - m_{pq}$ – взаємкореляційні функції модулюючих процесів (символ « $\bar{\cdot}$ » означає комплексне спряження), що характеризують модуляційні кореляційні взаємодії. Ряди (7) і (8) можна визначити, якщо дані сигналів, виміряні на конкретній системі зубчастих коліс, проаналізувати за допомогою відповідних методів обробки, розроблених на основі загальної моделі (4). Очевидно, що ці результати аналізу можуть бути використані для перевірки конкретних випадків, описаних вище.

Математичне сподівання та кореляційну функцію БПКВП можна обчислювати на основі експериментальних даних за допомогою когерентного (синхронного) усереднення, компонентним методом, а також методом НК. Застосовуючи синхронне усереднення, ми можемо відокремити та аналізувати лише детерміновані чи стохастичні компоненти одного з двох періодів. Когерентні методи в багатьох випадках також не можуть бути використані для обробки вхідних даних, оскільки нестационарні періоди, як правило, не є цілими числами, а отже тоді потрібна інтерполяція даних. Тому для обробки даних доцільно використовувати компонентні методи та метод НК, оскільки вони не потребують процедур інтерполяції даних.

Компонентна оцінка та оцінка методом НК формуються як тригонометричні поліноми, коефіцієнти яких обчислюються на основі перетворень Фур'є, представлених у вигляді інтегральних сум. Значення періоду в цих перетвореннях можуть бути довільними. Необхідно лише правильно зада-

ти інтервал вибірки, щоб уникнути помилок накладення частот (елайзингу).

Виявлення несправностей шляхом оцінювання характеристик БПКВП. Обчислення всіх параметрів, що характеризують структуру адитивної та мультиплікативної складових математичного сподівання та кореляційної функції БПКВП, може бути відносно трудомістким, особливо у випадку, коли значення одного з періодів суттєво перевищує інший. Подібна ситуація виникає і тоді, коли задачу виявлення несправності можна вирішити на основі меншої кількості параметрів. Розглянемо випадок, коли ми можемо спростити цю задачу до аналізу оцінок ПКВП.

Вище було зазначено, що спектральний склад БПКВП визначається нульовою спектральною складовою:

$$f_{00}(\omega) = \sum_{p,q \in \mathbb{Z}} f_{pq}(\omega - \lambda_{pq}).$$

Припустимо, що $\lambda_{10} \geq s\lambda_{01}$, де s – деяке натуральне число. Пропускаючи сигнал БПКВП через лінійний фільтр з передавальною функцією вигляду:

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \in [\lambda_{0L_1^{(2)}}, 1.9\omega_m], \\ 0, & \omega \notin [\lambda_{0L_1^{(2)}}, 1.9\omega_m], \end{cases}$$

виключаємо зі спектру гармоніки з однією з частот обертання та гармоніки частоти зачеплення. Припустимо також, що лише один із зубів колісної шестерні несправний і потужність стохастичної модуляції гармонік зубів шестерні незначна. Беручи до уваги викладене вище та ці припущення, можна провести аналіз відфільтрованого сигналу в рамках моделі ПКВП:

$$\xi_1(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \xi_{k0}(t) e^{ik \frac{2\pi}{P_1} t}. \quad (9)$$

Математичне сподівання та кореляційна функція процесу (9) представляються у вигляді ряду Фур'є:

$$m(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} m_k e^{i\lambda_{k0}t} = m_0 + \sum_{k \in \mathbb{N}} [m_k^c \cos k\lambda_{k0}t + m_k^s \sin k\lambda_{k0}t], \quad (10)$$

$$R(t, \tau) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} R_k(\tau) e^{i\lambda_{k0}t} = R_0(\tau) + \sum_{k \in \mathbb{N}} [R_k^c(\tau) \cos k\lambda_{k0}t + R_k^s(\tau) \sin k\lambda_{k0}t], \quad (11)$$

$$\text{де } m_k = E\dot{\xi}_{k0}(t), \quad R_k(\tau) = \sum_{p \in \mathbb{Z}} r_{p-k, p}(\tau) e^{i\lambda_{p0}\tau},$$

$$r_{pq}(\tau) = E\dot{\xi}_{q0}(t)\dot{\xi}_{p0}(t + \tau) \quad (12)$$

$$i m_k = 0,5(m_k^c - i m_k^s), R_k(\tau) = [R_k^c(\tau) - i R_k^s(\tau)].$$

Для моделювання реальних даних треба припускати, що ряди Фур'є (9)–(11) є скінченими. Порядок же найвищої гармоніки можна отримати на основі попередньої обробки даних.

З (12) випливає, що нульова кореляційна складова визначається сумою автокореляційних функцій модулюючих процесів $\xi_{k_0}(t)$. Таким чином, усереднена за часом потужність сигналу $R_0(0)$ дорівнює сумі потужностей модуляцій $r_{pp}(0)$:

$$R_0(0) = \sum_{p=-L_1}^{L_1} r_{pp}(0).$$

Ненульові компоненти $R_k(\tau)$ характеризують сумарні взаємокореляції модулюючих процесів, номери яких відрізняються на k . Отже, отримуємо кореляції спектральних складових, частоти яких зміщені на величини λ_{k_0} . Ці кореляції описуються спектральними компонентами:

$$f_k(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_k(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau.$$

Значення кореляційних компонентів у точці $\tau = 0$ є їхніми повними характеристиками у часовій області:

$$R_k(0) = \int_{-\infty}^{\infty} f_k(\omega) d\omega.$$

Методологія обробки вібраційних сигналів, розвинута у наших роботах [6, 12, 19], має свої характерні особливості. Вона передбачає послідовне використання методів кореляційного та спектрального аналізу стаціонарних випадкових процесів, методів пошуку прихованих періодичностей першого та другого порядку [6, 18], їх розділення та індивідуального аналізу, емпіричного гармонічного аналізу на основі рядів Фур'є та перетворення Фур'є, методів кореляційного та спектрального аналізу ПКВП [3, 5, 6]. Гармонійне представлення ПКВП використовується для вдосконалення розроблених методів і для інтерпретації результатів обробки. Коротко розглянемо основні етапи кореляційного аналізу ПКВП.

Стаціонарний аналіз. Для дослідження загальних властивостей вібраційних сигналів на початковому етапі розраховуються оцінки кореляційної функції та спектральної густини потужності ПКВП у стаціонарному наближенні:

$$\hat{R}(jh) = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} [\xi(nh) - \hat{m}] [\xi((n+j)h) - \hat{m}],$$

$$\hat{m} = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \xi(nh),$$

$$\hat{f}(\omega) = \frac{h}{2\pi} \sum_{n=-L}^L k(nh) \hat{R}(nh) \cos \omega nh.$$

Тут $h = T/K$ – інтервал дискретизації; j – ціле число; T – довжина реалізації сигналу; K – розмір вибірки; $L = \tau_m/h$ – деяке натуральне число; τ_m – точка усічення корелограми; $k(nh)$ – кореляційне вікно. Аналіз результатів обчислення дозволяє виявити наявність детермінованої складової, визначити співвідношення потужностей детермінованих і стохастичних коливань для уточнення спектрального складу відібраного сигналу.

Виявлення та аналіз прихованих періодичностей першого порядку. Оцінка спектральної густини потужності, як правило, містить безперервну та дискретну складові, причому останні зумовлені лише детермінованими коливаннями. Для оцінки періоду цих коливань можна застосувати когерентний, компонентний та метод НК [6, 12, 19]. Значення невідомого періоду, за винятком рідкісних випадків, не є кратними інтервалу дискретизації, тому для використання когерентного методу необхідна інтерполяція відібраних експериментальних даних, що спричиняє додаткову похибку обробки. Недоліком цього підходу також є залежність результатів обробки від початкової точки початку обробки сигналу. Через це рекомендується використовувати компонентний метод для виявлення періодичності та для оцінки періодів.

Статистика для визначення періоду методом МНК має вигляд:

$$F_1(\theta) = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \hat{m}^2(\theta, nh), \quad (13)$$

де

$$\hat{m}(\theta, nh) = \sum_{k=1}^{L_1} \left[\hat{m}_k^c(\theta) \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh + \hat{m}_k^s(\theta) \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \right], \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{matrix} \hat{m}_k^c(\theta) \\ \hat{m}_k^s(\theta) \end{matrix} \right\} = \frac{2}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \xi(nh) \left\{ \begin{matrix} \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh \\ \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \end{matrix} \right\}, \quad (15)$$

а θ – пробний період. Похибок, спричинених ефектами елайзингу першого та другого роду, можна уникнути, якщо крок вибірки в (14) та (15) задовольнятиме нерівностям [6]:

$$h \leq \frac{P_1}{2L_1+1}, \quad h \leq \frac{P_1}{2L_2+1}, \quad (16)$$

де L_1 і L_2 – номери найвищої гармоніки відповідно математичного сподівання та кореляційної функції. Слід зазначити, що значення пробного періоду θ в (13) і (14) можуть бути довільними і не залежать від кроку дискретизації сигналу h .

Максимальні значення (15) є близькими до амплітуд окремих гармонік математичного спо-

дівання. Ефективність МНК оцінки періоду (13) вища, ніж ефективність компонентної оцінки (15), оскільки при обробці даних враховуються всі гармоніки амплітудного спектру. Функціонал (14) у точці максимуму $\theta = \hat{P}_1$ досягає значення, близького до усередненої за часом потужності детермінованих коливань:

$$Q_d = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{L_1} \left[\left[\hat{m}_k^c(\hat{P}_1) \right]^2 + \left[\hat{m}_k^s(\hat{P}_1) \right]^2 \right].$$

Ця величина може значно перевищувати амплітуди окремих гармонік. Тому для детектування малопотужних коливань доцільно використовувати функціонал (13).

Маючи значення оцінки періоду, можна сформувати компонентну оцінку [6, 19] математичного сподівання:

$$\hat{m}(t) = \hat{m}_0 + \sum_{k=1}^{L_1} \left[\hat{m}_k^c(\hat{P}_1) \cos k \frac{2\pi}{\hat{P}_1} t + \hat{m}_k^s \sin k \frac{2\pi}{\hat{P}_1} t \right] \quad (17)$$

де $\hat{m}_0 = \hat{m}$. Якщо виконуються умови (16), то співвідношення (17) визначає математичне сподівання для всіх $t \in [0, \hat{P}_1]$.

Для оцінок амплітудного та фазового спектру детермінованих коливань маємо:

$$\hat{A} \left(k \frac{2\pi}{\hat{P}_1} \right) = \sqrt{\left[\hat{m}_k^c(\hat{P}_1) \right]^2 + \left[\hat{m}_k^s(\hat{P}_1) \right]^2},$$

$$\hat{\phi} \left(k \frac{2\pi}{\hat{P}_1} \right) = \arctg \frac{\hat{m}_k^s(\hat{P}_1)}{\hat{m}_k^c(\hat{P}_1)}, \quad k = \overline{1, L_1}.$$

Можна припустити, що амплітуди деяких гармонік збільшуються в міру розвитку несправності зубчастої передачі. Тому для кількісної оцінки стану зубчастої передачі можна використовувати суму амплітуд:

$$\hat{A}_\Sigma = \sum_{k=1}^{L_1} \hat{A} \left(k \frac{2\pi}{\hat{P}_1} \right)$$

або суму потужностей гармонік:

$$\hat{Q}_d = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{L_1} \hat{A}^2 \left(k \frac{2\pi}{\hat{P}_1} \right)$$

Зміну стану зубчастої передачі можна проаналізувати за допомогою показників, що визначаються співвідношеннями величин:

$$I_1 = \frac{\hat{A}_\Sigma^{(c)}}{\hat{A}_\Sigma^{(i)}}, \quad I_2 = \frac{\hat{Q}_d^{(c)}}{\hat{Q}_d^{(i)}}$$

розрахованих для початкового (i) та поточного (c) станів.

Аналіз прихованих періодичностей другого порядку. Для виявлення прихованих періодичностей другого порядку необхідно застосувати формулу, подібну до (13). Функціонал для визначення

періоду кореляційної функції методом НК має вигляд:

$$\hat{F}_2(jh, \theta) = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \hat{R}^2(nh, jh, \theta), \quad (18)$$

де

$$\begin{aligned} \hat{R}(nh, jh, \theta) &= \\ &= \sum_{k=1}^{L_2} \left[\hat{R}_k^c(jh, \theta) \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh + \hat{R}_k^s(jh, \theta) \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \right], \\ \left\{ \begin{array}{l} \hat{R}_k^c(jh, \theta) \\ \hat{R}_k^s(jh, \theta) \end{array} \right\} &= \frac{2}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \left[\xi(nh) - \hat{m}(nh) \right] \times \\ &\quad \left[\xi((n+j)h) - \hat{m}((n+j)h) \right] \left\{ \begin{array}{l} \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh \\ \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \end{array} \right\}. \end{aligned}$$

Оцінка періоду кореляційної функції знаходиться як точка максимуму статистики (18) залежно від величини пробного періоду θ . Ефекти накладання першого та другого роду будуть відсутні, якщо крок вибірки сигналу задовольнятиме нерівності:

$$h \leq \frac{P_1}{4L_2 + 1}. \quad (19)$$

У точці $\theta = \hat{P}_1$ величина (18) є близькою до середнього значення часових змін потужності кореляційної функції зі зсувом $\tau = jh$ і тому:

$$F_2(jh, \hat{P}_1) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{L_2} \left[\left[R_k^c(jh, \hat{P}_1) \right]^2 + \left[R_k^s(jh, \hat{P}_1) \right]^2 \right].$$

Для обчислення кореляційної функції необхідно використати наступну статистику:

$$\begin{aligned} \hat{R}(t, jh, \hat{P}_1) &= \hat{R}_0(jh) + \\ &+ \sum_{k=1}^{L_2} \left[R_k^c(jh, \hat{P}_1) \cos k \frac{2\pi}{\hat{P}_1} t + R_k^s(jh, \hat{P}_1) \sin k \frac{2\pi}{\hat{P}_1} t \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Тут

$$\begin{aligned} \hat{R}_0(jh) &= \frac{1}{2K+1} \times \\ &\times \sum_{n=-K}^K \left[\xi(nh) - \hat{m}(nh) \right] \left[\xi((n+j)h) - \hat{m}((n+j)h) \right]. \end{aligned}$$

Якщо задовольняється умова (19), то вираз (20) є інтерполяційною формулою, яка дозволяє розрахувати значення кореляційної функції для всіх $t \in [0, \hat{P}_1]$ [19].

Оцінка дисперсії $\hat{R}(t, 0, \hat{P}_1)$ визначає часові зміни потужності стохастичної складової вібрації та оцінку нульової кореляційної компоненти $\hat{R}_0(0)$ в точці $j = 0$, яка є усередненою у часі величиною цієї потужності. Величини

$$\hat{V}\left(k \frac{2\pi}{\hat{P}_1}\right) = \sqrt{\left[R_k^c(0, \hat{P}_1)\right]^2 + \left[R_k^s(0, \hat{P}_1)\right]^2},$$

$$\psi\left(k \frac{2\pi}{\hat{P}_1}\right) = \arctg \frac{R_k^s(0, \hat{P}_1)}{R_k^c(0, \hat{P}_1)}$$

можна розглядати відповідно як амплітудний та фазовий спектри змін потужності в часі.

З проведених досліджень [7–13, 19] відомо, що вібраційний сигнал, який генерується обертовою машиною, набуває властивостей періодичної нестационарності другого порядку з моменту виникнення несправності. Це означає, що часові зміни дисперсії та кореляційної функції є тестовою ознакою для виявлення пошкодження машини. Таким чином, показники, сформовані на основі кореляційних компонентів, є чутливими до появи несправності. Один з таких показників заданий відношенням сумарної амплітуди гармонік дисперсії та нульової кореляційної складової:

$$I_3 = \frac{\sum_{k=1}^{L_2} \hat{V}\left(k \frac{2\pi}{\hat{P}_1}\right)}{\hat{R}_0(0)}.$$

Прискорене наростання величини цього показника є свідченням швидкого погіршення якості механізму.

Якщо при визначенні пошкодження механізму враховувати відношення поточного значення нульової кореляційної складової до його початкового значення, тоді можна сформувати наступний індикатор:

$$I_4 = \frac{\Delta \hat{R}_0(0) + \sum_{k=1}^{L_2} \hat{V}(k \hat{f}_0)}{\hat{R}_0^{(i)}(0)},$$

де $\Delta \hat{R}_0(0) = \hat{R}_0^c(0) - \hat{R}_0^{(i)}(0)$. Суттєвий приріст величини індикатора I_4 свідчить про його високу чутливість до зміни стану зубчастої пари.

Індикатори для виявлення несправностей, сформовані на основі амплітудних спектрів математичного сподівання та часових змін дисперсії, запропоновано також в інших працях [7, 20]. Вони мають форму так званих індикаторів циклостационарності. Проте їх застосування передбачає, що значення циклічної частоти наперед точно відомі, тоді як відповідні амплітуди розраховуються на основі експериментальних даних. Їх величини визначаються виходячи із заданих технічних параметрів агрегатів обертових машин. Проте, оскільки ці параметри змінюються під час роботи машини, вибране значення частоти може відрізнятись від реального значення. У цьому випадку результати обробки можуть бути істотно спотворені. Тому оцінка циклічних частот на

основі відібраного вібраційного сигналу зубчастих передач є важливим питанням практичного аналізу вібрації і її детально буде розглянуто у другій (практичній) частині даної роботи.

Висновки

У роботі запропоновано модель вібрацій пошкодженої зубчастої пари у вигляді БПКВП, яка є ефективною для діагностування обертових механізмів, що містять зубчасті передачі. Модуляційна взаємодія детермінованих коливань двох коліс характеризується математичним сподіванням БПКВП, а взаємодія стохастичних коливань – кореляційною функцією БПКВП. Ряди Фур'є математичного сподівання та кореляційної функції складаються з гармонік частот обертання коліс, їх кратних і комбінацій. Гармоніки частот зачеплення є окремими гармоніками БПКВП представлення сигналу. Конкретний склад гармонік детермінованих і стохастичних коливань залежать від ступеня розвитку несправності та місця її розташування.

Показано, що виходячи з представлення БПКВП стохастичними рядами, впливають простіші часткові випадки, які представлено у вигляді сум та добутків стаціонарних випадкових процесів і детермінованої біперіодичної функції, стаціонарного випадкового процесу та ПКВП, двох ПКВП з різними періодами нестационарності та ін. Деякі з цих окремих моделей використовуються в літературі для аналізу вібрації та розглянуті нами у статті.

Список літератури/References

- Gardner, W.A. (1994) *Cyclostationarity in Communications and Signal Processing*; IEEE Press, New York.
- Napolitano, A. (2012) *Generalizations of Cyclostationary Signal Processing: Spectral Analysis and Applications*; IEEE Press.
- Napolitano, A. (2020) *Cyclostationary Processes and Time Series: Theory, Applications, and Generalizations*; Elsevier, Academic Press.
- Gladyshev, E.G. (1963) Periodically and Almost-Periodically Correlated Random Processes with a Continuous Time Parameter. *Theory Prob. Appl.* **8**, 173–177.
- Hurd, H.L., Miamer, A. (2007) *Periodically Correlated Random Sequences: Spectral Theory and Practice*; Wiley, New York.
- Яворський І.М. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів, Фізико-механічний інститут НАН України ім. Г.В. Карпенка.
- Javorskyj, I. (2013) *Mathematical models and analysis of stochastic oscillations*. G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, Lviv [in Ukrainian].
- Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary processes: Application in gear fault early diagnostics. *Mech. Syst. Signal Process.* **14**(3), 371–385.
- Antoni, J., Bonnardot, F., Raad, A., El Badaoui, M. (2004) Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. *Mech. Syst. Signal Process.* **18**, 1285–1314.
- Antoni, J. (2009) Cyclostationarity by examples. *Mech. Syst. Signal Process.*, **23**, 987–1036.
- Randall, R.B., Antoni, J. (2011) Rolling element bearing diagnostics – A tutorial. *Mech. Syst. Signal Process.*, **25**(2), 485–520.
- Zimroz, R., Bartelmus, W. (2009) Gearbox condition estimation using cyclostationary properties of vibration signal. *Key Engineering Mater.*, **413**(1), 471–478.

12. Javorskyj, I., Kravets, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. (2017) Periodically correlated random processes: application in early diagnostics of mechanical systems. *Mech. Syst. Signal Process.*, **83**, 406–438.
13. Zhu, Z.K., Feng, Z.H., Kong, F.R. (2005) Cyclostationarity analysis for gearbox condition monitoring: Approaches and effectiveness. *Mech. Syst. Signal Process.*, **19**(3), 467–482.
14. Mark, W.D. (1978) Analysis of the vibratory excitation of gear systems: basic theory. *J. Acoustical Soc. America*, **63**(5), 1409–1430.
15. McFadden, P.D. (1987) Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration. *Mech. Syst. Signal Process.*, **1**(2), 173–183.
16. Dalpiaz, G., Rivola, A., Rubini, R. (2000) Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears. *Ibid*, **14**(3), 387–412.
17. Antoni, J., Randall, R.B. (2002) Differential diagnosis of gear and bearing faults. *J. Vib. Acoust.*, **124**(2), 165–171.
18. Javorskyj, I., Dzeryn, O., Yuzefovych, R. (2019) Analysis of mean function discrete LSM-estimator for biperiodically nonstationary random signals. *Math. Model. Comput.*, **6**(1), 44–57.
19. Matsko, I., Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Zakrzewski, Z. (2018) Forced oscillations of cracked beam under the stochastic cyclic loading. *Mech. Syst. Signal Process.*, **104**, 242–263.
20. Raad, A., Antoni, J., Sidahmed, M. (2008) Indicators of cyclostationarity: Theory and application to gear fault monitoring. *Ibid*, **22**, 574–587.

DIAGNOSTICS OF GEAR PAIR DAMAGE USING THE METHODS OF BI-PERIODICALLY CORRELATED RANDOM PROCESSES.

Part 1. Theoretical aspects of the problem

I.M. Javorskyj^{1,2}, R.M. Yuzefovych^{1,3}, O.V. Lychak¹, R.T. Slyepko¹, M.Z. Varyvoda¹, P.O. Semenov⁴

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

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Bydgoszcz University of Sciences and Technology. 7 Prof. S. Kaliskiego al., 85796, Bydgoszcz, Poland.

³Lviv Polytechnic National University. 12 S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine.

⁴Odessa National Maritime University. 34 I. Mechnikova str., 65029, Odessa, Ukraine.

A model of the vibration of a gear pair in the form of bi-periodically correlated random processes (BPCRP) describing its stochastic repeatability with two different periods is proposed and analyzed. It is shown that the models, proposed before in the literature can be considered as partial cases of BPCRP. It is noted, that in the case of damage of one of the gears, the diagnostics of the mechanism can be carried out within the framework of the BPCRP, approximated to periodically correlated random processes (PCRP). The first stage in the proposed approach is the estimation of the period of non-stationarity (fundamental frequency) of the first and second order moment functions. Least squares (LS) estimates of the periods of the deterministic part of the vibration signal and the power of its stochastic part were obtained. The amplitude spectra of deterministic oscillations and variation of stochastic oscillations for different degrees of damage to the gear pair were analyzed. Effective indicators of the degree of development of gear pair damage, which are formed on the basis of sums of the amplitudes of the components of the spectrum of the deterministic vibration component are proposed. Ref. 20.

Keywords: diagnostics, bi-periodic correlated random processes, periodical nonstationarity, deterministic oscillations, amplitude spectrum, stochastic high-frequency modulation

Надійшла до редакції 21.10.2022

НОВА КНИГА

Моніторинг стану конструкцій

(навчальний посібник, введення в професію)

Видавництво «Інтерсервіс», формат А4, 962 кольорових рисунків



Перша частина книги присвячена основам дефектоскопії, вона цікава починаючим фахівцям, а інші частини є навчальними плакатами та оригінальними статтями з провідних професійних журналів США, Великобританії, Німеччини та інших країн.

У книзі представлено багато матеріалів про нові технології НК. Так, в останні роки почав широко застосовуватися рухомий рентгеновський контроль. Дефектоскопісти України навчилися виготовляти недорогі портативні дистанційно керовані РТК-перетворювачі, за допомогою яких виконується моніторинг технічного стану будь-яких об'єктів, виготовлених з різноманітних матеріалів. Портативні РТК-перетворювачі можуть бути створені на основі мініатюрних стоматологічних ПЗЗ-матриць або на основі флюороскопічних екранів оптоелектроніки високої роздільної здатності, яка використовується в астрономії. Обидва рішення дозволять виконувати НК у реальному часі без витратних матеріалів. Такі РТК-технології з часом зменшать застосування УЗК і повністю витіснять плівкову радіографію.

У книзі описано оригінальні рішення з магнітного, капілярного та інших методів неруйнівного контролю.

Автор ділиться багаторічним досвідом Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона та інших організацій НАН України, авторів доповідей, представлених на наукових конференціях Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики.

У книзі представлено основи неруйнівного контролю якості металоконструкцій, газо- та нафтопроводів, елементів залізничного транспорту, продукції машинобудування, посудин високого тиску, композиційних матеріалів, а також наведено 120 технологій та навчальних плакатів з моніторингу стану конструкцій.

Під керівництвом проф. В.О. Троїцького, завідувача відділу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, виконано чимало робіт з оцінки якості різних споруд, розроблено багато методик радіаційних, магнітних, акустичних, оптичних, теплових та інших методів оцінки стану матеріалів.

Замовлення книги: ndt@paton.kiev.ua

ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ ВИГОРОДКИ РЕАКТОРА ВВЕР-1000 В УМОВАХ АВАРІЙНОЇ СИТУАЦІЇ

О.В. Махненко, С.М. Канадала

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

Email: makhnenko@paton.kiev.ua, st_kan@ukr.net

На даний час більшість реакторів ВВЕР-1000 на АЕС України проходить процедуру продовження строку експлуатації. Внутрішньокорпусні пристрої реактора є одними з ключових елементів конструкції, які обмежують надпроектний термін експлуатації АЕС. Фізичний контроль стану ВКП є досить важким, а для деяких ділянок і неможливим. Тому основним методом прогнозування та аналізу технічного стану є математичне моделювання. Слід зазначити, що більшість досліджень у цій області обмежуються моделюванням режиму нормальної експлуатації, але в проект закладені також і аварійні ситуації (АС), які характеризуються досить різкою зміною граничних умов та навантажень, що сприяє утворенню досить високих напружень. У роботі розглянуто, як залишкові технологічні напруження, що утворилися в процесі виготовлення вигородки внутрішньокорпусних пристроїв, можуть впливати на значення коефіцієнта інтенсивності напружень на контурі постульованих тріщин під час протікання АС. Виявлено суттєвий вплив ЗТН на опір крихкому руйнуванню вигородки під час АС, що необхідно враховувати при розрахунковому обґрунтуванні продовження терміну експлуатації енергоблоків типу ВВЕР-1000. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: ВВЕР-1000, внутрішньокорпусні пристрої, вигородка, залишкові технологічні напруження, аварійна ситуація, тріщиноподібний дефект, коефіцієнт інтенсивності напружень

Вступ. Удосконалення методів продовження ресурсу діючих атомних електростанцій в Україні є однією з актуальних задач у галузі атомної енергетики. Аварійна ситуація (АС) – це режим експлуатації з жорсткими умовами навантаження [1]. При цьому в деяких випадках за проектом передбачено не більше одного такого сценарію за весь термін експлуатації (включаючи надпроектний). Внутрішньокорпусні пристрої (ВКП) реактора, такі як вигородка і внутрішньокорпусна шахта, є одними з ключових елементів конструкції енергетичної установки ВВЕР-1000, які обмежують надпроектний термін експлуатації АЕС. Раніше було розглянуто подібні задачі розрахункового прогнозування опору крихкому руйнуванню (ОКР) елементів ВКП при АС [1] та нормальних умов експлуатації [2], але при цьому не враховувались залишкові технологічні напруження (ЗТН), які виникають у процесі виробництва вигородки. За опублікованими результатами подібних розрахунків [1] для постульованих у вигородці тріщиноподібних дефектів було отримано значення J -інтеграла, що близькі до критичних. Ураховуючи результати останніх досліджень у цьому напрямку, а саме суттєвий вплив ЗТН на напружено-деформований стан (НДС) вигородки ВКП при нормальних умовах експлуатації [3], актуальним є проведення аналізу впливу ЗТН на НДС та ОКР вигородки ВКП в умовах АС.

Режим аварійної ситуації. У якості АС було розглянуто режим великої течії при розриві

трубопроводів першого контуру з умовним діаметром 100...850 мм. Математична модель НДС вигородки включає врахування ЗТН [4], накопиченої радіаційної дози за 60 років експлуатації, а також температурні розподіли. Аварійна ситуація, що розглянута в даній роботі, супроводжується різким падінням тиску та температури теплоносія. У якості початкових параметрів використовувалося температурне поле, що отримане внаслідок гамма-опромінювання та контакту теплоносія з поверхнею вигородки [4], та розподіл НДС без врахування (рис. 1, а, в) та з врахуванням (рис. 1, б, г) ЗТН, які відповідають режиму нормальної експлуатації реактора та описані в [3]. З умов консервативності в розрахунковій моделі приймалося, що режим АС відбувається після 60-ти років експлуатації реактора. Урахування радіаційного розпухання та повзучості протягом усього строку експлуатації описано за допомогою математичних моделей [5], коректність яких було розглянуто в [6].

Протікання процесу аварійної ситуації супроводжується зміною граничних умов (коефіцієнта тепловіддачі та температури теплоносія) і навантажень (тиск) за часом. Закони зміни граничних умов показано на рис. 2.

При моделюванні розглянутої АС було визначено, що максимальні значення напружень спостерігаються в момент часу $t = 100$ с з початку протікання АС. Температурне поле показано на рис. 3. Також було отримано розподіли напружень в осьовому напрямку з урахуванням і без урахування ЗТН (рис. 4).

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

© О.В. Махненко, С.М. Канадала, 2022

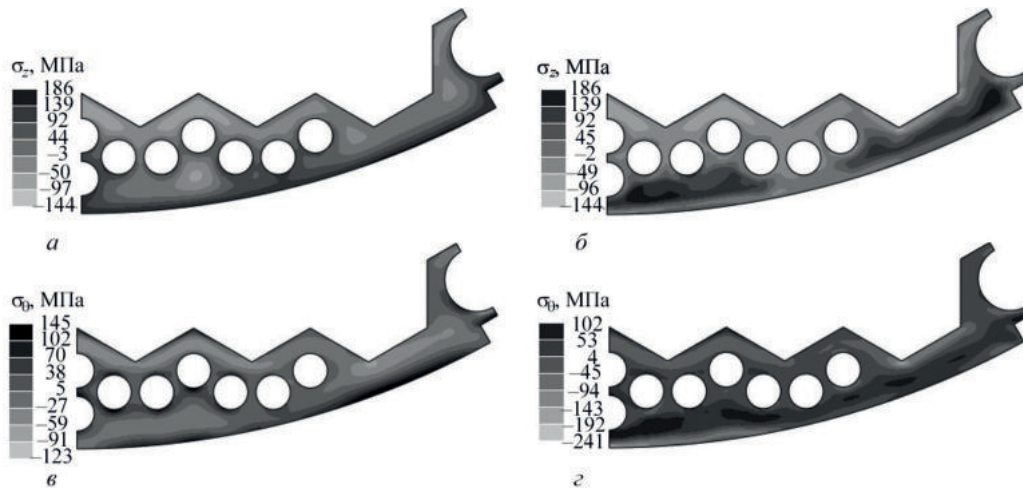


Рис. 1. Розподіли напружень у вигородці на 60-му році експлуатації: *а* – осьова компонента без урахування ЗТН; *б* – осьова компонента з урахуванням ЗТН; *в* – окружна компонента без урахування ЗТН; *г* – окружна компонента з урахуванням ЗТН

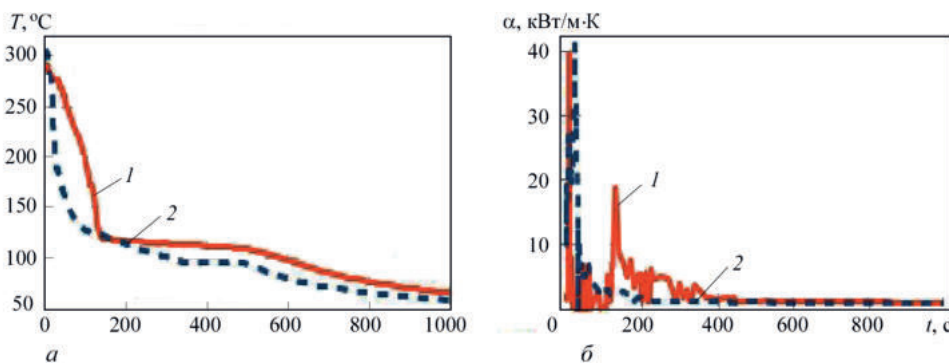


Рис. 2. Зміна температури (*а*) та коефіцієнта тепловіддачі (*б*) стінок вигородки під час АС: *1* – внутрішня поверхня, *2* – зовнішня поверхня

Як видно з рис. 4, урахування ЗТН істотно впливає на розподіл напружень. Так, максимальний рівень осьових напружень на внутрішній поверхні вигородки при врахуванні ЗТН зменшується з 488 до 416 МПа, проте в об'ємі вигородки поблизу зовнішньої поверхні стискаючі напруження (до –200 МПа) при врахуванні ЗТН переходять у розтягуючі (до 50 МПа).



Рис. 3. Температурне поле в момент часу $t = 100$ с з початку АС

У [1] було визначено, що при протіканні АС в зонах 1 і 2 (рис. 4) перерізу вигородки, що розглядається, значення J -інтеграла для постульованих тріщин знаходиться в межах критичного. Слід зазначити, що при цьому не були враховані залишкові технологічні напруження. У даній роботі розглянуто вплив ЗТН на значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) на контурі постульованих тріщин, які розташовано в площині поперечного перерізу вигородки, під дією осьових напружень в умовах протікання АС.

Визначення коефіцієнта інтенсивності напружень. Визначення КІН було виконано згідно з методиками, описаними в [7] і [8]:

$$K_I = \sigma_K Y \sqrt{a} \quad (1)$$

де K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м^{0.5}; σ_K – напруження, приведені до рівномір-

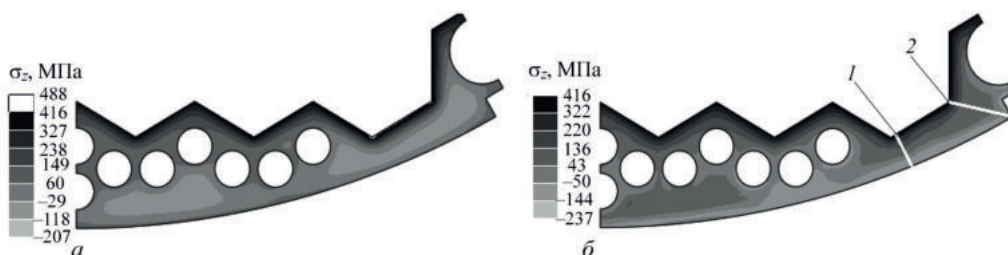


Рис. 4. Розподіли осьових напружень на $t = 100$ с протікання АС без урахування (*а*) та з урахуванням (*б*) ЗТН

ного, МПа; Y – коефіцієнт форми тріщини; a – мала піввісь тріщини, мм.

Так як зона максимальних розтягуючих напружень в осьовому напрямку знаходиться на внутрішній поверхні вигорідки, а при врахуванні ЗТН ця зона збільшується в напрямку зовнішньої поверхні, то постульовані дефекти були закладені у вигляді поверхневої напівеліптичної і підповерхневої еліптичної тріщини (рис. 5), які розташовані на мінімальній глибині ($h \geq a/9$). Співвідношення малої півосі до великої відповідно до вимог [5] становить $a/c = 1/3$.

Розподіл напружень у разі постулювання еліптичної підповерхневої тріщини, заданих у довільній формі, згідно з [7] обчислюються для координат по товщині $x_j = h + a/10$, де $j = 0, 1, 2, \dots, 20$, h – глибина розташування дефекту. У кожній точці x_j визначаються напруження $\sigma_j = \sigma_K(x_j)$. Значення приведених до рівномірного напружень $\sigma_K(A)$ та $\sigma_K(C)$ обчислюються за залежностями:

$$\sigma_K(A) = \sum_{j=0}^{20} \left(A_j + \frac{a}{c} B_j \right) \sigma_j, \quad \sigma_K(C) = \sum_{j=0}^{20} \left(A_{20-j} + \frac{a}{c} B_{20-j} \right) \sigma_j, \quad (2)$$

де A_j і B_j – табличні значення [7].

При визначенні приведених до рівномірного напружень σ при їх параболічному розподілі для поверхневої напівеліптичної тріщини використовувався метод, описаний в [8]:

$$\sigma_K(A) = 0,61\sigma_A + 0,39\sigma_B + \left\{ 0,11 a/c - 0,28 a/s \left[1 - (a/c)^{1/2} \right] \right\} \cdot (\sigma_A - \sigma_B); \quad \sigma_K(B) = 0,18\sigma_A + 0,82\sigma_B. \quad (3)$$

Коефіцієнти форми для кожного з розглянутих випадків також визначалися за різними методиками. Так, згідно з [7] для еліптичних підповерхневих тріщин:

$$Y_{A,C} = \left[1 - \left(\frac{a}{h+a} \right)^{1,8} \left(1 - 0,4 \frac{a}{c} - \gamma_{A,C} \right) \right]^{-0,54} \times \left[\frac{\pi}{1 + 1,464(a/c)^{1,65}} \right]^{0,5}, \quad (4)$$

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

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

де s – товщина вигорідки, мм.

При постулюванні підповерхневих напівеліптичних тріщин згідно з [8] коефіцієнти форми визначалися за наступними залежностями:

$$Y_A = \frac{2 - 0,82 a/c}{\left\{ 1 - \left[0,89 - 0,57(a/c)^{1/2} \right]^3 (a/s)^{1,5} \right\}^{3,25}}, \quad Y_B = \left[1,1 + 0,35 (a/s)^2 \right] (a/c)^{1/2} Y_A \quad (6)$$

Результати розрахунку. З метою визначення впливу ЗТН на ОКР у двох перерізах (рис. 4) було постульовано два дефекти у вигляді еліптичних підповерхневих тріщин. Геометричні параметри, а також коефіцієнти форми, отримані з виразів (*) для кожного з дефектів, показано в табл. 1. На рис. 6 представлено розподіл осьових напружень у момент часу $t = 100$ с з початку аварійної ситуації, з яких видно суттєвий вплив ЗТН на рівень напружень у розглянутих перерізах 1 і 2.

У табл. 2 показано результати розрахунку максимальних еквівалентних напружень і КІН для трьох характерних точок дефектів, що постулюються, у момент часу $t = 100$ с режиму АС.

Як видно з табл. 2, у цілому врахування ЗТН знижує значення еквівалентних напружень незалежно від розташування характерних точок (A , B , C і D) і типу постульованого дефекту, що веде до зниження значення КІН. Але треба відзначити, що у випадку з урахуванням ЗТН за рахунок перерозподілу напру-

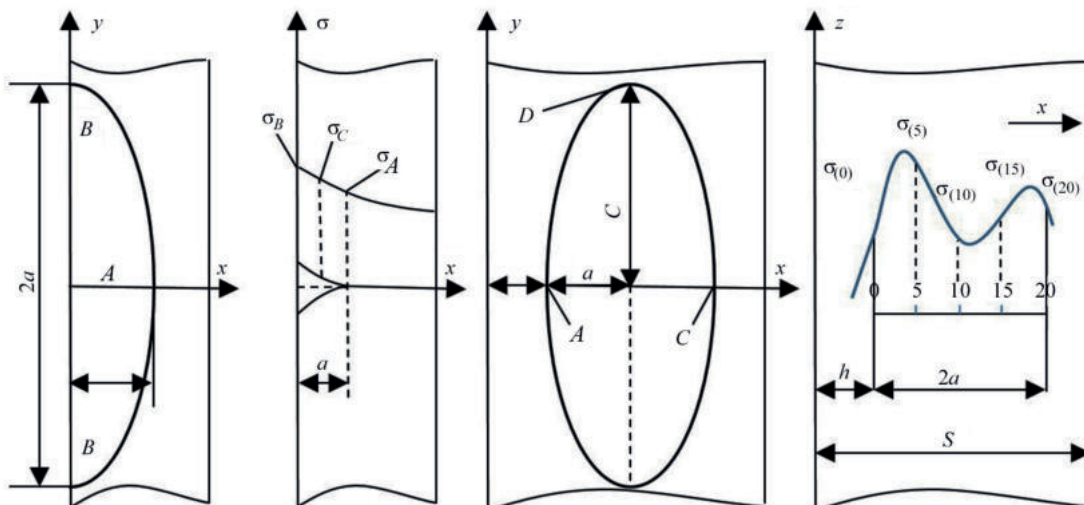


Рис. 5. Геометричні параметри напівеліптичної поверхневої (a) та еліптичної підповерхневої тріщини (b) з розподілом напружень (δ , ϵ)

Таблиця 1. Геометричні параметри постульованих дефектів

Номер перерізу	<i>a</i> , мм	<i>c</i> , мм	<i>h</i> , мм	<i>s</i> , мм	<i>Y_A</i>	<i>Y_C/Y_B[*]</i>	<i>Y_D</i>
Поверхнева напівеліптична тріщина							
1 (без ЗТН)	21,3	63,9	—	71	1,9	1,24	—
1 (із ЗТН)	35,5	106,5	—	71	2,13	1,46	—
2 (без ЗТН)	16,375	49,125	—	131	1,77	1,13	—
2 (із ЗТН)	35,5	106,5	—	131	1,87	1,22	—
Підповерхнева еліптична тріщина							
1 (без ЗТН)	8,875	26,75	1,7	71	2,43	1,86	2,6
1 (із ЗТН)	17,75	53,25	1,7	71	3,0	2,03	3,52
2 (без ЗТН)	8,125	24,375	3,3	131	2,06	1,76	2,08
2 (із ЗТН)	32,75	70,0	3,3	131	2,59	1,82	3,23

Примітка. ^{*}*Y_B* – для поверхневої напівеліптичної тріщини; *Y_C* – для підповерхневої еліптичної тріщини (рис. 5).

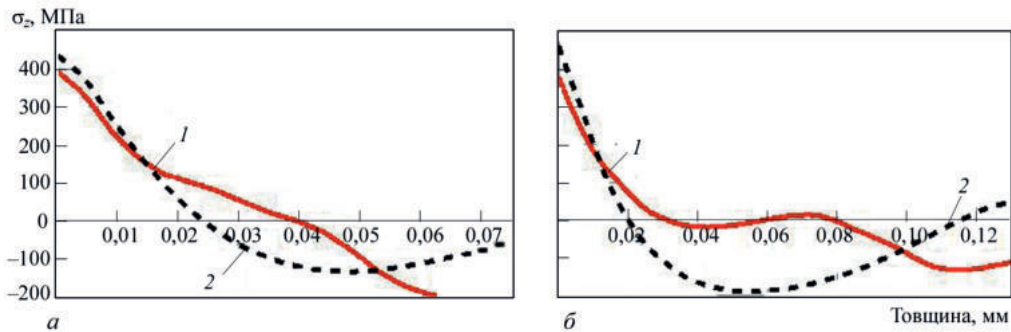


Рис. 6. Розподіл осевих напружень у перерізах 1 і 2 вигородки в момент часу $t = 100$ с режиму АС: а – переріз 1; б – переіз 2; 1 – з урахуванням ЗТН; 2 – без урахування ЗТН

жень зона розтягуючих напружень збільшується, що дозволяє збільшити розміри постульованої тріщини. Збільшення розмірів постульованого дефекту може призвести до підвищення значення КІН.

При постулюванні поверхневої напівеліптичної тріщини було визначено, що в кожному з розглянутих перерізів при врахуванні ЗТН у точках А значення КІН значно знижується, на 30 % для перерізу № 1 та на 34 % для перерізу № 2, однак у точках В спостерігається зростання на 23 і 16 % відповідно. Варто відзначити, що максимальні значення КІН визначені в точках В, отже з точки зору оцінки ОКР модель, яка враховує ЗТН, є більш консервативною.

При розгляді підповерхневої еліптичної тріщини було визначено, що при врахуванні ЗТН рівень КІН для точок А і D збільшується, для точки С характерним є несуттєве зниження. Спостерігається збільшення значення КІН для точок А і D, у пере-

різі № 1 на 31 і 27 %, а в перерізі № 2 на 37 і 41 % відповідно (табл. 2).

Еліптична підповерхнева тріщина є небезпечнішою з точки зору ОКР, а її значення в умовах аварійної ситуації можуть досягати критичних значень (у перерізі № 1 в момент часу $t = 100$ с з початку АС з урахуванням ЗТН $K_1 = 102,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$). Розподіл критичних значень КІН в матеріалі вигородки представлено на рис. 7.

У [1] розглянута АС з жорсткішими граничними умовами. При цьому в одному з перерізів, який знаходиться в області значного впливу ЗТН і відповідає розглянутому перерізу № 2, рівень J -інтеграла досягає 12420 Дж/м^2 при критичному значенні $J_c = 15400 \text{ Дж/м}^2$. Згідно з даними (табл. 2) значення КІН при врахуванні ЗТН може підвищитися приблизно на 40 %, тобто значення J -інтеграла, отримані в [1], при врахуванні ЗТН можуть бути суттєво вищими ($J \approx 17000 \text{ Дж/м}^2$) за критичне значення. Тобто врахування ЗТН може підвищити консерва-

Таблиця 2. Результати визначення максимальних КІН

Номер перерізу	$\sigma_K(A)$, МПа	$\sigma_K(C), \sigma_K(B)$, МПа	$\sigma_K(D)$, МПа	K_A , МПа·м ^{0,5}	K_C, K_B , МПа·м ^{0,5}	K_D , МПа·м ^{0,5}
Поверхнева напівеліптична тріщина						
1 (без ЗТН)	157,9	364,7	—	43,8	66,1	—
1 (із ЗТН)	76,4	296,5	—	30,6	81,5	—
2 (без ЗТН)	238,1	403,2	—	54,0	58,3	—
2 (із ЗТН)	100,6	294,1	—	35,5	67,5	—
Підповерхнева еліптична тріщина						
1 (без ЗТН)	320,5	83,8	202,2	77,8	24,9	59,1
1 (із ЗТН)	255,2	55,6	155,4	102,2	17,3	74,8
2 (без ЗТН)	284,7	68,6	176,6	52,8	12,2	34,0
2 (із ЗТН)	213,8	45,3	129,6	72,2	3,3	48,0



Рис. 7. Розподіл критичних значень КІН в матеріалі вигородки в момент часу $t = 100$ с з початку АС

тивність підходу для оцінки ОКР і визначення ресурсу вигородки ВКП.

Висновки

Результати проведеного моделювання НДС і оцінки ОКР вигородки ВКП реактора ВВЕР-1000 під час аварійної ситуації режиму великої течії при розриві трубопроводів першого контуру з умовним діаметром 100...850 мм з урахуванням та без урахування ЗТН у вигородці виявили, що:

- у найнебезпечніший момент часу $t = 100$ с з початку протікання АС у вигородці утворюються досить високі напруження в осьовому напрямку. Урахування ЗТН знижує значення сумарних напружень, але за рахунок їх перерозподілу зона розтягуючих напружень збільшується, що дозволяє збільшити розмір постульованої тріщини і, відповідно, може призвести до підвищення значення КІН;

- підповерхневі еліптичні тріщини є небезпечнішими з точки зору ОКР за поверхневі напівеліптичні тріщини. Урахування ЗТН збільшує значення КІН для підповерхневих еліптичних тріщин у момент часу $t = 100$ с з початку АС до 40 %.

Таким чином, було виявлено суттєвий вплив ЗТН на опір крихкому руйнуванню вигородки під час АС, що необхідно враховувати при розрахунковому обґрунтуванні продовження терміну експлуатації енергоблоків типу ВВЕР-1000.

Список літератури/References

1. Pištora, V., Švrček, M., Ferko, P., Mirzov, I. (2018) Fracture Mechanical Assessment of VVER Reactor Internals.

ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference (July 15–20 2018, Prague, Czech Republic). DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2018-84589>

2. Ориняк А.І. (2021) *Методи розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень з врахуванням геометричної нелінійності та довільної форми тріщини*: дис. ... канд. техн. наук. 05.02.09, Київ.
- Orynyak, A.I. (2021) Methods of stress intensity factor calculation allowing for geometrical nonlinearity and arbitrary shape of the crack. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Tekh. Sci. Degree*, 05.02.09, Kyiv [in Ukrainian].
3. Махненко О.В., Кандаля С.М. (2022) Розрахункова оцінка опору крихкого руйнування вигородки реактора ВВЕР-1000 в процесі експлуатації з урахуванням залишкових технологічних напружень. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 3–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.01>
- Makhnenko, O.V., Kandala, S.M. (2022) Evaluation of brittle fracture resistance of WVER-1000 reactor baffle during long-term service, taking into account the residual technological stresses. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 3, 3–11 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.01>
4. Makhnenko, O., Kandala, S., Basistyuk, N. (2021) Influence of the heat transfer coefficient on the level of residual stress after heat treatment of the VVER-1000 reactor baffle. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(2), 254–259. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.2.245074>
5. ПМ-Т.0.03.333-15. *Типовая программа по оценке технического состояния и продления срока эксплуатации внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000*.
PM-T.0.03.333-15. *Typical program on evaluation of the technical condition and extension of service life of WVER-1000 reactor internals* [in Russian].
6. Чирков А.Ю. (2020) О корректности известной математической модели радиационного распухания, учитывающей влияние напряжений, в задачах механики упругопластического деформирования. *Проблемы прочности*, 2, 5–22.
- Chirkov, A.Yu. (2020) On correctness of the known mathematical model of radiation swelling allowing for the effect of stresses in the problems of elastoplastic deformation mechanics. *Problemy Mitsnosti*, 2, 5–22 [in Russian].
7. (2012) *Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы*. РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012.
(2012) *Guide on strength analysis of equipment and piping of RBMK, WVER and EGP reactor units at the stage of operation including operation beyond the design life*. RD EO 1.1.2.05.0330-2012 [in Russian].
8. (2013) *Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WVER Nuclear Power Plants (VERLIFE)*. Vienna, Int. At. Energy Agency.

INFLUENCE OF RESIDUAL PROCESS STRESSES ON BRITTLE FRACTURE RESISTANCE OF WVER-1000 REACTOR BAFFLE IN CASE OF AN EMERGENCY

O.V. Makhnenko, S.M. Kandala

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

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

At present, the majority of WVER-1000 reactors in Ukrainian NPPs are going through the procedure of extension of their service life. Reactor internals (RI) are one of the key elements of the structure, which limit the NPP beyond design life. Physical control of RI condition is rather difficult, and even impossible for some areas, so that mathematical modeling is the main method of prediction and analysis of the technical condition. Note that most of the studies in this area are limited to modeling the normal operation mode, but the project also envisages emergency situations (ES), characterized by a rather abrupt change of boundary conditions and loads that promotes formation of quite high stresses. The work analyzes how the residual process stresses generated during RI baffle manufacture, can affect the values of stress intensity factor on the contour of postulated cracks during ES. A significant influence of RPS on the baffle brittle fracture resistance during ES was revealed that should be taken into account at calculation-based substantiation of extension of service life of WVER-1000 type power units. 8 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: WVER-1000, reactor internals, baffle, residual process stresses, emergency situation, crack-like defect, stress intensity factor

Надійшла до редакції 09.09.2022

ТЕХНОЛОГІЇ ОПРАЦЮВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСУВАННЯ ДАНИХ (Огляд)

Д.В. Сторожик, А.Г. Протасов

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

E-mail: a.g.protasov@gmail.com

Останнім часом у різних галузях промисловості спостерігається зростання автоматизації складних технологічних процесів, що спричинено необхідністю підвищення ефективності виробництва. Оскільки неруйнівний контроль (НК) став невід'ємною частиною багатьох галузей промисловості, ця тенденція не оминула і його. У більшості методів контролю кінцевим результатом є отримане зображення, яке несе інформацію про стан та якість об'єкту. Тому сьогодні нагальною задачею для НК є автоматизація процесів обробки та аналізу отриманих зображень. Метою даної статті є огляд технологій опрацювання зображень на основі комплексування даних і розгляд перспектив застосування цих методів для вирішення задач теплового НК. У статті описано основні теоретичні засади технології злиття зображень, розглянуто класифікацію методів комплексування та різні сучасні методи злиття зображень різного рівня з їх плюсами та мінусами, обговорювалися різні методи на основі просторових даних і перетворень з метриками якості та їх застосування у різних галузях. Також розглянуто застосування технології комплексування у задачах формування зображень при реалізації метода теплової томографії. Запропоновано наступні кроки для дослідження використання комплексування в задачах діагностики матеріалів. Бібліогр. 61.

Ключові слова: тепловий неруйнівний контроль, комплексування зображень, нейронні мережі

Вступ. Сьогодні важко собі уявити подальший розвиток багатьох галузей промисловості без розвитку неруйнівного контролю (НК). Підвищення ефективності виробництва в умовах промислової революції Індустрії 4.0 пов'язане з автоматизацією технологічних процесів, у тому числі і в НК. Головні цілі, що стоять перед НК на сучасному етапі розвитку промисловості, було сформульовано в [1]. Серед них – досягнення вищої точності при вимірюваннях, меншої кількості помилок при контролі та підвищення ймовірності виявлення критичних дефектів. Кінцевим результатом контролю при використанні рентгенографії, ультразвукових (наприклад TOFD), теплових та інших методів є отримання зображення об'єкту або його внутрішньої структури з дефектом. Аналіз отриманих зображень та прийняття рішень у багатьох випадках відбувається за участю людини-оператора, що не завжди забезпечує максимальну інформативність і швидкодію процесу контролю. Тому сьогодні нагальною задачею для НК є автоматизація процесів обробки й аналізу отриманих зображень. Це дозволить мінімізувати вплив людського фактору та підвищити ефективність контролю.

Один з напрямів, що використовується для покращення зображень у видимій частині оптичного спектру – це методика комплексування зображень (image fusion) [2, 3]. В основі цієї методики лежить операція злиття двох і більше зображень, іноді отриманих від датчиків різної фізичної природи.

Метою даної статті є огляд технологій опрацювання зображень на основі комплексування даних

і застосування цих методів для вирішення задач теплового НК.

Огляд методів злиття зображень. Після комплексування вхідних зображень отриманий результат може бути зручнішим для сприйняття людиною або придатним для машинного опрацювання, що дозволяє автоматизувати процеси обробки цього зображення з метою визначення аномалій або прийняття будь-яких рішень. Основна мета злиття – отримання найповнішої необхідної інформації про об'єкт дослідження [4]. Зазвичай методи злиття зображень, в залежності від техніки злиття, поділяють на кілька категорій. Це: рівень пікселів, рівень функцій та рівень ухвалення рішення [5, 6].

Піксельний рівень – це найпростіша техніка злиття зображень, що виконується на найнижчому рівні. Вона інтегрує інформацію з вхідних зображень для подальших завдань комп'ютерної обробки [7].

Методи функціонального рівня злиття ґрунтуються на вилученні відповідних функцій з кожного зображення, які згодом поєднуються для створення додаткових загальних ознак. До таких функцій можуть бути віднесені: інтенсивність пікселів, текстури або краї зображення [8, 9]. У методах злиття лише на рівні прийняття рішень вхідні зображення опрацьовуються одне за одним [8].

Злиття зображень на рівні пікселів у порівнянні з двома іншими методами дає точніші результати. Метод рівня функцій опрацьовує характеристики вихідного зображення. Цей метод можна використовувати з методом прийняття рішень для

Сторожик Д.В. – <https://orcid.org/0000-0003-0320-268X>, Протасов А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-2965-3334>

© Д.В. Сторожик, А.Г. Протасов, 2022

ефективного об'єднання зображень. Через зменшений розмір даних їх легше стискати та передавати. Верхній рівень злиття зображень – це рівень прийняття рішень. Щоб прийняти оптимальне рішення для досягнення конкретної мети, на цьому рівні використовується інформація про дані, яку було вилучено при злитті зображень на рівні пікселів або на рівні функцій. При використанні цього методу так само зменшується надмірність і невизначеність інформації.

Методи злиття можуть застосовуватись як у просторовій, так і частотній областях. Для досягнення відповідного результату просторовий метод оперує зі значеннями пікселів вхідних зображень, а частотні методи засновані на розкладанні вхідних зображень на багатомасштабні коефіцієнти [10]. Частотні методи можуть усувати просторові спотворення.

Техніка просторових методів є простим злиттям зображень. До цих методів відносять наступні: максимальний, мінімальний, просте усереднення, виважене усереднення, інтенсивність-насиченість (Hue-Intensity-Saturation (HIS)), перетворення Брові (Brovey), аналіз головних компонентів (Principal Component Analysis (PCA)).

Просторові методи злиття зображення. Техніка *максимального* методу полягає у наступному: щоб одержати зображення, вибирають у вихідних зображеннях значення пікселів з високою інтенсивністю, а потім їх об'єднують [11]. При *мінімальному* методі об'єднання зображень вибирають найменше значення інтенсивності пікселів і поєднують їх [12]. Цей метод використовується для формування темних зображень [13]. Техніка злиття за *простого усереднення* використовує для об'єднання процедуру усереднення пікселів. Така техніка дозволяє охопити всю область зображення і дає задовільний результат, особливо при використанні зображень від одного датчика [14]. При реалізації методу *виваженого усереднення* у вихідних зображеннях кожному пікселю присвоюють свою вагу. Результуюче зображення є зваженою сумою значень кожного пікселя з вихідних зображень [15].

Перетворення *інтенсивність-насиченість* (HIS) є базовою технікою злиття кольорів, яка перетворює вихідний простір в мультиспектральні компоненти HIS, а рівні інтенсивності – у панхроматичні зображення. Таким чином, спектральна компонента містить інформацію про відтінок і насиченість зображення, а просторова – про інтенсивність. Спектральна компонента має три мультиспектральні діапазони (червоно-зелено-синій) низької роздільної здатності, а просторова – панхроматичні зображення з високою роздільною здатністю. Для отримання об'єднаного зобра-

ження здійснюється зворотне перетворення [11, 16]. Процес злиття зображень в основному створює зображення з високою роздільною здатністю шляхом поєднання характеристик просторового зображення з низькою роздільною здатністю і панхроматичного зображення – з високою роздільною здатністю. Однак цей метод злиття може викликати деякі спотворення кольору, особливо коли існує велика кількість відмінностей у відтінках сірого між зображеннями, які потрібно об'єднати [17].

Перетворення Брові є методом об'єднання зображень з різною роздільною здатністю, у якому добуток яскравостей панхроматичного та мультиспектрального знімків ділиться на суму яскравостей мультиспектрального. Фактично це комбінація арифметичних операцій, яка нормалізує спектральні смуги перед їх множенням на панхроматичне зображення. Він відрізняється гарною передачею кольору та стабільністю результатів [18]. Метод також називають перетворенням нормалізації кольору, тому що він використовує перетворення RGB кольору. Цей простий метод використовують для об'єднання даних із різних датчиків. Він зберігає відповідну спектральну характеристику кожного пікселя та перетворює всю інформацію про яскравість на панхроматичне зображення високої роздільної здатності [19].

Аналіз основних компонентів (PCA). Це статистичний метод, заснований на ортогональному перетворенні. Техніка перетворення має схожість з перетворенням HIS, проте відрізняється тим, що PCA може використовувати довільну кількість спектральних смуг. Цей метод вважається одним з найпопулярніших методів злиття зображень. Головні компоненти, які є набором лінійно некорельованих змінних, формуються з мультиспектральних зображень низької роздільної здатності. При реалізації методу визначають один з головних компонентів, який містить загальну для всіх діапазонів інформацію. Цей компонент містить високу дисперсію, тому надає більше інформації про панхроматичне зображення. Компонент панхроматичного зображення з високою роздільною здатністю розтягується таким чином, щоб мати ту ж дисперсію, що і головний компонент, і замінює цей головний компонент. Потім використовується зворотне перетворення PCA для отримання мультиспектрального зображення високої роздільної здатності. Головним недоліком PCA є спектральна деградація та спотворення кольору [20, 21].

Частотні методи злиття зображення. До стандартних частотних методів злиття зображень можна віднести метод пірамід, вейвлет-перетворення, дискретне косинусне перетворення та ін.

Метод *пірамід* реалізує просту структуру поєднання зображень з кількома рівнями роздільної здатності. Піраміди зображень можна описати як модель біноклярного злиття для зорової системи людини. При формуванні структури піраміди вихідне зображення представляється на різних рівнях, тобто кожне наступне зображення виходить з попереднього шляхом зменшення роздільної здатності вихідного зображення. Для кожного вихідного зображення виконується пірамідална декомпозиція – зниження дискретизації до певного рівня. Усі ці зображення поєднуються для формування складеного зображення, а потім застосовується зворотне перетворення піраміди, щоб отримати результуюче зображення. У [6] представлено реалізацію методу пірамід у середовищі MATLAB, де злиття зображень здійснюється на кожному рівні декомпозиції для формування піраміди і з неї виходить злите зображення. На практиці зазвичай застосовують піраміди зображень двох видів – Гаусса і Лапласа.

Техніка злиття *піраміди Гаусса* заснована на знижувальній дискретизації. Ця піраміда складається з шарів, кожен з яких виходить з попереднього за допомогою згладжування функцією Гаусса (низькочастотна фільтрація) та подальшою дискретизацією. У піраміді Гаусса наступні зображення зменшуються з використанням низькочастотного фільтра (розмиття по Гауссу), який згладжує нерівномірні значення пікселів зображення, обрізаючи найвищі значення, і таким чином послаблює шум. Кожний піксель, що містить локальне середнє значення, відповідає пікселю на нижньому рівні піраміди. Оскільки дискретизація, що підвищує і знижує, є нелінійною обробкою, то після зворотного перетворення піраміди частина інформації буде втрачена, зображення стане розмитим [6, 22].

Техніка злиття *піраміди Лапласа* використовується для відновлення зображення. Ця піраміда дуже схожа на піраміду Гаусса. Вона зберігає різницю розмитих зображень між кожним рівнем, крім найменшого рівня, який не є різницею зображення. Це дає змогу відновлювати зображення з високою роздільною здатністю з використанням різниці зображень на вищих рівнях. Мета декомпозиції піраміди Лапласа у тому, щоб розкласти вихідне зображення на різні просторові частотні діапазони. Процес об'єднання виконується на кожному просторовому частотному шарі окремо, так що функції та деталі різних частотних діапазонів у різних шарах розкладання можуть бути націлені на виділення характеристик та деталей конкретної смуги частот. Тобто можна поєднати риси та деталі з різних зображень в одне [23].

Метод *дискретного вейвлет-перетворення* (Discrete Wavelet Transform (DWT)). Вейвлет-пе-

ретворення розглядається як альтернатива короткочасовим перетворенням Фур'є. Його перевага перед перетворенням Фур'є полягає в тому, що воно забезпечує бажану роздільну здатність як у часовій області, так і частотній області, тоді як перетворення Фур'є дає хорошу роздільну здатність тільки в частотній області. У перетворенні Фур'є сигнал розкладається на синусоїдальні складові різних частот, тоді як вейвлет-перетворення розкладає сигнал на масштабовані та зсунуті форми вихідного вейвлета або функції. При злитті зображень за допомогою вейвлет-перетворення вхідні зображення розкладаються на наближені та інформативні коефіцієнти з використанням DWT на певному рівні. Для об'єднання цих двох коефіцієнтів застосовується правило злиття і результуюче зображення виходить за допомогою зворотного вейвлет-перетворення.

Злиття на основі дискретного перетворення застосовується для кольорових зображень, компоненти RGB яких можуть бути розділені. Метод DWT розкладає два або більше зображення на різні смуги високих та низьких частот [24]. Цей метод мінімізує спектральні спотворення в результуючих об'єднаних зображеннях з меншою просторовою роздільною здатністю за рахунок кращого співвідношення сигнал/шум порівняно з піксельним методом. Іншими словами, вейвлет-злиття мінімізує кольорні спотворення порівняно зі способом злиття у просторовій ділянці [25]. Таким чином, метод DWT має перевагу в порівнянні з іншими методами, такими як метод пірамід Лапласа, Гаусса та ін. [12, 26].

Дискретне косинусне перетворення (Discrete Cosine Transform (DCT)) – одне з ортогональних перетворень, що є різновидом перетворення Фур'є. Застосовується в алгоритмах стиснення зображень у формі MPEG, JVT, JPEG тощо. Методи перетворення зображення в загальному випадку ґрунтуються на тому, що його цифровий еквівалент наводиться до вигляду, зручного для скорочення надмірної інформації. Найефективнішим є перетворення відеоінформації з часової області на спектральну. Результат перетворення являє собою сукупність спектральних коефіцієнтів, які характеризують амплітуди просторових частот зображення.

Обсяг машинних розрахунків знаходження цих коефіцієнтів дуже значний. Тому перетворення здійснюються над невеликими за розміром фрагментами, зазвичай 8×8 елементів. Дискретно-косинусне перетворення Фур'є в певній мірі мінімізує обсяг цих обчислень використанням набору перетворюючих (базисних) функцій тільки косинусних складових. У результаті масиву вихідних значень сигналу відповідає масив з такого ж чис-

ла коефіцієнтів, що являють собою амплітуди цих косинусних складових [27, 28].

Штучні нейронні мережі (Artificial Neural Networks). Іншою технологією, яка знайшла широке застосування для злиття зображень, є технологія глибокого навчання (Deep Learning). Причини популярності цієї технології полягають у наявності різних переваг при злитті зображень з кількома фокусами та мультиекспозицією, злитті мультимодальних, мультиспектральних та гіперспектральних зображень [5]. Для реалізації методики глибокого навчання використовують штучні нейронні мережі. Зазвичай використовують такі моделі нейронних мереж: згорткова (Convolutional Neural Network) [29], згорткова з розрідженим поданням (Convolutional Sparse Representation) [30] та багаторівневим автоенкодером (Stacked Autoencoder) [31]. Згорткові нейронні мережі мають спеціальну архітектуру, засновану на чергуванні згорткових та субдискретизуючих (об'єднаних) шарів, що дозволяє їм максимально ефективно розпізнавати образи. Багаторівневий автоенкодер являє собою нейронну мережу, що складається з декількох шарів розріджених автоенкодерів, де вихід всіх прихованих шарів підключений до входу наступного прихованого шару. Останні досягнення в Stacked Autoencoder полягають у тому, що він надає версію необроблених даних з детальною та багатооб'ємною інформацією про функції, що використовується для навчання класифікатора у певному контексті та досягнення більшої точності, ніж навчання з необробленими даними. Багаторівневий автоенкодер підвищує точність глибокого навчання з шумними автоенкодерами, вбудованими в шари [32]. Оскільки модель глибокого навчання здатна виокремлювати з даних більшість факультативних функцій автоматично без будь-якого втручання людини, це дає можливість автоматизувати процеси обробки зображень.

Методи оцінки ефективності злиття зображення. Для того, щоб оцінити ефективність та продуктивність злитих зображень, визначено низку показників, які дозволяють оцінити результат злиття. У літературі прийнято ці показники розділяти на суб'єктивні та об'єктивні міри оцінки [5]. Міри суб'єктивної оцінки відіграють важливу роль у злитті зображень, оскільки вони оцінюють якість об'єднаного зображення, що базується на зоровому сприйнятті людини. Особливо така оцінка популярна для зображень, отриманих при злитті в інфрачервоному та видимому діапазонах [4].

Об'єктивна оцінка ефективності злиття забезпечує як якісне, так і кількісне визначення злитого зображення. Вона не упереджена з боку спостерігачів та повністю відповідає візуальному сприйняттю. При об'єктивній оцінці використовують

різноманітні методи визначення. Наприклад це можуть бути методи, засновані на градієнті зображення, схожості структури, теорії інформації, статистиці, а також зоровому сприйнятті людини. У цьому огляді наведено деякі найпопулярніші показники для кількісної та якісної оцінки об'єднаних зображень. Техніку оцінки злитих зображень прийнято поділяти на дві групи – з використанням еталонних зображень і без них.

Оцінки заходів ефективності, засновані на еталонному зображенні, наведено нижче [11, 33–36].

1. Середнє значення квадратичної помилки (Mean of the Square Error (MSE)) обчислює помилку і реальну різницю між ідеальним або очікуваним результатом:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{ij} - B_{ij})^2,$$

де A і B – ідеальне і злите зображення відповідно, які можна оцінити; i та j – піксель-індекс рядка та стовпця відповідно; m і n – висота та ширина зображення (цифра або піксельні рядки та стовпці відповідно).

2. Пікове відношення сигнал-шум (Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)) використовується для обчислення відношення пікової потужності сигналу до шуму. Цей показник можна отримати за формулою:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left\{ \frac{r^2}{MSE} \right\}.$$

У цьому виразі r вказує пікове значення об'єднаного зображення. Якщо значення PSNR високе, це означає, що об'єднане зображення ближче до вихідного зображення і метод злиття вносить менше спотворень.

3. Точність візуальної інформації (Visual Information Fidelity (VIF)) використовується для вимірювання спотворення зображень. Цей показник включає розмиття зображення, локальні чи глобальні зміни контрасту та адитивні шуми:

$$VIF = I_f / I_r,$$

де I_f – інформація про спотворене зображення; I_r – інформація про еталонне зображення.

4. Відношення сигнал/шум (Signal to Noise Ratio (SNR)) використовується для визначення рівня шуму. Чим більше значення відношення сигнал/шум, тим вище результуюче складове зображення:

$$SNR = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m (I_r(x, y))^2}{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m (I_r(x, y) - I_f(x, y))^2} \right\}$$

де $I_r(x, y)$ – інтенсивність пікселя передбачуваного зображення; а $I_f(x, y)$ – інтенсивність пікселя

вихідного зображення. Якщо значення відношення сигнал/шум високе, це означає, що помилка оцінки мала та краща продуктивність злиття.

Міри оцінки якості без еталонних зображень, які не потребують еталонного зображення, наведено нижче [11, 36–38].

1. Помилка просторової частоти (Spatial Frequency Error (SFE)) є кількісною мірою об'єктивної оцінки переваги підсумкового злитого зображення:

$$SFE = \frac{SF_f - SF_r}{SF_r},$$

де SF_f – просторова частота злитого зображення; SF_r – просторова частота зображень, що зливаються.

2. Ентропія (Entropy (EN)) використовується для оцінки інформаційного змісту в отриманому зображенні. Зображення з великою інформативністю має низьку перехресну ентропію:

$$EN = -\sum_{i=0}^{L-1} p_i \log_2 p_i,$$

де L – загальна кількість рівнів сірого; p_i – нормалізована гістограма відповідного рівня сірого в злитому зображенні. Якщо значення EN вище, це означає, що злите зображення містить більше інформації і вона краще представлена.

3. Просторова частота (Spatial Frequency (SF)) – це показник якості зображення, що називається просторовою частотою рядка (RF) та частотою стовпця (CF) на основі горизонтального та вертикального градієнтів. Метрика оцінки просторової частоти може ефективно обчислити градієнтне розподілення зображення і дати більше деталей текстури зображення:

$$SF = \sqrt{RF^2 + CF^2},$$

$$RF = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F(i, j) - F(i, j-1))^2},$$

$$CF = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F(i, j) - F(i-1, j))^2},$$

де F – злите зображення; i та j – піксель-індекс рядка та стовпця відповідно. Злите зображення з високим SF містить багаті краї та інформацію про текстури.

4. Середня абсолютна помилка (Mean Absolute Error (MAE)) пов'язаних пікселів в оригіналі та остаточно об'єднаному зображенні:

$$MAE = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N s(i, j) - y(i, j),$$

де $s(i, j)$ та $y(i, j)$ – пов'язані пікселі в оригіналі та злитому зображенні.

Застосування та розвиток методів комплексного зображення. Злиття зображень при їх обробці відіграє важливу роль у різних галузях діяльності людини, таких як супутникова зйомка, дистанційне зондування, медична візуалізація, контроль якості продукції тощо. У сучасній літературі представлено різноманітні методи злиття зображень, які можуть застосовуватися для вирішення найрізноманітніших завдань. Розглянемо основні класи таких методів.

1. З метою покращення просторової роздільної здатності зображень у [39] розглядаються алгоритми, які досягають своєї мети шляхом об'єднання інформації з зображень, зібраних на одному зразку і зсунутих на крок субпіксельного руху, або кадрів зображень, зібраних за короткі проміжки часу. Застосування цих алгоритмів під час біологічних досліджень показали позитивний результат візуалізації флуоресценції одиничних молекул.

2. Дослідження [40] присвячено технології обробки та аналізу зображень за допомогою одного датчика зображення. Автор використовує пристрій захоплення кадрів для оцифрування відео та відправлення його на внутрішній аналізатор зображення датчика. Пропонований датчик зображення виводить два типи даних: класифікацію, пов'язану з рівнем достовірності, та оброблені дані. Ці вихідні дані надходять на дисплей разом з вихідними даними зображення, що переведені у цифровий код для оцінки оператором. Тобто один датчик зображення виводить два типи даних: оброблені дані (результат класифікації) і цифровий код зображення. У цій же роботі автором пропонується нова схема злиття зображень, отриманих від двох або більше датчиків зображення. Ця схема породжує кілька нових проблем. Насамперед, це реєстрація датчиків. Зображення, отримані від двох окремих датчиків, мають бути зареєстровані. Існує два типи реєстрації: часова та просторова. Вони вирівнюють дані зображення як у просторі, так і у часі. Просторове поєднання зображень коригує відносний зсув переміщення та зсув обертання, а також геометричні спотворення та спотворення інтенсивності кожного зображення. Маючи два і більше зображення одного й того ж об'єкта з різних датчиків та їх реєстрацію, можливо визначити характеристики кожного пікселя стосовно всіх датчиків. Реалізація схеми передбачає, що зображення, які необхідно об'єднати, вже ідеально поєднані.

3. У [41] для злиття медичних зображень різних модальностей використовується глибока згорткова нейронна мережа. Мета злиття медичних зображень різних модальностей полягає в отриманні зображення високої якості шляхом розумного об'єднання зібраної важливої інформації з

мультимодальних вхідних зображень. Класифікація злиття зображень описує три базові рівні: ознак, пікселів і рішень. Обмеженням методів на основі пікселів є ефект варіації великої інтенсивності пікселів отриманого зображення. На рівні прийняття рішень кожен вхід обробляється окремо та витягується інформація, потім з урахуванням вирішальних правил вилучені ознаки об'єднуються. Таким чином, у схемі злиття високого рівня значна точність у прийнятті рішень досягається за рахунок підтримки аналізу рішень на основі ознак.

4. Випадок, у якому зображення для аналізу надходять з різних платформ, розглядається в [42]. Цей випадок набагато складніший, ніж об'єднання зображень, отриманих за допомогою однієї і тієї ж системи збирання зображень, оскільки необхідно враховувати спектральні та просторові різниці між різними зображеннями.

Основна складність, що пов'язана зі злиттям зображень з різних платформ, виникає через те, що режим пікселя для різних методів має бути загальним. Досягнення цієї умови передбачає подолання проблем, пов'язаних з відмінностями у просторовій орієнтації та просторовій роздільній здатності зображень. Для вирішення цієї проблеми автором запропоновано рішення на основі бінування (зниження дискретизації) зображень з найвищою роздільною здатністю для зіставлення з зображенням з найменшою роздільною здатністю та побудова мультимножини.

5. Найпростіший метод злиття зображень полягає у тому, щоб узяти середнє значення двох вхідних зображень. Однак при прямому застосуванні це призводить до зменшення контрастності об'єкта. Для вирішення цього завдання автори [43] пропонують злиття зображень на основі піраміди Лапласа, але із введенням блокуючих артефактів. Найкращі результати злиття було досягнуто на основі вейвлет-перетворення (WT). Запропоновано три етапи процесу злиття: 1) обчислення вейвлет-перетворення для кожного зображення; 2) вибір у кожній точці коефіцієнтів, що мають найбільше абсолютне значення; 3) обчислення зворотного WT для нового зображення. Вихідне зображення поєднується із зображенням WT і дає кращий результат, ніж вихідне. Метод було застосовано для злиття медичних зображень.

6. Мультимодальні алгоритми злиття зображення оцінюються з використанням методу кількісної оцінки, що є складним завданням через відсутність достовірних даних. Значення параметрів змінюються при зміні досліджуваної вибірки. Якість зображення в цьому випадку перевіряється за допомогою параметрів (метрик) злиття. У дослідницькій роботі [44] представлено деякі пара-

метри злиття, які, на думку авторів, будуть корисними для об'єктивної перевірки якості об'єднаних зображень. Деякі з цих параметрів: 1) коефіцієнт злиття, який визначає схожість об'єднаного зображення з вихідним. Він забезпечує апроксимацію вмісту, наданого вихідними зображеннями до об'єднаного зображення; 2) симетрія злиття – оцінюються взаємні дані між вихідними зображеннями та об'єднаним зображенням; 3) індекс якості зображення – міра відмінностей між зображеннями джерела та злитого об'єкта; 4) міра якості краю. Оскільки краї мають вирішальне значення для аналізу медичних зображень, для створення об'єднаного зображення пропонується система, що використовує функціональність, пов'язану з краєм. Цей параметр злиття є апроксимацією збереження країв об'єднаного зображення. У роботі представлено також аналітичні залежності для визначення зазначених параметрів.

7. Останнім часом методи злиття зображень на основі областей привертають до себе значну увагу через очевидні переваги в порівнянні з методами злиття пікселів. Обробка семантичних областей, а не окремих пікселів, може допомогти подолати деякі проблеми методів злиття пікселів, таких як чутливість до шуму, ефекти розмиття та розбіжності. У [45] докладно описано принципи злиття зображень на основі областей у просторовій області та запропоновано два методи злиття. Попередньо зареєстровані зображення, що мають різну роздільну здатність перетворюються за допомогою методу аналізу. Області, що становлять певні функції зображення, витягуються методом сегментації зображення, який використовує інформацію, отриману з коефіцієнтів перетворення. Потім області поєднуються на основі їх характеристик. Авторами також представлено експериментальні результати, які отримано при реалізації запропонованих методів.

8. У [46] розглядається загальний процес злиття зображень. Автори стверджують, що оскільки структури злиття зображень відрізняються одна від одної, то і злиті зображення, які виникають за допомогою різних структур злиття, також відрізнятимуться один від одного. Виходячи з цього, у роботі запропоновано розділити структури злиття на три класи, а саме: ієрархічні, загальні та довільні. Стверджується, що ієрархічна структура підходить для злиття спеціально призначених для злиття тільки двох вихідних зображень. Для методів, які можуть об'єднувати кілька зображень в одному злитті, більше підходить загальна структура злиття зображень. У більшості додатків згадані вище структури злиття зазвичай використовуються для отримання так званої довільної структури злиття.

9. Злиття зображень із застосуванням вейвлет-перетворень було використане в [47]. Авторами визначено, що усунення розмиття перед злиттям вейвлетів значно покращує вимірюну різкість оброблених зображень. Як приклад було продемонстровано злиття вейвлет-зображень з використанням світла, що проходить, і флуоресцентних зображень. Усунення розмитості оптичного перерізу з наступним злиттям підвищує інформативність флуоресцентних зображень, у яких видно всі досліджувані точки. Метод знайшов застосування в медицині для швидкого виявлення, аналізу та підрахунку мікробів певного типу [48].

10. Методи злиття зображень на основі дискретних косинусних перетворень (DCT) більше підходять для застосування в системах реального часу, які використовують стандарти статичного зображення або відео на їх основі. Однак злиття зображень на основі DCT дає результати з меншою чіткістю, меншим значенням пікового відношення сигнал/шум і більшою середньоквадратичною помилкою. Автори [49] пропонують новий алгоритм, метою якого є покращення результатів за рахунок об'єднання DCT з адаптивним вирівнюванням гістограми. Експериментальні результати та порівняння показали, що запропонований алгоритм забезпечує значне покращення порівняно з існуючими методами злиття на основі DCT.

11. У [50] розглядаються останні розробки в області технології злиття зображень на основі глибокого навчання та узагальнюються проблеми, які необхідно вирішити у цій галузі в майбутньому. У цьому огляді досліджуються методи синтезу інфрачервоного та видимого зображень на основі глибокого навчання, які з'явилися останніми роками. Автори розділили ці методи на чотири основні категорії: методи на основі згорткових нейронних мереж, методи синтезу на основі генеративних змагальних мереж (Generative Adversarial Nets (GAN)) [51], сіамські мережеві та автоенкодер методи. У статті викладено об'єктивні та суб'єктивні показники злиття та індикатори, які використовуються для тестування та оцінки кількох типових методів злиття.

12. Автор [6] використовує нейронну мережу з імпульсним зв'язком (Pulse Coupled Neural Network (PCNN)), яка складається з мережі зворотного зв'язку. Ця мережа розділена на три частини, а саме: рецептивне поле, поле модуляції та генератор імпульсів. Кожен нейрон відповідає пікселю вхідного зображення. Інтенсивність відповідного пікселя використовується як зовнішній вхід у PCNN. Цей метод вигідний з погляду стійкості до шуму, незалежності від геометричних варіацій та здатності компенсувати незначні варіації інтенсивності у вхідних шаблонах. PCNN має біологічне значення та використовується в медичній візуалізації, оскільки цей метод здійснюється в реальному часі та забезпечує продуктивність системи.

Формування зображень в задачах теплової томографії. Формування зображень внутрішньої структури об'єкта при реалізації методів теплової томографії сьогодні є актуальною задачею. Поширення теплової енергії у твердих середовищах мають дифузійний характер, внаслідок чого температурні сигнали, що викликані неоднорідністю структури, схильні до загасання за амплітудою та затримання у часі. Крім того, розтікання теплової енергії вздовж поверхні об'єкта та неоднорідності коефіцієнта випромінювання призводять до появи шумів, що впливає на роздільну здатність тепловізійної апаратури.

Реконструкція зображень у задачах теплової томографії пов'язана з розв'язанням оберненої задачі теплопровідності. Результативність вирішення цих задач суттєво залежить від рівня шумів, що робить обернену задачу теплопровідності некоректною. Для вирішення таких задач розроблено багато математичних методів, наприклад згладжування, оптимальна спектральна фільтрація [52, 53] або застосування нейронних мереж для побудови теплових томограм [54]. До їхніх недоліків можна віднести сильну залежність точності розв'язання від виду згладжувального функціонала, наявності інформації про спектральні характеристики шуму або від типу нейронної мережі. Тому задача отримання точнішої реконструкції внутрішньої структури об'єкта у термографії залишається актуальною.

У [55], присвяченій тепловій томографії, авторами запропоновано метод динамічної фільтрації зображення для усунення неоднорідностей коефіцієнта випромінювання. Суть цього методу полягає в побудові образу вибраного пікселя термограми для великої (кілька десятків) кількості послідовних кадрів тепловізійного фільму. Умови застосування методу: коефіцієнт випромінювання поверхні в цій точці не повинен залежати від температури, теплові шуми матриці тепловізора повинні бути відсутніми. Точність такої фільтрації залежить як від кількості кадрів, так і від рівня теплових шумів.

Методи, які є ефективнішими за наявності нелінійності та значних рівнів шумів, пропонуються в [56]. Для визначення глибини залягання дефектів авторами використано штучні нейронні мережі. Технологія формування зображень полягала у послідовній реєстрації термограм, які демонстрували динаміку зміни теплового поля у часі. Послідовність термограм аналізувалась декількома багатошаровими нейронними мережами. Навчання мережі відбувалось за алгоритмом зворотного поширення Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt). Кількісна оцінка ефективності роботи мережі визначалась за критерієм Танімото (Tanimoto). Відносну похибку мережі оцінювали методом порівняння визначеної загальної площі дефектів на карті та реальної площі дефектних зон. Ступінь схожості зображень за критерієм Танімото становив до 48 %.

Визначенню глибини залягання дефектів з використанням штучних нейронних мереж присвячена робота [57]. Етап навчання мережі виконувався шляхом модифікації синаптичних ваг до моменту отримання необхідного результату. Автори використовували навчання без нагляду. Процес навчання мережі триває, поки синаптичні ваги не почнуть безпомилково забезпечувати потрібні дані, а коли обчислена помилка стає малою, цей процес припиняється. Далі проводиться тестування на інших зразках, що дозволяє оцінити продуктивність мережі та виявити тип даних, які викликають проблеми. Проведені авторами експерименти підтвердили ефективність методу у визначенні глибини залягання дефектів. Похибка вимірювання не перевищила 3 %.

Використання технології Deep Learning для ідентифікації дефектів при тепловому неруйнівному контролі розглянуто в [58]. Автори досліджують можливості згорткової нейронної мережі для навчання, трансформації та використання її як неконтрольованого екстрактора функцій для аналізу дефектів матеріалів. У роботі розглядається попередньо навчена глибока згорткова мережа типу ImageNet-VGG-F, яка використовується для вилучення ознак та має 21 шар з різними характеристиками. Суттєвим недоліком згорткових нейронних мереж є потреба у великому наборі зображень, що призводить до великого обчислювального навантаження та погіршує навчання і тестування цієї мережі. З огляду на це, автори використовують попередньо підготовлену мережу як гібридний генератор функцій. Таким чином, запропонована методика передбачає аналіз інфрачервоних зображень, отриманих у різних часових періодах. Кожна послідовність зображень, що отримана протягом певного часового періоду, входить в систему як вхідні дані. Експеримент з розпізнаванням дефектів у вуглецевому зразку показав похибку у 2,5 %, а в зразку зі сталі похибка становила 2 %. Це дослідження демонструє можливість поєднувати обробку інфрачервоних зображень з технологією глибинного навчання.

Робота [59] присвячена дослідженню оптимальної архітектури штучної нейромережі та вимог до навчального набору даних для використання мережі в задачах класифікації дефектів. Дослідження ґрунтуються на даних комп'ютерного моделювання та експериментальної перевірки. У результаті проведених досліджень авторами доведено ефективність застосування штучних нейромереж у задачах активного теплового неруйнівного контролю. Комп'ютерне моделювання дозволило отримати оптимальну архітектуру мережі, що складалась з двох прошарків і малої кількості нейронів 12/4. Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість використання штучних нейромереж для визначення параметрів внутрішніх дефектів у зразках багато-

шарових композитів. Автори також дійшли висновку, що використання штучних нейронних мереж є перспективним напрямом у автоматизації роботи систем теплового неруйнівного контролю.

Автори [60] провели порівняння результатів інфрачервоної термографії і терагерцового (ТГц) неруйнівного контролю зразків зі штучними дефектами різної природи.

Для злиття отриманих зображень у роботі було застосовано метод аналізу головних компонент (PCA). Результати порівняння було оцінено за допомогою критерію Танімото, який дозволив визначити ступінь схожості отриманих зображень від двох методів контролю з еталонним зразком. Найефективнішою була процедура теплового неруйнівного контролю з використанням методу обробки даних TSR (Thermography Signal Reconstruction), яка забезпечила критерій Танімото 0,87, а найнижча 0,72 відповідала необробленому ТГц зображенню. Отримані результати дослідження продемонстрували перспективність використання ТГц методу для неруйнівного контролю композитних матеріалів.

Для кращої оцінки інфрачервоних вимірювань при неруйнівному контролі, особливо для об'єктів складної геометрії або малих розмірів, доцільно поєднувати зображення камери у видимому діапазоні з зображенням інфрачервоної камери під тим самим кутом огляду. Авторами [61] пропонується розроблена нами гібридна камера, яка використовує світлодіодний для поєднання видимої та інфрачервоної області довжини хвиль під одним і тим самим кутом огляду, що дозволяє формувати гібридне зображення. Область застосування цього нового методу варіюється від локалізації та перевірки помилкових показань у додатках неруйнівного контролю до отримання тривимірної інформації про поверхню з гібридним зображенням у вигляді текстури з зазначенням дефектів та фільтрації лазерних міток, що відображаються на ІЧ-зображенні.

Висновки

1. З проведеного огляду можна зробити висновок, що кожен метод злиття зображень призначений для конкретної програми і може використовуватися в різних комбінаціях для отримання найкращих результатів. Основними складностями, з якими зіткнулися автори багатьох робіт, стали: часова та просторова реєстрація зображень; забезпечення загального режиму пікселя для мультимодальних зображень; згорткові нейронні мережі потребують великого набору зображень, що призводить до великого обчислювального навантаження і погіршує навчання та тестування цієї мережі.

2. Реконструкція зображень у задачах теплової томографії пов'язана з розв'язанням оберненої задачі теплопровідності. Перспективними у цьому напрямі є методи злиття зображень на основі глибоких нейронних мереж (технології Deep Learning),

які можуть бути ефективними при використанні методів комплексування для зменшення необхідної для навчання вибірки та використання моделей нейронних мереж при розв'язанні задач часової і просторової реєстрації, а також при узгодженні режиму пікселя для методів комплексування зображень. Після комплексування вхідних зображень отриманий результат може бути зручнішим для сприйняття людиною або придатним для машинного опрацювання, що дозволяє автоматизувати процеси обробки цього зображення з метою визначення аномалій або прийняття будь-яких рішень.

Список літератури/References

- Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Галаган Р.М. та ін. (2021) Бездротові технології в автоматизації неруйнівного контролю. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 32 (71), 5, 25–29. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/05>
- Petryk, V.F., Protasov, A.G., Galagan, R.M. et al. (2021) Wireless technologies in automation of nondestructive testing. *Vcheni Zapysky TNU. Seriya: Tekhnichni Nauky*, Vol. 32 (71), 5, 25–29 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/05>
- Rokni, K. et al. (2015) A new approach for surface water change detection: Integration of pixel level image fusion and image classification techniques. *Int. J. of Applied Earth Observe*, Vol. 34, 226–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.014>
- Сторожик Д.В., Муравйов О.В., Протасов А.Г. та ін. (2020) Комплексування мультиспектральних зображень як метод підвищення їх інформативності при бінарній сегментації. *KPI Science News*, 2, 83–87. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.2.197955>
- Storozhyk, D.V., Muraviov, O.V., Protasov, A.G. et al. (2020) Complexing of multispectral images as a method of improvement of their information level at binary segmentation. *KPI Science News*, 2, 83–87 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.2.197955>
- Ma, J., Ma, Y., Li, C. (2019) Infrared and visible image fusion methods and applications: a survey. *Information Fusion*, 1(45), 153–178.
- Kaur, H., Koundal, D., Kadyan, V. (2021) Image Fusion Techniques: A Survey. *Computational Methods in Engineering*, 28, 4425–4447.
- Mamta Sharma (2016) A Review: Image fusion techniques and applications. *Int. J. of Computer Sci. and Information Technologies*, Vol. 7(3), 1082–1085. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09540-7>
- Li, S., Kang, X., Fang, L. et al. (2017) Pixel-level image fusion: a survey of the state of the art. *Information Fusion*, 1(33), 100–112.
- Maruthi, R., Lakshmi, I. (2017) Multi-focus image fusion methods – a survey. *Computer Engineering*, 19(4), 9–25.
- Meher, B., Agrawal, S., Panda, R., Abraham, A. (2019) A survey on region based image fusion methods. *Information Fusion*, 1(48), 119–132.
- Yang, J., Ma, Y., Yao, W., Lu, W. (2008) A spatial domain and frequency domain integrated approach to fusion multifocus images. *The Int. Archives of the Photogrammetry, remote sensing and spatial Information Sci.*, 37(PART B7).
- Morris, C., Rajesh, R.S. (2014) Survey of spatial domain image fusion techniques. *Int. J. of Advanced Research in Computer Sciences and Engineering Information Technologies*, 2(3), 249–254.
- Jasinas, M.D., Kearney, D.A., Hopf, J., Wigley, G.B. (2002) Image fusion for uninhabited airborne vehicles. *IEEE Int. Conf. on Field-Programmable Technology*, Proceedings, 348–351.
- Bavachan, B., Krishnan, D.P. (2014) A survey on image fusion techniques. *Int. J. of Research in Computers and Computation Technologies*, 3(3), 049–052.
- Banu, R.S. (2011) Medical image fusion by the analysis of pixel level multi-sensor using discrete wavelet Transform. In: *Proc. of the National conf. on Emerging Trends in Computing Science*, 291–297.
- Song, L., Lin, Y., Feng, W., Zhao, M. (2009) A novel automatic weighted image fusion algorithm. *Int. Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA)*, 1–4.
- Zhijun Wang et al. (2005) A comparative Analysis of image fusion methods. *IEEE Transact. on Geosciences and Remote Sensors*. Vol. 43, 6, 1391–1402.
- Cetin, M., Tepecik, A. (2016) Intensity–hue–saturation-based image fusion using iterative linear regression. *J. of Applied Remote Sensing*, 10(4), 045019 DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.045019>
- Mishra, D., Palkar, B. (2015) Image fusion techniques: a review. *Int. J. of Computer Application*, 130(9), 7–13.
- Mandhare, R.A., Upadhyay, P., Gupta S. (2013) Pixel-level image fusion using Brovey transform and wavelet transform. *Int. J. of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 2, Issue 6, 2690–2695.
- Lindsay I. Smith (2002) A tutorial on Principal Components Analysis. *Technical Report OUCS-2002-12 Department of Computer Science*, University of Otago, New Zealand, 28.
- Ujwala, P., Mudengudi, U. (2011) Image fusion using hierarchical PCA. *IEEE Int. Conf. on Image Information Processing (ICIIP)*, 1–6, 3–5.
- Olkkonen, H., Pesola, P. (1996) Gaussian pyramid wavelet transform for multiresolution analysis of images. *Graphic Models Image Process*, 58(4), 394–398.
- Jianbing Shen, Ying Zhao, Shuicheng Yan, Xuelong Li (2014) Exposure Fusion Using Boosting Laplacian Pyramid. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 44, 9.
- Chandrasekhar, C., Viswanath, A., Narayana Reddy, S. (2013) Implementation of image fusion technique using DWT for micro air vehicle applications. *Field-Programmable Gate Array (FPGA)*, 4(8), 307–315.
- Dong, J., Dafang, Z., Yaohuan, H., Jinying, F. (2011) Survey of multispectral image fusion techniques in remote sensing applications. In: *Image Fusion and its Applications*. Alcorn State University, USA.
- Wu, D., Yang, A., Zhu, L., Zhang, C. (2014) Survey of multi-sensor image fusion. *Int. conf. on Life System Modeling and Simulation*. Springer, Berlin, 358–367.
- Naidu, V.P. (2012) Discrete cosine transform based image fusion techniques. *J. of Communication, Navigation and Signal Processing*, 1(1), 35–45.
- Desale Rajenda Pandit, Verma Sarita V. (2013) Study and analysis of PCA, DCT & DWT based image fusion techniques. *IEEE Int. Conf. on Signal Processing Image Processing & Pattern Recognition (ICSIPR)*, Coimbatore, 66–69.
- Tang Han, Xiao Bin, Li Weisheng, Wang Guoyin (2018) Pixel convolutional neural network for multi-focus image fusion. *Information Sciences*, Vol. 433–434, 125–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.12.043>
- Liu, Y., Chen, X., Ward, R.K., Wang, J.Z. (2016) Image Fusion with Convolutional Sparse Representation. *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 23, 12, 1882–1886. DOI: <https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2618776>
- Cheng, Z., Sun, H., Takeuchi, M., Katto, J. (2018) Deep Convolutional AutoEncoder-based Lossy Image Compression, *Picture Coding Symposium (PCS)*, 253–257, DOI: <https://doi.org/10.1109/PCS.2018.8456308>
- Uma, K.V. (2018). Improving the Classification Accuracy of Noisy Dataset by Effective Data Preprocessing. *Int. J. of Computer Applications*, 180(36), 37–46, DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2018916908>
- Patil, V., Sale, D., Joshi, M.A. (2013) Image fusion methods and quality assessment parameters. *Asian J. of Engineering and Applied Technology*, 2(1), 40–46.
- Li, M., Cai, W., Tan, Z. (2006) A region-based multi-sensor image fusion scheme using pulse-coupled neural network. *Pattern Recognition Letters*, 27(16), 948–956.
- Kusum Rani, Reecha Sharma (2013) Study of different image fusion algorithm. *Int. J. of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETA)*, Vol. 3, Issue 5.
- Paramanandham, N., Rajendiran, K. (2018) Multi sensor image fusion for surveillance applications using hybrid image fusion algorithm. *Multimedia Tools Application*, 77(10), 12405–12436.
- Du, J., Li, W., Lu, K., Xiao, B. (2016) An overview of multi-modal medical image fusion. *Neurocomputing*, 26(215), 3–20.

38. Jin, X., Jiang, Q., Ya, S. et.al. (2017) A survey of infrared and visual image fusion methods. *Infrared Physics Technology*, 1(85), 478–501.
39. Anna de Juan et. al. (2019) Data Fusion Methodology and Applications. *Data Handling in Science and Technology*, Vol. 31, 205–233.
40. Ram-Nandan, P. Singh (2000) An Intelligent Approach to Positive Target Identification. *Soft Computing and Intelligent Systems*, Chapter 22, 5549–5570.
41. Sreeja, G., Saraniya, O. (2019) Image Fusion Through Deep Convolutional Neural Network. *Deep Learning and Parallel Computing Environment for Bioengineering Systems*, Chapter 3, 37–52.
42. Anna de Juan (2020) Multivariate curve resolution for hyperspectral imaging analysis. *Hyperspectral Imaging Data Handling in Science and Technology*, Vol. 32, 115–146.
43. Anke Meyer-Baese, Volker Schmid (2014) The Wavelet Transform in Medical Imaging. *Pattern Recognition and Signal Analysis in Medical Imaging (Second Edition)*, 113–134.
44. Rajalingam B., Priya R., Bhavani R. (2021) Comparative analysis of hybrid fusion algorithms using neurocysticercosis, neoplastic, Alzheimer's, and astrocytoma disease affected multimodality medical images Advanced Machine Vision Paradigms for Medical Image Analysis Hybrid. *Computational Intelligence for Pattern Analysis and Understanding*, Chapter 5, 131–167.
45. Shutao, Li, Bin, Yang (2008) Region-based multi-focus image fusion. *Image Fusion*, 343–365.
46. Qiang Wang, Yi Shen, Jing Jin (2008) Performance evaluation of image fusion techniques. *Image Fusion*, 469–492.
47. Fatima A. Merchant, Kenneth R. Castleman (2009) Computer-Assisted Microscopy. *The Essential Guide to Image Processing*, 777–831.
48. Todd W. Kelley, Jay L. Patel (2018) Genetic Aspects of Hematopoietic Malignancies. *Principles and Applications of Molecular Diagnostics*, 201–234.
49. Jagdeep Singh, Vijay Kumar Banga (2014) An enhanced DCT based image fusion using adaptive histogram equalization. *Int. J. of Computer Applications*, Vol. 87, 12, 0975–8887.
50. Changqi Sun, Cong Zhang, Naixue Xiong (2020) Infrared and visible image fusion techniques based on deep learning: A Review. *Electronics*, 9, 21–62. DOI:https://doi.org/10.3390/electronics9122162
51. Самолюк Т.А. (2019) Нейромережі GAN у створенні нових моделей. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*, 18, 86–90.
Samolyuk, T.A. (2019) Neural networks GAN in creation of new models. *Kompiuterni Zasoby, Merezhi ta Systemy*, 18, 86–90 [in Ukrainian].
52. Левчунець Д.О., Іскрук В.В., Іванов А.В. (2014) Порівняння методів спектральної фільтрації з різними базами. *Вісник Хмельницького національного університету*, 3(213), 17–20.
- Levchunets, D.O., Iskruck, V.V., Ivanov, A.V. (2014) Comparison of methods of spectral filtration with different bases. *Visnyk KhmNU*, 3(213), 17–20 [in Ukrainian].
53. Купченко Л.Ф., Рыбьяк А.С., Гури О.А. (2018) Оценка согласованности оптимальной динамической спектральной фильтрации в оптико-электронных системах обнаружения объектов. *Радиофизика та електроніка*, 23, 1, 42–52. DOI: https://doi.org/10.15407/rej2018.01.042
- Kupchenko, L.F., Rybiyak, A.S., Gurin, O.A. (2018) Evaluation of consistency of optimal dynamic spectral filtration in optoelectronic systems of detection of objects. *Radiofizyka ta Elektronika*, 23(1), 42–52 [in Russian]. DOI:https://doi.org/10.15407/rej2018.01.042
54. Момот А.С., Галаган Р. М. (2017) Застосування нейромережних технологій для вирішення обернених задач неруйнівного контролю. *XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи»*, м. Київ, Збірка тез доповідей, с. 144.
Momot, A.S., Galagan, R.M. (2017) Application of neural network technologies for solution of inverse problems of nondestructive testing. In: *Abstr. of Papers of Sci.-Tekh. Conf. on Instrument Making: State-of-the-Art and Prospects*, Kyiv, 144 [in Ukrainian].
55. Мельник С., Петриченко Г., Тулузов І. (2016) Нові методи теплової томографії, а також фільтрації тепловізійних зображень. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 77, 48–57.
Melnyk, S., Petrichenko, G., Tuluzov, I. (2016) New methods of thermal tomography, as well as filtration of thermal images. *Vimiryuvalna Tekhnika ta Metrologiya*, 77, 48–57 [in Ukrainian].
56. Momot, A.S., Galagan, R.M. (2018) The Use of Backpropagation Artificial Neural Networks in Thermal Tomography. *IEEE 1st Int. Conf. on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)*, 1–6.
57. Halloua, H., Elhassnaoui, A., Saifi, A., et.al. (2016) An intelligent method using neural networks for Depth detection by standard thermal contrast in active thermography. In: *Proc. 13th Int. Conf. on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2016)*, July, Gdańsk, Poland.
58. Bardia Yousefi, Davood Kalhor, Rubén Usamentiaga et. al. (2018) Application of Deep Learning in Infrared Non-Destructive Testing. In: *14th Int. Conf. on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2018)*, June, Berlin, Germany.
59. Galagan, R., Momot, A. (2019) Influence of architecture and training dataset parameters on the neural networks efficiency in thermal nondestructive testing. *Sciences of Europe*, Vol. 1, 44, 20–25.
60. Chulkov, A.O., Sommier, A., Pradere, C., Vavilov, V.P. (2021) Analyzing efficiency of optical and THz infrared thermography in nondestructive testing of GFRPs by using the Tanimoto criterion. *NDT & E International*, Vol. 117, 102–383.
61. Eisler, K., Homma, C., Goldammer, M., Rothenfusser, M. (2013) Fusion of visual and infrared thermography images for advanced assessment in non-destructive testing. *Review Sci. Instruments*, 84, 064902.

IMAGE PROCESSING TECHNOLOGIES BASED ON COMPLEXING DATA (Review)

D.V. Storozhyk, A.G. Protasov

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: a.g.protasov@gmail.com

Recently, there has been an increase in the automation of complex technological processes in various industries, which is caused by the need to increase production efficiency. Since non-destructive testing (NDT) has become an integral part of many industries, this trend is also observed in it. The obtained image containing information about the condition and quality of the object is the final result of the majority of testing methods. Therefore, automation of processing and analysis of received images is an urgent task for NDT today. The purpose of this article is to review image-processing technologies based on data integration and to consider the prospects of applying these methods to solving the problems of thermal NDT. The article describes the main theoretical principles of image fusion technology, considers the classification of fusion methods, and various modern methods of image fusion of different levels with their pros and cons. Various methods based on spatial data and transformations with quality metrics and their application in various fields were also discussed. In addition, the application of the technology of fusion in the problems of image formation during implementation of the thermal tomography method is considered. The following steps are proposed for the study of the use of fusion in the problems of materials diagnosis. 61 Ref.

Keywords: thermal nondestructive testing, image integration, neural networks

Надійшла до редакції 04.10.2022

ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ЗАВАД ПРИ ТЕПЛОВОМУ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І МОРФОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ

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

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

Описано характерні для теплового неруйнівного контролю завади, що знижують достовірність отриманих результатів. Запропоновано методику їх зменшення, що складається з двох взаємозалежних етапів. Перший етап полягає у розрахунку і аналізі характеру та рівня очікуваного сигналу за розробленою теплофізичною моделлю на тлі експериментально отриманого рівня завад. За результатами аналізу розрахунків за теплофізичною моделлю для обраних зразків найвпливовішою завадою виявилася неоднорідність випромінювальної здатності поверхні зразка. Зменшенню цієї завади присвячений другий етап обробки отриманих даних, який полягає в обробці термограм температурних полів і включає морфологічний аналіз стану поверхні, фільтрації та зменшення характерних завад та шумів. Він розділений на чотири практичні процедури: аналіз візуального зображення та отримання карти зон з різною випромінювальною здатністю поверхні зразка, аналіз термограми з оцінкою рівня дискретності термограми та положенням реперних точок на зображенні, згладжування термографічного зображення та виділення на термограмі зон з різною випромінювальною здатністю поверхні об'єкта контролю, після чого відбувається фільтрація завади. Так як на результати теплового контролю сильно впливає форма об'єкта, можливості та ефективність запропонованої методики проілюстрована на об'єкті циліндричної форми. Експериментально підтверджено, що для вибраного зразка рівень завад вдалося знизити до рівня впевненого виділення корисного сигналу на фоні завади. Бібліогр. 10, рис. 5.

Ключові слова: тепловий неруйнівний контроль, рівень корисного сигналу, структурні завади, теплофізична модель, обробка зображень, морфологічний аналіз

Вступ. Активний розвиток трубопровідного транспорту в світі розпочався наприкінці 1960-х р., а зараз протяжність магістральних трубопроводів складає сотні тисяч кілометрів, у тому числі: газопроводів, нафтопроводів, водопроводів, систем опалення та охолодження. Ця гігантська інфраструктура знаходиться під навантаженням десятки років, за рахунок чого схильна до корозії та зносу. Моніторинг стану таких систем контактними методами є складною та дорогою процедурою. Тому ефективнішими для вказаних об'єктів є безконтактні методи, які в більшості випадків не мають альтернативи. Одним з перспективних методів безконтактного неруйнівного контролю є тепловий метод (для об'єктів, які мають своє теплове поле). У даний час існує велика кількість алгоритмів підвищення якості зображень, проте вони неефективні для обробки термограм при неруйнівному тепловому контролі. Це пов'язано з особливостями інфрачервоного випромінювання та специфікою його реєстрації. Тому реалізувати потенційні можливості цього методу на практиці не завжди вдається внаслідок наявності значних завад. Усунути зазначений недолік можна як на етапі проведення вимірювань, так і при обробці

отриманих результатів за рахунок урахування теплофізичних характеристик та структурних особливостей об'єктів контролю [1, 2].

Завади у тепловому неруйнівному контролі. При реалізації теплового контролю (ТК) джерелом шумів і завад є сам об'єкт контролю (ОК), реєструюча апаратура та вплив навколишнього середовища. Шуми можуть додаватись до корисного температурного сигналу T (адитивний шум $\tilde{A}$) або перемножуватись з ним (мультиплікативний шум $\tilde{A}$) [1]:

$$u(x, y, \tau) = \tilde{M}T(x, y, \tau) + \tilde{A}. \quad (1)$$

З (1) видно, що зареєстрований сигнал $u \equiv T$ тільки тоді, коли $\tilde{M} \equiv 1$ та $\tilde{A} \equiv 0$. Найкращою процедурою випробувань є така, у якій чутливість методу обмежена детектором випромінювання, тобто $\tilde{M} \equiv 1$ та $\tilde{A} \rightarrow \min$. Також цьому закону підпорядковуються завади та шуми, але різниця між ними полягає у характері їх залежності: шум є сигналом, який має випадковий характер, а завада є сигналом, величина якого підпорядкована причині його виникнення [3].

При активному ТК основним джерелом зовнішньої завади є нагрівач. При пасивному ТК зовнішні джерела теплового випромінювання можуть

Стороженко В.О. – <https://orcid.org/0000-0002-7609-2955>, Мягкий О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0442-5570>,

Орел Р.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>, Мешков С.М. – <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>

© В.О. Стороженко, О.В. Мягкий, Р.П. Орел, С.М. Мешков, 2022

створювати помилкові сигнали, які оператор може трактувати як ознаки дефекту. Цей факт ускладнюється тим, що випромінювання, яке відбивається від об'єкту контролю, залежить від стану його поверхні та кута реєстрації.

Для зниження завад і підвищення ефективності теплового контролю було використано метод, який базується на аналізі виявлення дефектів (процедурі ТК) і вдосконалені методики обробки отриманих зображень температурних полів ОК. Крім стану поверхні важливу роль у тепловому контролі має також форма ОК.

Поставлена мета досягається використанням теоретично-експериментального підходу, який поєднує побудову і аналіз теплофізичної моделі та методику комп'ютерної обробки результатів контролю об'єкта складної форми. У якості експериментального зразка було використано фрагмент напірного трубопроводу, який надано спеціалістами Південноукраїнської АЕС.

Вибір теплофізичної моделі. Запропонована методика складається з двох взаємозалежних етапів. Перший етап полягає у розрахунку і аналізі характеру та рівня очікуваного сигналу за розробленою теплофізичною моделлю на тлі експериментально отриманого рівня завад. За результатами аналізу розрахунків за теплофізичною моделлю для обраних зразків обирається методика подальшої комп'ютерної обробки отриманих даних [4, 5]. Другий етап полягає в обробці термограм температурних полів і включає морфологічний аналіз стану поверхні, фільтрацію та зменшення характерних завад і шумів. Основною умовою адекватного опису процесу контролю є вибір як фізичної, так і математичної моделі, які найповніше відображають особливості теплопередачі в дефекті та виробі, а також дозволяють аналізувати модель контрольованого об'єкта, особливості процесу та розраховувати з необхідною точністю кількісні параметри.

У якості моделі ОК обрана теплофізична модель циліндричної форми з локальним дефектом типу витончення стінки, яка наведена на рис. 1. Об'єкт контролю представляється у вигляді цилін-

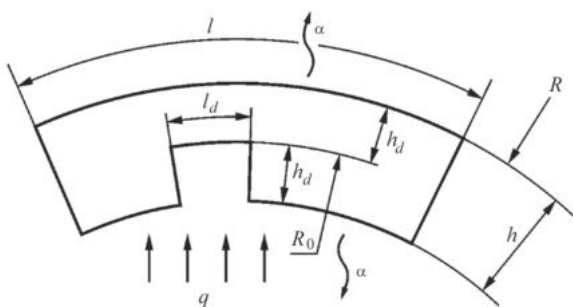


Рис. 1. Об'єкт контролю з дефектом типу витончення стінки трубопроводу

дра з неоднорідністю (дефектом). Дефект у вигляді витончення стінки модельований пазом всередині ОК глибиною h_d і розміром l_d .

Обраний моделі відповідає наступне рівняння:

$$\text{div}(\lambda(T)\nabla T(\vec{r},t)) + Q(\vec{r},t) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial t}, \quad (2)$$

де $T(\vec{r},t)$ – температура об'єкта контролю, що залежить від координат точки M і часу t ; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К) (у загальному випадку може залежати від температури T); $Q(\vec{r},t)$ – функція внутрішніх джерел тепла, Вт/м²; c – питома теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина речовини, кг/м³. Якщо R_1 – внутрішній радіус ОК; R – зовнішній радіус ОК, то $\lambda(T)$ для $r < R_1$ дорівнює $\lambda_1(T)$, для $R_1 < r < R - \lambda_2(T)$, для $r > R - \lambda_3(T)$.

Для реального процесу теплового контролю (теплової дефектоскопії) рівняння (2) можна спростити з урахуванням наступних факторів: внутрішні джерела відсутні, а коефіцієнт теплопровідності не залежить від температури, тому що прогрів ОК не перевищує 100 °С. З урахуванням цього отримуємо [3]:

$$\left(\lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda(\vec{r})}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(\lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial \lambda(\vec{r})}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left(\lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial \lambda(\vec{r})}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial t}. \quad (3)$$

Рівняння (3) є однорідним лінійним диференціальним рівнянням другого порядку параболічного типу, тому що $\lambda \geq 0$. Саме це рівняння адекватним чином описує обрану теплофізичну модель (рис. 1) за умови його розв'язання при вірно обраних граничних умовах, що відповідають реальній процедурі теплового контролю, тобто при граничних умовах 2-го і 3-го роду на зовнішніх поверхнях ОК [6]:

$$\begin{cases} r = R_0 \\ \lambda(\vec{r},T) \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial n} \Big|_s = \alpha \left(T(\vec{r},t) \Big|_s - T_{\text{середовища}} \right) - q(\vec{r},t), \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} r = R \\ -\lambda(\vec{r},T) \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial n} \Big|_s = -\alpha \left(T(\vec{r},t) \Big|_s - T_{\text{середовища}} \right), \end{cases} \quad (5)$$

де $q(\vec{r},t)$ – густина потоку тепла, Вт/м²; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); R_0 – радіус поверхні, на якій знаходиться дефект, м; h – товщина ОК, м.

Співвідношення (4) і (5) відображають реальні умови проведення активного ТК, тобто нагрів ОК зовнішнім джерелом тепла та наявність теплообміну з навколишнім середовищем. Математична модель процесу ґрунтується на розв'язанні диференціального рівняння нестационарної теплопро-

відності (2), записаного для циліндричної системи координат [7, 8].

Термограму експериментального зразка із завадою, викликаною неоднорідністю випромінювальної здатності поверхні зразка, наведено на рис. 2. На основі аналізу результатів розрахунків, проведених за теплофізичною моделлю, та даних, отриманих з термограм візуальних зображень об'єкта контролю, було отримано наступні результати:

- рівень очікуваного сигналу складає $\sim 2...3$ °C;
- у рівень завади найбільший вклад робить мультиплікативна завада, що викликана неоднорідністю випромінювальної здатності зразка;
- рівень домінуючої завади складає близько $\sim 4,3$ °C.

Рівень корисного сигналу та завади близькі за порядком величини (згідно з рис. 2), тому термограма потребує подальшої комп'ютерної обробки з метою зменшення домінуючої завади.

Обробка результатів теплового контролю.

Реальні рівні завад та шумів на експериментальних зразках, для яких було розроблено теплофізичні моделі, наведено на рис. 3. Як видно, рівень сигналу завади не дозволяє впевнено виділити дефекти. Також зрозуміло, що ці завади неможливо видалити методами графічної обробки зображень, але можна застосувати додаткову інформацію, яку отримано раніше при моделюванні.

Аналіз термограми (рис. 2) показав, що найбільший вклад у рівень завад вносить та, яка викликана неоднорідністю випромінювальної здатності та пов'язана зі станом поверхні та зміною кута реєстрації випромінювання, що є характерним для циліндричних об'єктів з малим радіусом.

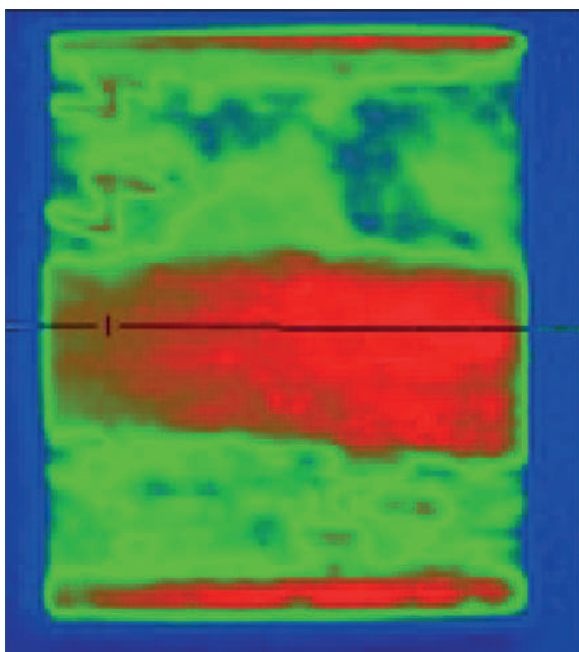


Рис. 2. Термограма фрагменту трубопроводу з дефектом та можливими завадами

Суть запропонованого методу обробки термограми ОК зі складною геометрією полягає в компенсації завад в зонах їх наявності. Запропонований метод дозволяє виділяти такі зони шляхом використання отриманої апіорної інформації з видимого зображення у вигляді карти зон з різною випромінювальною здатністю та зіставлення її з термограмою.

Для автоматизації процесу зіставлення карти зон з різною випромінювальною здатністю та термограми було запропоновано алгоритм, який складається з наступних процедур:

1. Аналіз візуального зображення (отримання карти зон з різною випромінювальною здатністю поверхні зразка).
2. Аналіз термограми (оцінка рівня дискретності термограми та положення реперних точок).
3. Попередня обробка зображень (згладжування термографічного зображення, тому що, як правило, воно більш дискретне за видиме).
4. Виділення на термограмі зон з різною випромінювальною здатністю поверхні ОК (проходить при накладанні карти зон на термограму шляхом суміщення реперних точок).

У питаннях обробки зображень і розпізнавання зон інтересу використовується обмежений набір методів попередньої обробки зображень [9]. Це пов'язано з тим, що сучасні системи реєстрації ОК розраховані на контроль оператора, що дозволяє утримувати характеристики отримуваних зображень у вузькому діапазоні, який відповідає оптимальному режиму контролю [4].

Далі для виділення на термограмі зони інтересу проводиться нормалізація видимого зображення за допомогою двох реперних точок, виділених на термограмі та на видимому зображенні. Нормалізація необхідна для отримання точнішого контуру зони інтересу на термограмі. Після етапу підготовки зображень виділяються реперні точки на видимому зображенні всередині контуру об'єкта. Цей етап проводиться і на термограмі. Після чого відбувається перенос контуру з видимого зображення на термограму. Для цього треба виконати наступні кроки:

1. Підготовка видимого зображення, яка включає фільтрацію, виділення контурів, нормалізацію (масштабування та поворот) і сегментацію (виділення об'єкта за реперними точками). Описані етапи при правильному підборі методів дозволяють отримати контур на видимому зображенні для подальшого накладання на термограму.

2. Проведення аналізу термограми, який включає нормалізацію та виділення реперних точок і зони інтересів на термограмі та видимому зображенні. Виділення зони інтересів складається з двох етапів: перенесення на термограму контурів виділеного об'єкта, отриманого на видимому

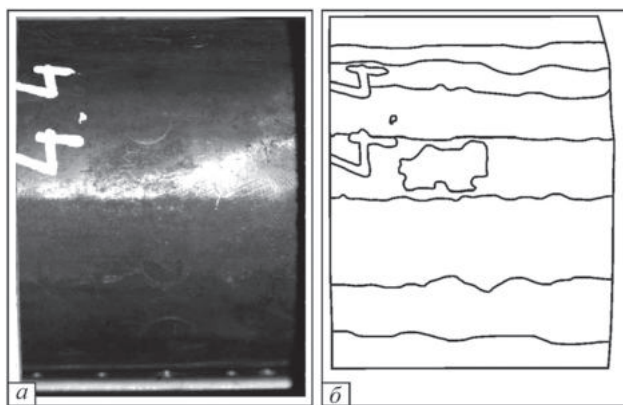


Рис. 3. Видиме зображення фрагменту труби (а) і результат обробки зображення оператором Робертса після фільтрації (б) му зображенні, та виявлення зон із середньою за зразками випромінювальною здатністю на досліджуваній поверхні [10].

За допомогою отриманого контуру зони можна її проаналізувати за температурним показником [1, 4].

Існує багато методів фільтрації видимого зображення: згортка, комбінована фільтрація з диференційованим згладжуванням областей з різною інформаційною цінністю, медіанний метод, лінійна та нелінійна фільтрація, метод SUSAN [4], з яких у проведених експериментальних дослідженнях було використано методи медіанної фільтрації та SUSAN.

Завдяки такій процедурі було подавлено текстурні завади, що спростило подальшу обробку. Візуальний аналіз не виявив значних змін, але необхідність такої фільтрації є дуже важливим етапом для подальшої обробки.

Наступним кроком при підготовці видимого зображення є виділення контурів. Для цього на видимому зображенні були обрані метод активних контурів, оператор Робертса, оператор Лапласа та різницевий метод. У розробленому програмному продукті представлені метод Робертса та різницевий метод. Перед обробкою зображення даними методами необхідно провести попередню фільтрацію методом SUSAN, тому що для коректної роботи оператора Робертса необхідна безперервна функція інтенсивності, а базове зображення має

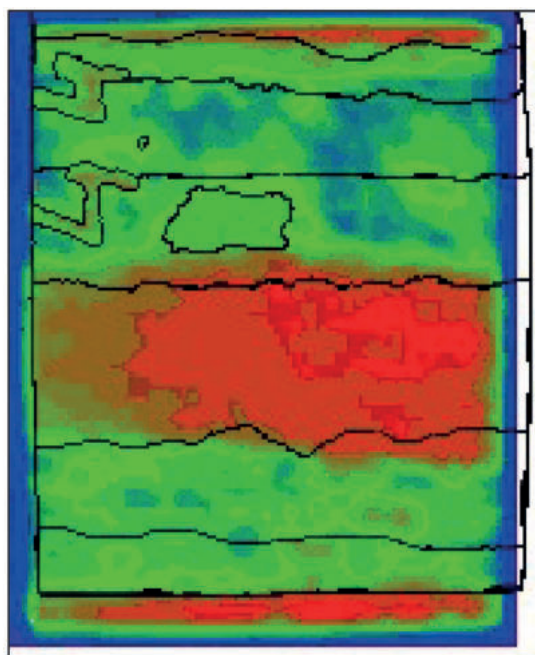


Рис. 4. Накладання відфільтрованого видимого зображення на термографічне

дискретну функцію [4]. Результат використання оператора Робертса показано на рис. 3.

Над двовимірною функцією, що отримана у результаті обробки, було проведено згладжуючу фільтрацію для зменшення дискретизації зон і отримання безперервного контуру зони, причому незалежно від того, яким методом здійснювалось виділення контуру. На цьому етапі алгоритму реалізовано функцію накладання. Вона дозволяє поєднувати відфільтроване зображення з термограмою об'єкта. Результат роботи цієї функції представлено на рис. 4.

Для кожної зони було задано поправочний коефіцієнт [1], який компенсував неоднорідність випромінювальної здатності та кут реєстрації в даній зоні. Таким чином було відфільтровано вказані раніше завади та відновлено початкове температурне поле (рис. 5).

Отримані результати показують, що температурне поле (рис. 5, б) збільшується зліва направо, що відповідає зменшенню товщини стінки зразка

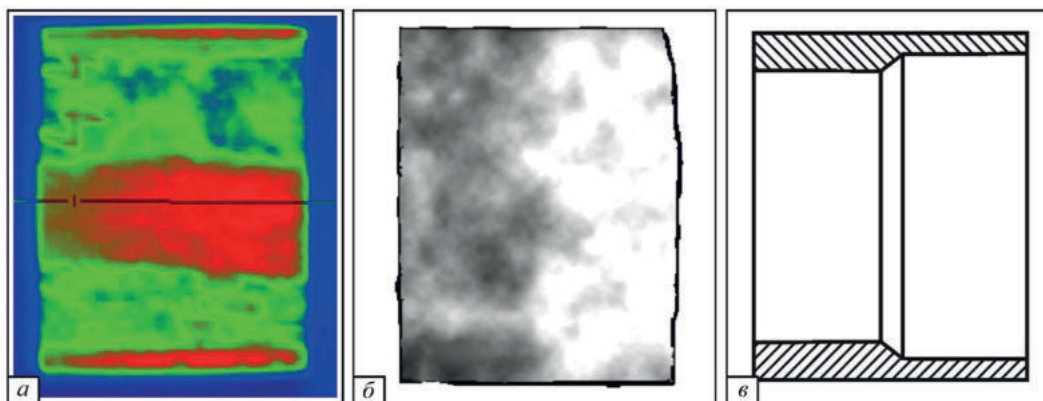


Рис. 5. Результати експерименту: термограма фрагмента паропроводу (а), відновлене температурне поле ОК (б), переріз зразка (в)

(рис. 5, в). Як видно з наведених термограм, рівень структурної завади, що викликана неоднорідністю випромінювальної здатності поверхні та кутом реєстрації зразка, знизився з 4,3 до 0,7 °C, тобто на 3,6 °C. Рівень не домінуючих завад та шумів складає 1,1 °C, що не заважає виділенню корисного сигналу на їх фоні. Таким чином, запропонована методика дозволила виявити внутрішню структуру зразка – області з різною товщиною стінки та межу між ними.

Висновки

Запропоновано метод обробки результатів теплового контролю, який дозволяє врахувати особливості інфрачервоного випромінювання та специфіку його реєстрації. Метод дозволяє знизити рівень структурних завад, який базується на аналізі теплофізичної моделі та морфологічних особливостей видимого і температурного зображень.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали ефективність нового підходу до аналізу теплових зображень при тепловому неруйнівному контролі.

Розроблено теплофізичну модель об'єкта контролю циліндричної форми, яка враховує особливості теплопередачі у дефекті та на основі якої можна розрахувати та проаналізувати характер і рівень очікуваного сигналу на фоні експериментально отриманого рівня завад.

Використання системи поправочних коефіцієнтів для різних зон на поверхні об'єкта контролю дозволяє наблизитись до розв'язання складної для теплового методу задачі – контролю об'єктів складної форми та об'єктів, які мають регулярні структурні неоднорідності.

Описаний алгоритм дозволяє проводити обробку зображення та компенсувати заваду, коли її не можна мінімізувати шляхом оптимізації режиму активного контролю [8].

Проведений експеримент підтвердив обґрунтованість та правильність теоретичних положень і дозволив визначити внутрішню структуру досліджуваного об'єкта (різну товщину стінки) та знизити рівень структурних завад на 3,6 °C (з 4,3 до 0,7 °C).

Дослідження показують, що обробка експериментальних даних, яка проведена з урахуванням особливостей теплофізичних та структурних характеристик об'єктів контролю, дає значний позитивний результат і є важливим кроком до автоматизації процедур теплового неруйнівного контролю на шляху впровадження у поточне виробництво.

Список літератури

1. Вавилов В.П. (2009) *Инфракрасная термография и тепловой контроль*. Москва, Спектр.
2. Стороженко В.А., Маслова В.А. (2004) *Термография в диагностике и неразрушающем контроле*. Харьков, Смит.

3. Xavier, P.V. Maldague (2001) *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, Inc.
4. Pragnan Chakravorty (2018) What is a Signal? [Lecture Notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35, 5, 175–177. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2832195>
5. Стороженко В.А., Малик С.Б., Мягкий А.В. (2008) Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии на основе теплофизического моделирования. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Електроенергетика та перетворювальна техніка»*, 48, 84–91.
6. Стороженко В.А., Малик С.Б., Мягкий А.В., Тихий В.Г. (2013) Оптимизация процедуры тепловой дефектоскопии сотовых конструкций. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 31–35.
7. Мягкий А.В., Лазоренко О.В., Стороженко В.А. (2013) Обработка результатов тепловой дефектоскопии сотовых конструкций с целью понижения уровня помех. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Електроенергетика та перетворювальна техніка»*, 34, 108–122.
8. Storozhenko, V., Myagkiy, A., Orel, R. (2016) Optimization of the Procedure of Thermal Flaw Detection of the Honeycomb Structures By Improving The Accuracy Of Interference Function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79563>
9. Basim Alhadidi, Mohammad H. Zu'bi, Hussam N. Suleiman. (2007) Mammogram Breast Cancer Image Detection Using Image Processing Functions. *Information Technology Journal*, 6, 2, 217–221. DOI: <https://doi.org/10.3923/itj.2007.217.221>
10. Solomon, C.J., Breckon, T.P. (2010) *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. Wiley-Bsackwell.

References

1. Vavilov, V.P. (2009) *Infrared thermography and thermal control*. Moscow, Spektr [in Russian].
2. Storozhenko, V.A., Maslova, V.A. (2004) *Thermography in diagnostics and nondestructive testing*. Kharkov, Smit [in Russian].
3. Xavier, P.V. Maldague (2001) *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, Inc.
4. Pragnan Chakravorty (2018) What is a Signal? *IEEE Signal Processing Magazine*. Vol. 35, Issue 5, 175–177. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2832195>
5. Storozhenko, V.A., Malik, S.B., Myagky, A.V. (2008) Optimization of modes of thermal flaw detection based on thermophysical modeling. *Вісник НТУ «ХПІ», серія «Електроенергетика та Перетворювальна Техніка»*, 48, 84–91 [in Russian].
6. Storozhenko, V.A., Myagky, A.V., Malik, S.B., Tikhy, V.G. (2013) Optimization of the procedure of thermal flaw detection of honeycomb structures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 31–35 [in Russian].
7. Myagky, A.V., Lazorenko, O.V., Storozhenko, V.A. (2013) Processing the results of thermal flaw detection of honeycomb structures to reduce the level of interferences. *Вісник НТУ «ХПІ», серія «Електроенергетика та Перетворювальна Техніка»*, 34, 108–122 [in Russian].
8. Storozhenko, V., Myagkiy, A., Orel, R. (2016) Optimization of the procedure of thermal flaw detection of the honeycomb constructions by improving the accuracy of interference function. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 5, 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79563>
9. Basim Alhadidi, Mohammad H. Zu'bi, Hussam N. Suleiman (2007) Mammogram breast cancer image detection using image processing functions. *Information Technology J.*, Vol. 6, Issue 2, 217–221. DOI: <https://doi.org/10.3923/itj.2007.217.221>
10. Solomon, C.J., Breckon, T.P. (2010) *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. Wiley-Blackwell.

REDUCING THE LEVEL OF INTERFERENCE AT THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING CONSIDERING THE SPECIFIC THERMAL PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE OBJECT

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

RTC «Thermocontrol» of Kharkiv National University of Radio Electronics. 14 Nauky Ave., 61166, Kharkiv, Ukraine. E-mail: volodymyr.storozhenko@nure.ua

Interferences, characteristic for non-destructive thermal testing which reduce the reliability of the results obtained are described. A technique for their reduction is suggested which consists of two interrelated stages. The first stage consists in calculating and analyzing the nature and level of the expected signal according to the developed thermophysical model against the background of the experimentally obtained noise level. According to the results of analysis of calculations using the thermophysical model for the selected samples, the most influential interference was the inhomogeneity of the emissivity of the sample surface. The second stage of processing the received data is devoted to reducing this noise. This stage consists in processing of thermograms of temperature fields and includes morphological analysis of the surface condition, filtering and reducing characteristic noise and interference. It consists of four practical procedures: analysis of the visual image and obtaining a map of zones with different emissivity of the sample surface, analysis of the thermogram with an assessment of the level of discreteness of the thermogram and the position of fiducial points on the image, smoothing the thermographic image and highlighting zones on the thermogram with different emissivity of the controlled object surface, after which the noise is filtered. Since the results of thermal control are strongly influenced by the shape of the object, the possibilities and effectiveness of the suggested technique are illustrated on a cylindrical object. It has been experimentally confirmed that for the selected sample, it was possible to reduce the noise level to that of confident separation of useful signal against the noise background. Ref. 10, Fig. 5.

Keywords: thermal non-destructive testing, useful signal level, structural noise, thermophysical model, image processing, morphological analysis

Надійшла до редакції 29.08.2022

ПЕРЕДПЛАТА 2023

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

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

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

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

Передплата на електронну версію журналів.

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

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2023 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2021 рр.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

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

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

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

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

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

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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

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



ЕКСПРЕСНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ГУСЕНИЧНИХ ТРАКІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАННЯ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

О.П. Гопкало¹, О.Є. Гопкало¹, М.П. Земцов¹, Є.В. Коваленко², В.Є. Бодунов¹

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

²ТОВ «АВІП Авіаційні Системи України». 01015, м. Київ, вул. Редутна, 8. E-mail: spc.asu.LTD@gmail.com

Коерцитиметричним контролем встановлено суттєві відмінності структури металу в приповерхневому шарі експериментальних гусеничних траків. Отримані експериментальні результати випробувань на 4-х точковий згин експериментальних гусеничних траків зі сталей, що дещо відрізняються за своїм хімічним складом, підтвердили можливість застосування неруйнівного коерцитиметричного контролю для оцінки початкового структурного стану та рівня навантаженості металу, який характеризує ступінь отриманих пошкоджень після навантаження. Метал якісного траку зі сталі типу 110Г13Л у вихідному стані має нульові значення коерцитивної сили, що забезпечується оптимальним структурним станом металу. Дана обставина може стати обґрунтуванням запровадження коерцитиметричного контролю для експресної оцінки якості відливок та їх термічної обробки. Бібліогр. 7, табл. 4, рис. 10.

Ключові слова: гусеничні траки, структуроскоп, коерцитивна сила, структурний стан

Вступ. Механічні властивості металу виробів залежать від його хімічного складу та структурного стану. У даній роботі використовували неруйнівний магнітний метод оцінки якості структурного стану металу експериментальних гусеничних траків з аустенітної сталі типу Гадфільда (з певними відхиленнями хімічного складу) як у вихідному стані, так і після стандартного випробування на 4-х точковий згин за результатами вимірювання коерцитивної сили. Коерцитивна сила – це інтегральна характеристика структурного стану металу, яка залежить від вмісту та концентрації хімічних елементів у металі та фазових і структурних складових.

У табл. 1 наведено хімічний склад сталі типу Гадфільда (марка сталі 110Г13Л згідно з ДСТУ 8781:2018).

Сталь 110Г13Л має типові для аустенітних сталей високу в'язкість і пластичність при досить великій міцності. При низькій твердості сталь 110Г13Л має надзвичайно високу зносостійкість при терті з тиском і ударами. Це пояснюється зміцненням (наклепом) аустеніту при пластичній деформації в процесі роботи, тобто ця сталь має підвищену здатність до наклепу (значно більше, ніж у звичайних сталей з такою ж твердістю). Наявність значного запасу пластичності сталі 110Г13Л дозволяє здійснювати перерозподіл напружень найнавантажениших ділянок траку, що забезпечує високу цілісність виробу.

У результаті наклепу збільшується опір до зношування, тому сталь 110Г13Л важко обробляється різальними інструментами та деталі з неї найчастіше виготовляють литвом без механічної обробки. В умовах чисто абразивного зношування (наприклад, при терті по піску) ефективного наклепу сталі 110Г13Л не відбувається, що призводить до підвищеного зношування деталей. У зв'язку з унікальними механічними властивостями сталь 110Г13Л знайшла широке застосування для виготовлення зносостійких деталей машин.

Мета роботи полягає в експериментальній перевірці можливості застосування коерцитиметричного контролю для експресної оцінки якості виготовлення гусеничних траків.

Вплив хімічного складу та структурного стану на механічні властивості сталі 110Г13Л. Незважаючи на те, що міцність, пластичність і зносостійкість високомарганцевих сталей у значній мірі визначаються ДСТУ та технічними умовами різних постачальників, допускаються досить широкі коливання вмісту в металі навіть таких основних легуючих елементів, як С, Мн, Si, S, Р, що явно не виправдано [1]. Для підвищення зносостійкості відливок зі сталі 110Г13Л допускається її легування титаном (до 0,05 %), ванадієм (до 0,3 %), молібденом (до 0,2 %) [2]. Легування ванадієм підвищує до 30 % зносостійкість і знижує холодостійкість, але впливає на характеристики

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 110Г13Л згідно з ДСТУ 8781:2018

Масова доля, %								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P	Fe
0,9...1,4	0,3...1,0	11,5...15,0	до 1,0	до 1,0	до 0,3	до 0,05	до 0,12	~83

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

О.П. Гопкало, О.Є. Гопкало, М.П. Земцов, Є.В. Коваленко, В.Є. Бодунов, 2022

міцності. Встановлено, що додавання 2 % ванадію в сталь 110Г13Л призводить до п'ятикратного підвищення опору зносу при збереженні ударної в'язкості. Легування хромом (до 1,5 %) [2] підвищує властивості міцності та зносостійкості сталі. При цьому пластичність і в'язкість трохи знижуються, але залишаються на рівні, що перевищує ці характеристики для звичайної високомарганцевої сталі, та забезпечують нормальну експлуатацію виробів з підвищенням зносостійкості в середньому на 15...20 %. Тобто при легуванні сталі 110Г13Л хромом до 1,0 % (в межах вимог ДСТУ) бажані показники зносостійкості можна значно підвищити [3].

Збільшення вмісту Cr, Si, Ni, Cu та зменшення концентрації Mn у металі викликає підвищення значень коерцитивної сили. Вміст у сталі вуглецю в межах 0,9...1,1 %, а фосфору – не більше 0,5...0,55 % мінімізує ударну в'язкість. Підвищення в сталі вмісту кремнію знижує ударну в'язкість. Максимальні показники ударної в'язкості сягають при вмісту кремнію до 0,5 % [3].

Основною проблемою отримання якісних відливок залишається вибір технології виплавляння та термічної обробки. Якісна термічна обробка є ключовим фактором отримання бажаних структур металу.

Термічна обробка сталі 110Г13Л регламентована ДСТУ 8781:2018 – аустенізація при температурі 1050...1100 °С з охолодженням у холодній воді (не вище 30 °С). Слід зазначити, що стовпчаста та дендритна лита структура повністю не усувається термічною обробкою і негативно позначається на ударній в'язкості, стійкості спротиву абразивному зносу та динамічним навантаженням. Підвищення твердості викликає підвищення значень коерцитивної сили [2].

У табл. 2 наведено дані [4] залежності механічних властивостей сталі 110Г13Л різних виробників від хімічного складу.

Приведені результати показують, що відмінності хімічного складу металу траків різних виробників викликають розкид механічних характеристик у середньому в межах: σ_b – 32,9 %; $\sigma_{0,2}$ – 26,1 %; δ – 66,7 %; Ψ – 75,6 %; KCU^{20} – 32,6 %; KCU^{-60} – 121,2 %; твердість, HB – 7,7 %. Концентрація Mn та Si, нижча від нормованих величин у відливках виробника № 2, викликає найбільше зниження характеристик міцності σ_b , відносного звуження при розтязі Ψ та ударної в'язкості KCU при –60 °С відносно аналогічних показників металу відливок інших виробників [4].

Залежність показника Mn/C для сталі 110Г13Л показує, що з його зростом збільшується ударна в'язкість. Оптимальним вважається відношення Mn/C не менше 10,0. Максимальні показники ударної в'язкості досягаються при відношенні Mn/C в інтервалі 12...13. Показник P + 0,4C характеризує вплив фосфору, який бажано мати не більше за 0,5 %. Підвищення даного показника для сталі 110Г13Л викликає зниження ударної в'язкості. При P + 0,4C більш ніж 0,5 % сталь схильна до утворення тріщин [1].

Для діагностування якості структурного стану металу виробів у вихідному стані та оцінки пошкоджуваності металу в процесі експлуатації конструкцій широке застосування знайшли неруйнівні методи контролю. У [5] наведено приклад діагностування ступеня пошкоджуваності металу гусеничних траків при їх стандартних випробуваннях на 4-х точковий згин. Для траків з оптимальним структурним станом металу (аустенітна структура) характерна відсутність магнітних властивос-

Таблиця 2. Залежність механічних властивостей сталі 110Г13Л різних виробників від хімічного складу (в дужках вказано нормовані величини)

Хімічний склад, %	Виробник						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
C (0,9...1,4)	0,98	0,94	1,05	1,15	0,95	0,97	1,05
Mn (11,5...15)	11,60	10,50	12,69	13,13	13,47	12,35	13,40
Si (0,8...1)	0,66	0,64	0,46	0,51	0,44	0,51	0,44
Cr (до 1,0)	0,10	0,59	0,15	0,39	0,14	0,13	0,11
Ni (до 1,0)	0,18	0,27	0,20	0,16	0,21	0,16	0,27
P (до 0,12)	0,025	0,057	0,029	0,048	0,025	0,028	0,027
S (до 0,05)	0,012	0,004	0,005	0,004	0,007	0,006	0,005
Cu (до 0,3)	0,18	0,17	–	–	0,17	0,12	0,19
Характеристики							
σ_b , МПа	790	610	710	660	850	790	690
$\sigma_{0,2}$, МПа	370	400	440	455	350	375	355
δ , %	38	21,5	24,5	21,5	43	37	27
Ψ , %	29	18,5	41	29	39	37	31
KCU^{20} , Дж/см ²	242	265	325	234	261	258	262
KCU^{-60} , Дж/см ²	90,5	39	159	45	–	–	–
Твердість, HB	202	202	187	187	–	–	–
Бал зерна	3	1	1	0	–	–	–

тей металу у вихідному стані і, відповідно, нульові значення коерцитивної сили. При навантаженні з пружно-пластичним деформуванням відбувається підвищення значень коерцитивної сили, а характер епюр має вигляд, що наближається до кола.

Оскільки коерцитивна сила – це інтегральна характеристика структурного стану металу, яка залежить від вмісту та концентрації хімічних елементів, фазових і структурних складових, то застосування коерцитиметричного контролю дозволяє експресно оцінити якість металу траків.

Методика експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження полягали у визначенні розподілу значень коерцитивної сили по поверхні 13-и експериментальних гусеничних траків зі сталі 110Г13Л (з певними відхиленнями хімічного складу від регламентованого) двох різних виробників у вихідному стані та після випробування на 4-х точковий згин.

На рис. 1 наведено загальний вигляд траків до випробувань з цифровими позначками точок для подальшого вимірювання коерцитивної сили.

Вимірювання коерцитивної сили на поверхні траків у характерних точках проводили структуроскопом КРМ-Ц-К2М (розробник ТОВ «Спеціальні наукові розробки», м. Харків). Оскільки траки мають складну об'ємну конфігурацію з внутрішньою порожниною (при товщині стінок 4...5 мм), то для вимірювання коерцитивної сили з фіксацією можливого нагартування поверхневих шарів металу в умовах експлуатації використовували малогабаритний датчик D12, який має базу вимірювання 12×12 мм та глибину намагнічування до 1 мм. Використання такого датчика дозволяє проводити вимірювання значень коерцитивної сили в дуже обмежених локальних ділянках траку, який має достатньо складну геометрію поверхні. Вимірювання значень коерцитивної сили датчиком D12 показали наявність суттєвого розкиду H_c у різних точках поверхні експериментальних траків. У даній роботі для отримання більш

інтегральних значень коерцитивної сили у значно більших об'ємах металу (27×25×4 мм) використовували датчик D27 з базою вимірювання 27 мм та глибиною намагнічування до 4 мм, що дозволило значно зменшити розкид вимірних величин.

Вимірювання коерцитивної сили полягає у попередньому намагнічуванні металу до насичення з наступним повним розмагнічуванням і подальшим намагнічуванням магнітним полем протилежної полярності для нейтралізації залишкового магнетизму та вимірювання значень H_c . Тривалість циклу визначення коерцитивної сили складає 10 с. Слід зазначити, що при наявності анізотропії структури металу, у тому числі після пластичного деформування, значення коерцитивної сили в досліджуваних точках змінюються при зміні напрямків вимірювання (орієнтації полюсів магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні). У зв'язку з цим вимірювання значень H_c проводили при повороті датчика через кожні 45° відносно попереднього вимірювання (всього 8 вимірів – при орієнтаціях: 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315°), де вважали напрямком вимірювання значень коерцитивної сили $H_{c\parallel}$ (0, 180, 360°) поперек траку (вздовж гусениці) та $H_{c\perp}$ (90, 270°) – вздовж траку (поперек гусениці). Вимірювання значень коерцитивної сили у характерних точках поверхні траків проводили у вихідному стані та після стандартних випробувань на 4-х точковий згин.

Випробування траків у вихідному стані на 4-х точковий статичний згин проводили на розривній машині ZD-40. Навантаження проводили як перпендикулярно площині траку, так і по дотичній до неї згідно зі схемами на рис. 2. Перше навантаження зусиллям $P1 = 300$ кН проводили перпендикулярно до площини траку (рис. 2, а). Якщо після такого навантаження ознак втрати суцільності металу (появи тріщин) не виявлено, незважаючи на наявність залишкових деформацій, то трак навантажували зусиллям $P2 = -300$ кН (у протилежному напрямку прикладання зусиль відносно першого

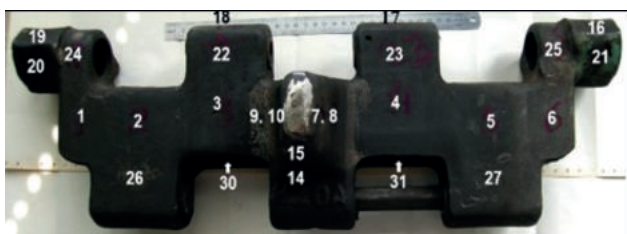


Рис. 1. Загальний вигляд траків до випробувань



Рис. 2. Схеми навантаження траку при випробуваннях на 4-х точковий статичний згин [5]

навантаження (рис. 2, б). Наступне навантаження на зріз при 4-х точковому прикладанні зусиль після попередніх навантажень проводили по дотичній до площини траку зусиллям $P_3 = 240$ кН (рис. 2, в).

В умовах експлуатації на трак діють зусилля від катків (Р), які урівноважуються тиском ґрунту (R). У даному випадку схема навантаження траку відповідає 4-х точковому згину. При експлуатації відбувається деформування та нагартування поверхневих шарів металу, у тому числі від контактних напружень, включаючи тяговий гребінь траку, на який передаються зусилля провідної шестерні приводу та бокові зусилля від катків підвіски при маневрах транспортного засобу. В умовах експлуатації та при випробуваннях на згин має місце неоднорідний напружено-деформований стан різних ділянок траку. Найбільш деформованими є поверхневі шари металу. Але завдяки високій пластичності металу у вихідному стані сталі внаслідок пластичного деформування при експлуатації у найнапруженіших ділянках відбувається перерозподіл напружень з сусідніми ділянками, що забезпечує цілісність конструкції.

Випробуванням на 4-х точковий згин підлягали еталонний гусеничний трак та експериментальні траки, виготовлені з металу з певними відхиленнями хімічного складу від нормованого (траки № 1–4 (2021), № 7–8 (2020), 1–5 (2021) та ЗП-1, ЗП-2 (2021)). У дужках вказано рік проведення випробувань.

Аналіз хімічного складу металу траків проведено на фотоелектричному спектрометрі Spectrovac-1000 (Baird). Хімічний склад металу досліджуваних гусеничних траків і сталі 110Г13Л наведено в табл. 3.

Як видно з табл. 3, досліджені експериментальні траки від різних виробників відрізняються за відсотком певних хімічних елементів (С, Si, Mn, Cr, Р) як між собою, так і від регламентованих нормативними документами для сталі 110Г13Л.

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз. У даній роботі проведено порівняння структурного стану металу експериментальних гусеничних траків різних виробників з еталонним

за результатами вимірювання коерцитивної сили. На рис. 3 наведено характерні епюри коерцитивної сили, виміряної структуроскопом у різних точках поверхні еталонного траку у вихідному стані та після випробувань у різних площинах. Слід зазначити, що у переважній частині траку (наприклад точки 1–6, рис. 3, а) після трьох навантажень за схемами 1–3 (рис. 2) не відбувалось суттєвих змін структурного стану, де значення коерцитивної сили дорівнювали нулю. Найнавантаженішим виявився метал тягового гребеня (точки 8, 9, рис. 3, б) та точки 33 і 34 (рис. 3, в) в основній частині траку.

Мікроструктура фрагментів досліджуваного еталонного траку у вихідному стані в різних зонах характеризується аустенітом змішаної зеренно-дендритної морфології (ливарна структура) (рис. 4, а) та аустенітом зеренної морфології (рис. 4, б) без ознак мікропластичної деформації.

Для еталонного трака з оптимальним структурним станом металу (аустенітна структура, рис. 4) у вихідному стані характерна відсутність магнітних властивостей, що підтверджується вимірами коерцитивної сили ($H_c = 0$ А/см). На відміну від еталонного трака різні ділянки експериментальних траків 1–4 (2021) у вихідному стані мали достатньо високі значення коерцитивної сили, що пов'язано з появою феромагнітних фаз.

Щодо мікроструктури інших досліджуваних зразків, попри різнозеренність, крім аустеніту зеренної морфології травленням виявили приповерхневі шари (завтовшки 300...400 мкм) з ознаками мікропластичної деформації (рис. 5, а). В аустенітних зернах нагартованих шарів між лініями ковзання виявили мартенсит (α -фазу) у різній кількості відповідно для кожного з досліджуваних зразків, що пояснює появу феромагнітних властивостей в даних зразках аустенітної сталі. Виявлено, що значення коерцитивної сили збільшується зі збільшенням долі α -фази, відсоток якої було визначено за допомогою ферритометра локального типу Ferrit Gehalt-messer-1.053.

Таблиця 3. Хімічний склад металу досліджуваних гусеничних траків і сталі 110Г13Л

Номер траків	Масова доля, %										
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V	S	P
Еталон	1,09	0,91	13,3	0,90	0,96	0,21	0,19	0,015	0,068	0,014	0,035
1-4 (2021)	1,04	1,25	2,30	1,52	0,33	0,16	<0,1	<0,05	0,036	0,02	0,15
1-5 (2021)	0,44	0,75	15,8	0,71	0,72	0,11	0,056	0,017	0,006	0,015	0,019
7-8 (2020)	0,66	0,34	12,6	0,63	0,18	0,11	0,038	<0,01	0,017	0,016	0,070
ЗП-1, ЗП-2	0,35	0,42	16,8	1,10	0,080	0,045	0,055	<0,01	0,022	0,013	0,028
Сталь 110Г13Л (ДСТУ 8781:2018)	0,9...1,5	0,3...1,0	11,5...14,5	1,0 не більше	1,0 не більше	—	—	—	—	0,05	0,12
ГОСТ 2176-77	0,9...1,4	0,8...1,0	11,5...15,0	до 1	до 1	до 0,3	—	—	—	до 0,05	до 0,12

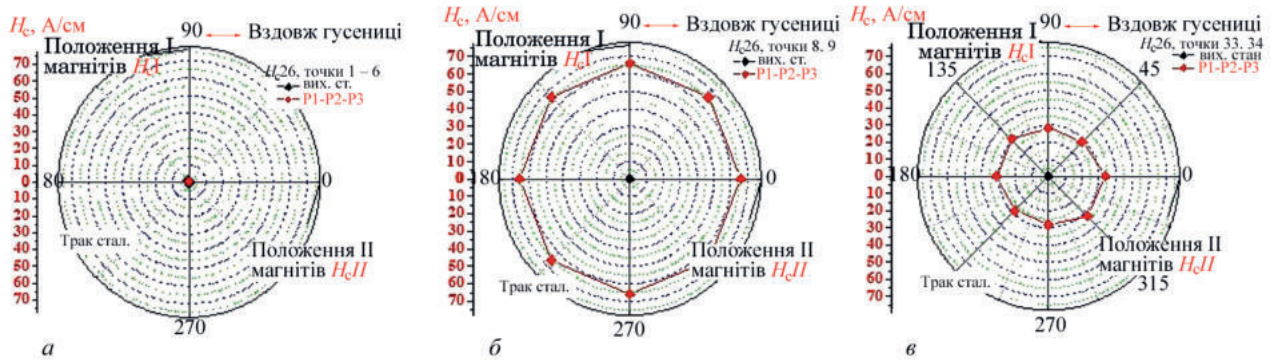


Рис. 3. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні еталонного траку у вихідному стані та після випробувань: а – точки 1–6; б – точки 8, 9; в – точки 33, 34. Значення H_c у вихідному стані відображено чорним, а після навантаження – червоним кольором. Номери точок відповідають рис. 1

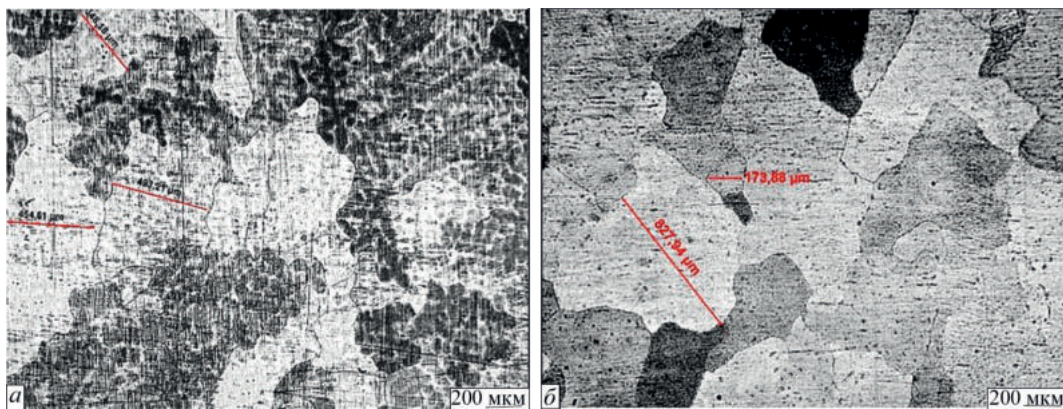


Рис. 4. Приклад мікроструктури фрагментів досліджуваного еталонного траку у вихідному стані в різних зонах (α -фаза $\sim 0\%$, $H_c = 0$ A/cm)

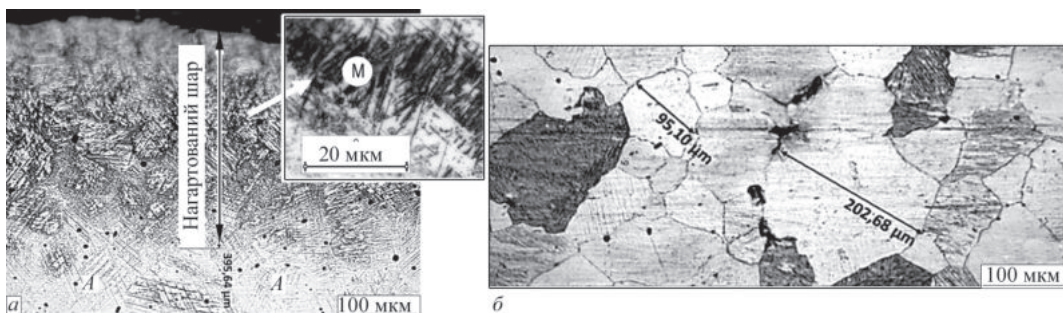


Рис. 5. Приклад типової мікроструктури досліджуваних експериментальних траків (у перерізі) у вихідному стані в різних зонах: а – приповерхневий (нагартований) шар, α -фаза $\sim 0,3\text{--}0,6\%$, $H_c = 35$ A/cm; б – основа аустеніт, α -фаза $\sim 0\%$, $H_c = 0$ A/cm; М – мартенсит (α -фаза)



Рис. 6. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментальних траків 1–4 (2021) у вихідному стані та після випробувань за схемою 1 (рис. 2, а): а – точка 4; б – точка 9; в – точка 26



Рис. 7. Загальний вигляд втрати суцільності (утворення тріщини) металу траків 1–4 (2021) після випробувань на 4-х точковий згин

Відсутність підвищення коерцитивної сили при нормованих навантаженнях за схемою 1 (рис. 2, а) відносно вихідного стану свідчить про незмінність структурного стану металу при деформуванні (рис. 6). Слід також зазначити суттєвий розкид абсолютних значень коерцитивної сили в приповерхневих шарах різних траків, що є відображенням структурного стану металу. Так, у межах партії траків 1–4 (2021): для металу траку № 1 абсолютні значення коерцитивної сили різних ділянок знаходились у межах 21,1...70,5 А/см; траку № 2 – 29,7...77,6 А/см; траку № 3 – 4,6...68,1 А/см; траку № 4 – 14,2...62,7 А/см.

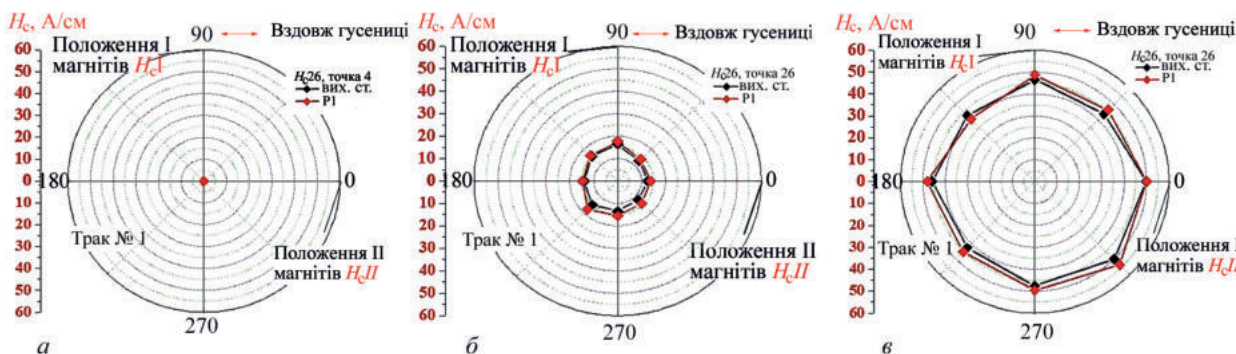


Рис. 8. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментальних траків 1–5 (2021) у вихідному стані та після випробувань: а – трак № 1 точка 4; б – трак № 2 точка 6; в – трак № 1 точка 26. Значення H_c у вихідному стані відображено чорним, а після навантаження – червоним кольором

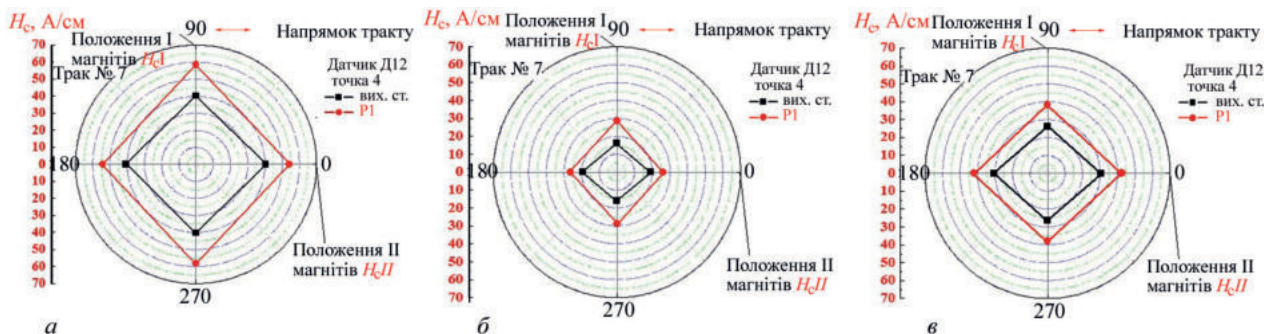


Рис. 9. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментального траку 7–8 (2020) у вихідному стані та після випробувань: а – точка 4; б – точка 9; в – точка 26. Значення H_c у вихідному стані відображено чорним, а після навантаження – червоним кольором

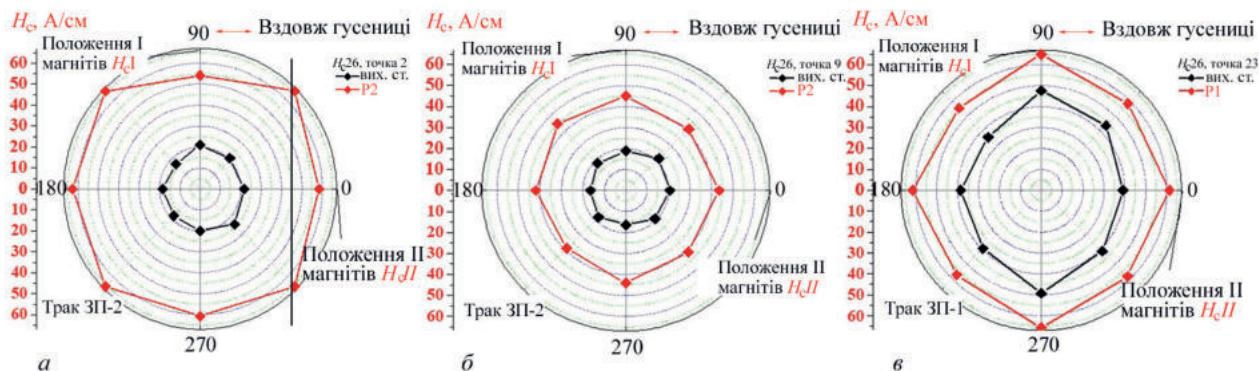


Рис. 10. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментальних траків ЗП-1 та ЗП-2 у вихідному стані та після випробувань: а – трак ЗП-2 точка 2; б – трак ЗП-2 точка 9; в – трак ЗП-2 точка 23. Значення H_c у вихідному стані відображено чорним, а після навантаження – червоним кольором

Випробування на 4-х точковий згин показали, що траки 1–4 (2021) витримали тільки 50 % нормованого навантаження, тобто метал мав дуже низький опір такому навантаженню. При цьому руйнування носило крихкий характер без ознак пластичного деформування (у тому числі наявності залишкового прогину (рис. 7)).

На відміну від досліджуваних траків 1–4 (2021) структурний стан експериментальних траків 1–5 (2021) (рис. 8) відрізняється наявністю зон з нульовими значеннями коерцитивної сили, що характерно для аустенітної структури. Для досліджуваних траків 1–5 (2021), як і для траків 1–4 (2021), характерною є відсутність підвищення значень коерцитивної сили при нормованих навантаженнях відносно вихідного стану, що свідчить про незмінність структурного стану металу при деформуванні. Крихкий характер руйнування підтверджує відсутність запасу пластичності металу. При цьому траки при навантаженні за схемами 1 і 3 (рис. 2, а, б) витримали нормоване навантаження. А при навантаженні за схемою 2 (рис. 2, б) трак витримав лише 17,7 т з 30 т нормованих.

На відміну від вищерозглянутих траків 1–5 (2021) і 1–4 (2021) на поверхні траків 7–8 (2020) виявили незначне підвищення значень коерцитивної сили при навантаженні та появу ознак пластичної деформації (лінії ковзання). При цьому траки витримали нормативні навантаження з певними величинами залишкового прогину у відповідних площинах навантаження. На рис. 9 наведено характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментальних траків 7–8 (2020) у вихідному стані та після випробувань на 4-х точковий згин.

Слід також зазначити розкид абсолютних значень коерцитивної сили, які у вихідному стані для експериментальних траків 7–8 (2020) знаходились у діапазоні 14,3...67,1 А/см. Але у найнавантажених точках траків після випробувань відбувалося підвищення значень коерцитивної сили, що дозволило оцінити ступінь пошкодження металу при деформуванні [5].

Для досліджуваних траків іншого виробника (траки ЗП-1 і ЗП-2) також характерною є наявність достатньо високих значень коерцитивної сили та їх нерівномірний розподіл у різних точках у вихідному стані (рис. 10). Для порівняння на рис. 10 показано також епюри коерцитивної сили після нормованих навантажень.

Структурний стан металу траків ЗП-1 і ЗП-2 у вихідному стані, оцінений величиною коерцитивної сили, приблизно відповідає тракам 1–5 (2021), 1–4 (2021) і 7–8 (2020). Але для металу траків

Таблиця 4. Показники Mn/C та P + 0,4C металу досліджуваних траків у порівнянні з оптимальними [1]

Показник	[1]	Еталон	1–4 (2021)	7–8 (2020)	1–5 (2021)	ЗП-1, ЗП-2
Mn/C	12...13	12,2	2,21	19,1	35,9	48,0
P+0,4C, %	≤0,5	0,471	0,566	0,334	0,195	0,164

ЗП-1 і ЗП-2 характерним є суттєве підвищення значень коерцитивної сили при нормованих навантаженнях відносно вихідного стану. При навантаженні на 4-х точковий згин мало місце суттєве деформування траків. Метал мав достатній запас пластичності для деформування, що призвело до перерозподілу напружень у найнавантаженишій зоні і підвищувало стійкість до руйнування. При навантаженні траків ЗП-1 і ЗП-2 за схемами 1 та 2 (рис. 2, а, б) пластичне деформування почалося при навантаженні 24,6 т, а руйнування – при 28,9 т.

Авторами [1] на основі системних досліджень запропоновано оптимальні показники співвідношення хімічних елементів для сталі 110Г13Л, а саме: $Mn/C \geq 10$ та $P + 0,4C \leq 0,5 \%$, де з ростом показника Mn/C спостерігається збільшення ударної в'язкості, а оптимальні значення Mn/C знаходяться в діапазоні 12...13. З ростом показника $P + 0,4C$ вище за значення 0,5 % зростає схильність сталі до тріщиноутворення.

Показники Mn/C та $P + 0,4C$ металу досліджуваних нами траків у порівнянні з оптимальними [1] відображено в табл. 4.

Таким чином, метал усіх досліджуваних експериментальних траків не відповідає вимогам щодо хімічному складу сталі 110Г13Л згідно з нормативними документами (табл. 3) та щодо оптимальних діапазонів показників Mn/C та $P + 0,4C$ (табл. 4), що знайшло відображення на епюрах коерцитивної сили експериментальних траків у вихідному стані.

Крім викладених вище можливостей застосування коерцитиметричного контролю для оцінки якості виробів з аустенітних сталей для визначення отриманих у процесі випробувань або експлуатації пошкоджень можна скористатись розробленим підходом [6, 7], згідно з яким при моніторингу структурного стану слід звертати увагу не на максимальні значення коерцитивної сили, а на кінетику процесу. У міру статичного або циклічного напруження залежність коерцитивної сили від накопичених пошкоджень має висхідні та низхідні ділянки. Ділянки зростання значень коерцитивної сили відповідає стадія зародження тріщин, а ділянки зниження їх значень – стадія розвитку тріщин внаслідок втрати суцільності металу при утворенні пор та тріщин.

Використання коерцитиметричного контролю дозволяє проводити оцінку якості металу у вихідному стані, а також рівня навантаженості та отриманих пошкоджень на кожній зі стадій у будь-якій точці виробів в умовах експлуатації шляхом вимірювання значень коерцитивної сили.

Висновки

Проведено діагностування неруйнівним методом контролю структурного стану (за вимірами коерцитивної сили) металу 13-и експериментальних гусеничних траків різних виробників у вихідному стані та після стандартних випробувань на 4-х точковий згин.

Структурний стан металу траків ЗП-1 та ЗП-2 у вихідному стані, оцінений за величиною коерцитивної сили, приблизно відповідає тракам 1–5 (2021), 1–4 (2021) та 7–8 (2020). Але для металу траків ЗП-1 та ЗП-2 характерним є суттєве підвищення значень коерцитивної сили при нормованих навантаженнях відносно вихідного стану. При навантаженні на 4-х точковий згин мало місце суттєве деформування траків. Метал мав достатній запас пластичності для деформування, що сприяло перерозподілу напружень у найнавантажнішій зоні та підвищувало стійкість до руйнування.

На відміну від еталонного трака різні ділянки експериментальних траків 1–4 (2021) та 1–5 (2021) у вихідному стані мали достатньо високі значення коерцитивної сили, що пов'язано з невідповідністю хімічного складу та термічної обробки нормованим вимогам. Метал названих траків мав знижену пластичність, що не сприяло перерозподілу максимальних напружень у найнавантажніших ділянках і призвело до крихкого руйнування після стандартних випробуваннях на 4-х точковий згин.

Слід також зазначити розкид абсолютних значень коерцитивної сили, які у вихідному стані для експериментальних траків 7–8 (2020) знаходились у діапазоні 14,3...67,1 А/см. Але у найнавантажніших точках траків після випробувань відбувалось підвищення значень коерцитивної сили, що дозволяє оцінити ступінь пошкодження металу при деформуванні [5].

Отримані експериментальні результати випробувань на 4-х точковий згин експериментальних гусеничних траків з аустенітної сталі типу Гадфільда з певними відхиленнями хімічного складу від регламентованого підтвердили можливість застосування неруйнівного коерцитиметричного контролю для оцінки початкового структурного стану та рівня навантаженості металу, який характеризує ступінь отриманих пошкоджень після навантаження, за результатами вимірювання коерцитивної сили.

Список літератури

1. Давыдов Н.Г. (1979) *Высокомарганцовистая сталь*. Москва, Металлургия.
2. Солнцев Ю.П., Андреев А.К., Гречин Р.И. (1991) *Литейные хладостойкие стали*. Москва, Металлургия.
3. Зимокос Г.Н., Адаменко Л.А., Иванова Л.Х. (2011) Влияние химического состава на свойства высокомарганцовистой стали в отливках броней конусных дробилок стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **4**, 140.
4. Шаров Н.В., Платонов А.В., Чумаков В.А. (2012) Изготовление и оценка качества отливок быстро изнашиваемых деталей из высокомарганцовистых сталей. *Горная промышленность*, **3**, 18–28.
5. Гопкало О.П., Земцов М.П., Гопкало О.Є. та ін. (2021) Діагностування пошкодженості гусеничних траків при механічному навантаженні за результатами вимірювання коерцитивної сили. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 11–17. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.03>
6. Гопкало О.П., Нехотящий В.О., Безлюдько Г.Я. та ін. (2019) Діагностування пошкодженості аустенітної сталі AISI 304 при механічному навантаженні по вимірах коерцитивної сили. *Там само*, **4**, 12–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2019.04.01>
7. Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiiy, V. et al. (2020) Damage evaluation for AISI 304 steel under cyclic loading based on coercive force measurements. *Int. J. Fatigue*, Vol. **139**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105752>

References

1. Davydov, N.G. (1979) *High-manganese steel*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Solntsev, Yu.P., Andreev, A.K., Grechin, R.I. (1991) *Cast cold-resistant steels*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Zimokos, G.N., Adamenko, L.A., Ivanova, L.Kh. (2011) Influence of chemical composition on the properties of high-manganese steel in armored steel castings of cone crushers. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **4**, 140 [in Russian].
4. Sharov, N.V., Platonov, A.V., Chumakov, V.A. (2012) Production and quality assessment of castings of rapidly-wearing parts from high-manganese steels. *Gornaya Promyshlennost*, **3**, 18–28 [in Russian].
5. Gopkalo, O.P., Zemtsov, M.P., Gopkalo, O.Ye., et al. (2021) Diagnosis of damage to caterpillar tracks under mechanical loading based on the results of measurement of the coercive force. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 17–26 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.03>
6. Gopkalo, O.P., Nekhotiashchiiy, V.O., Bezlyudko, G.Ya. et al. (2019) Giagnosis of damage in austenitic steel AISI 304 at mechanical loading by measurements of coercive force. *Ibid.*, **4**, 12–24 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2019.04.01>
7. Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiiy, V., Gopkalo, O.Ye., Kurash, Yu. (2020) Damage evaluation for AISI 304 steel under cyclic loading based on coercive force measurements. *Int. J. Fatigue*, Vol. **139**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105752>

EXPRESS EVALUATION OF THE QUALITY OF PRODUCING CATERPILLAR TRACKS BY THE RESULTS OF COERCIVE FORCE MEASUREMENT

O.P. Gopkalo¹, O.E. Gopkalo¹, M.P. Zemtsov¹, E.V. Kovalenko², V.E. Bodunov¹

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

²LLC «SPC Aviation Systems of Ukraine». 8 Redutna, 01015, Kyiv, Ukraine. E-mail: spc.asu.LTD@gmail.com

Coercimetric testing revealed essential differences in metal structure in the subsurface layer of experimental caterpillar tracks. Obtained experimental results of 4-point bend testing of experimental caterpillar tracks from steels which somewhat differ by their chemical composition, confirmed the possibility of application of nondestructive coercimetric testing for assessment of the initial structural state and level of loading of the metal, which characterizes the degree of sustained damage after loading. Metal of a sound track from steel of 110G13L type in the initial condition should have negative values of the coercive force that is ensured by its optimal structural state. This circumstance can provide substantiation for introducing coercimetric testing for express-evaluation of the quality of castings and their heat treatment. 7 Ref., 4 Tabl., 10 Fig.

Keywords: caterpillar tracks, structuroscope, coercive force, structural state

Надійшла до редакції 06.10.2022

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ КРИТИЧНО ПОТОНШЕНИХ ДІЛЯНОК ТЕПЛОПРОВОДУ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ РУЙНУВАННЯ

П.С. Юхимець¹, Р.І. Дмитрієнко¹, О.Л. Палієнко¹, В.М. Єгоренко²

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

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

Виконано порівняння результатів механічних випробувань металу труби в залежності від типу зразка, накопиченої залишкової деформації та методу їх визначення. Виконано порівняльну оцінку міцності теплопроводу за наявності критично потоншеної зони на основі критеріїв статичної та малоциклової міцності. Отримані результати засвідчили, що виявлена при проведенні механічних випробувань зміна характеристик міцності та пластичності критично потоншених ділянок сприяє підвищенню схильності до малоциклового руйнування теплопроводу при більших залишкових товщинах. При цьому задовільний результат періодичних гідравлічних випробувань не виключає можливості руйнування теплопроводу протягом наступного опалювального сезону внаслідок зростання пошкоджуваності металу критично потоншених ділянок при значних коливаннях робочого тиску. Надано пропозиції щодо визначення тиску гідравлічних випробувань теплопроводів. Бібліогр. 17, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: теплопровід, механічні властивості металу, малоциклова міцність, гідравлічні випробування

Вступ. Підземні трубопроводи системи теплопостачання зазнають впливу комплексу факторів, що є потенційною причиною їх відмов. Корозійні пошкодження є найпоширенішим видом ушкоджень трубопроводів київських теплових мереж, які виявляють, згідно з чинними нормами, гідравлічними випробуваннями (ГВ) підвищеним тиском ($P_{ГВ}$), що дорівнює 1,25 робочого тиску (P_p) [1–6].

Існують деякі розбіжності щодо впливу корозійного середовища, коливання температури, робочих навантажень і напружень на зміну з часом структури та властивостей експлуатованого металу трубопроводів у порівнянні з його вихідними характеристиками. Так, наприклад, згідно з [7] зміна механічних властивостей пов'язана з розвитком процесів окрихчування та проявляється, з одного боку, у зміні показників міцності (твердості $HВ$, границі міцності σ_r , границі плинності $\sigma_{0,2}$), з іншого – у зниженні показників в'язкопластичного стану (відносного подовження δ , відносного звуження ψ) та показників опору крихкому руйнуванню (KCU , KCV , критичного значення коефіцієнту інтенсивності напружень K_c). У той же час автори [8, 9] вважають, що стандартні механічні властивості (σ_r , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ)

практично не залежать від терміну експлуатації теплопроводу.

У зв'язку з цим вивчення впливу корозійних уражень на механічні властивості металу критично пошкоджених стінок теплопроводу сприятиме точнішим розрахункам його руйнівного тиску, залишкового ресурсу та дослідженню механізму їх руйнування. Критично пошкодженою в даній роботі вважається ділянка з потоншенням стінки внаслідок корозії, яка має характерну нерівну поверхню у вигляді поєднаних між собою невеликих поглиблень зі згладженими крайками, довжина та ширина якої сумірна з радіусом труби, а товщина стінки обумовлює появу пластичних деформацій при тиску, що не перевищує $P_{ГВ}$.

Мета роботи – на основі експериментального моделювання умов експлуатації дослідити механічні властивості конструкційного металу критично потоншених ділянок трубопроводу, особливості їх руйнування та надати рекомендації щодо тиску гідравлічних випробувань.

Методи випробувань. Дослідження виконувалися на зразках основного металу з тривало експлуатованої прямошовної електрозварної труби КП «Київтеплоенерго»: у вихідному стані, після напрацювання пошкодження протягом п'яти стадій малоциклового навантаження (перший етап)

Таблиця 1. Результати спектрального аналізу металу натурного зразка

Характеристика зразка	Масова частка елементів, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
ГОСТ 19281-89	0,14...0,20	0,4...0,6	1,0...1,4	≤0,040	≤0,035	≤0,30	≤0,30	≤0,30	–
Зразок труби	0.17	0.42	1.24	0.012	0.017	0.023	0.006	0.023	0.008

Юхимець П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-8824-9024>, Дмитрієнко Р.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8842-5051>

© П.С. Юхимець, Р.І. Дмитрієнко, О.Л. Палієнко, В.М. Єгоренко, 2022

Таблиця 2. Механічні властивості металу натурального зразка

Характеристика зразка	σ_y , МПа	$\sigma_y/\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
ГОСТ 19281-89	490	345/—	23,0	—
Зразок труби*	590	—/430	18,7	50,9

Примітка. *Усереднені результати випробувань на розтяг у кільцевому напрямку зразків 7×12 мм (див. далі «Механічні випробування»).

та створення локальних пластично деформованих ділянок (другий етап) натурального зразка (НЗ) на гідравлічному стенді ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (рис. 1).

Оскільки зміна механічних, як і корозійних, властивостей конструкційного матеріалу помітніша в пружно-пластичній області деформування [12, 13], під час першого етапу імітували напружений стан подавального/зворотного модельного трубопроводу (МТ) Д630 з початковою товщиною стінки $s = 1,42/0,36$ мм (перша стадія малоциклового навантаження), що забезпечувало досягнення в ньому напружень границі плинності $\sigma_y = 441,8$ МПа при $P_{ГВ} = 2/0,5$ МПа (тиск щорічних гідравлічних випробувань трубопроводу). Саме за цих напружень після зростання тиску до $P = 10$ МПа за допомогою тензодавачів у натурному зразку зафіксували появу залишкових деформацій e_r . Кожна з п'яти стадій першого етапу випробування натурального зразка імітувала експлуатаційне циклічне навантаження внутрішнім тиском подавальних/зворотних трубопроводів упродовж року: $N = 10$ – кількість циклів збільшення тиску P_{max} до значення робочого тиску $P_p = 1,6/0,4$ МПа і його зниження до $P_{min} = 0$; $N_{ГВ} = 1$ – кількість циклів щорічних гідравлічних випробувань: $P_{max} = P_{ГВ} = 2/0,5$ МПа, $P_{min} = 0$.

Після кожної стадії випробувань товщина стінки подавального МТ зменшувалася на значен-

ня умовної швидкості потоншення 0,05 мм/рік, яке відповідало середньому значенню швидкості корозії трубопроводів КП «Київтеплоенерго», і дискретно імітувало корозійне пошкодження впродовж року. Для нового значення товщини розраховували кільцеве напруження σ_θ подавального МТ та відповідну до нього величину тиску в натурному зразку (рис. 2). Умовна швидкість потоншення стінки зворотного МТ $\sim 0,12$ мм/рік обумовлювалася вже визначеним режимом навантаження натурального зразка (рис. 2). Це дало змогу моделювати напружено-деформований стан критично потоншених ділянок трубопроводу під час його експлуатації збільшенням тиску (напружень) в натурному зразку за незмінної товщини його стінки.

Другий етап випробувань натурального зразка – пластичне деформування за ступінчастого навантаження в діапазоні 11,6...13,25 МПа з інтервалом $\sim 0,25$ МПа (рис. 2) – імітував накопичення залишкової деформації на стоншених ділянках МТ безпосередньо перед руйнуванням, яке відбулося при тиску в натурному зразку $P_{max} = 13,25$ МПа (залишкова деформація за вимірами периметру труби $e_r \approx 2,7$ %).

Механічні властивості визначалися на основі статичних випробувань плоских та циліндричних зразків на одноосовий розтяг [14], а також вимірювань твердості за Брінеллем [15].

Для дослідження механічних властивостей труби у вихідному стані було використано пропорційні зразки трьох типів: плоский 5×12 мм (товщина × ширина робочої частини, мм) (рис. 3, а) з механічною обробкою обох поверхонь у напрямку товщини; плоский 7×12 мм (рис. 3, б), поверхні якого співпадали з зовнішньою та внутрішньою поверхнями труби; циліндричний (МІ-12) з діаме-

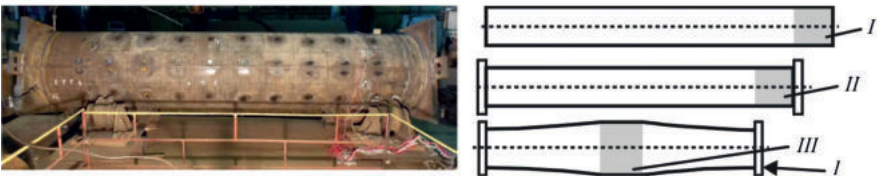


Рис. 1. Вигляд натурального зразка перед випробуванням на гідравлічному стенді (а) та його кільцеві зони для визначення механічних властивостей металу (б): I – у вихідному стані; II – після малоциклового навантаження; III – після ступінчастого пластичного навантаження, I – днище для герметизації труби

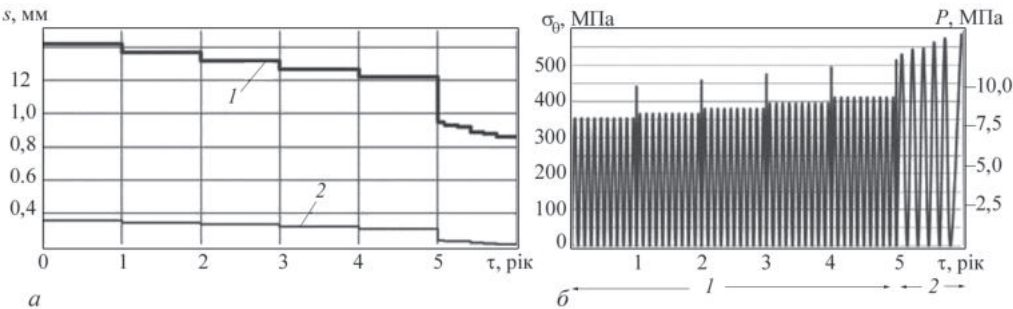


Рис. 2. Зміна товщини стінки s подавального (0,05 мм/рік) (1) та зворотного (0,012 мм/рік) МТ (2) (а), відповідні кільцеві напруження σ_θ й тиск P в натурному зразку протягом 1-го та 2-го етапів лабораторних випробувань (б)

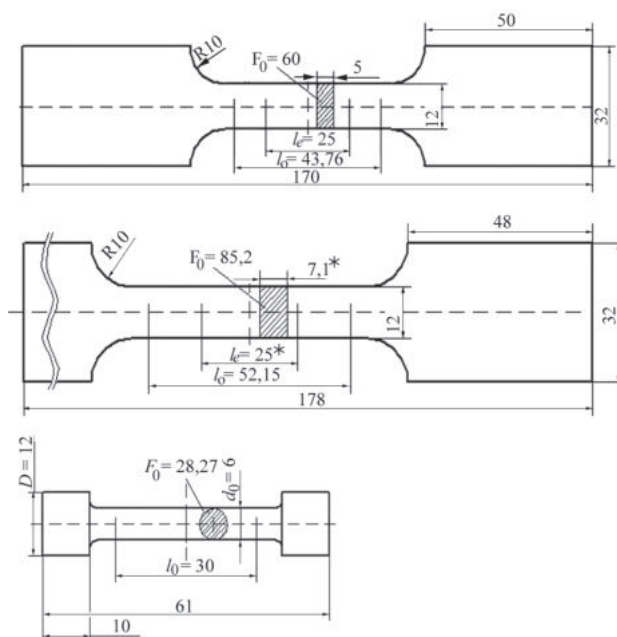


Рис. 3. Зразки для випробувань на розтяг: а – плоский з обробкою поверхонь (5×12 мм); б – плоский без обробки поверхонь (7×12 мм); в – циліндричний (МІ-12); l_0 – початкова розрахункова довжина відповідно до тензометра; l_0 – початкова розрахункова довжина; F_0 – початкова площа поперечного перерізу

трім робочої частини 6 мм (рис. 3, в). Зразки вирізалися з труби в кільцевому та поздовжньому напрямках. У більшості кільцевих зразків місця під захвати перед фрезуванням випрямлялися в пресі таким чином, щоб не деформувати робочу частину. Деякі з кільцевих зразків (5×12, 7×12 мм) підлягали випрямленню включно з робочою частиною (на рис. 4, 5 додатково позначені літерою б).

Механічні випробування виконували на універсальних розривних машинах INSTRON 8802 та MTS-318.25 зі швидкістю деформування 2 мм/хв при постійній температурі ~ 22 °С, початкова база екстензометра – 25 мм, інтервал опитування – 0,1 с. За результатами експериментальних випробувань для кожного зразка визначали характеристики механічних властивостей металу (σ_r , $\sigma_{0.2}$, δ_5 , ψ).

Для замірів твердості за Брінеллем використовували твердомір Shopper: діаметр кульки – 10 мм,

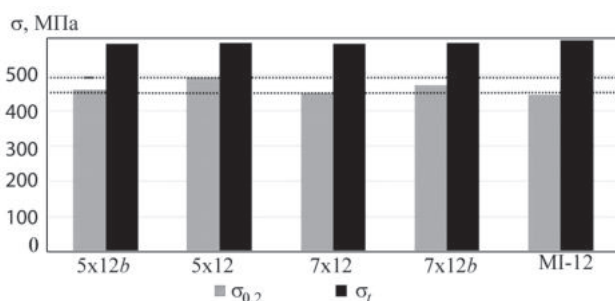


Рис. 4. Залежність характеристик міцності ($\sigma_{0.2}$ – межа пластичності умовна, σ_r – межа міцності) основного металу в кільцевому напрямку від типу зразка. Точковими лініями позначена полоса розкиду (10 %) значень $\sigma_{0.2}$

навантаження – 3000 кгс, витримка під навантаженням – 10 с. Виміри проводилися на шліфованих зразках матеріалу натурального зразка у вихідному стані та після пластичного деформування 0,9 та 3,6 % (рис. 1, б). На кожному зі зразків проводилося три виміри. Перерахунок значень твердості у відповідні значення механічних властивостей виконувався з використанням залежностей [16].

Для відстеження зміни локальної залишкової деформації на поверхні труби у вихідному стані було позначено сім кільцевих перерізів, вздовж периметру яких за допомогою керн на відстані 62 мм наносились рівномірно розподілені точки.

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз. Порівняння результатів механічних випробувань металу труби у вихідному стані в залежності від типу зразка засвідчило, що розкид значень $\sigma_{0.2}$ та σ_r у випадку кільцевих зразків становив 10 та 2 % (рис. 4), а у випадку поздовжніх зразків – 5 та 4 % відповідно. Розкид значень δ_5 та ψ у випадку кільцевих зразків становив 50 та 22 %, а у випадку поздовжніх зразків – 51 та 23 % відповідно (рис. 5). Найконсервативніші значення характеристик міцності та пластичності були отримані при випробуванні зразків 7×12 мм – без деформування та механічної обробки поверхонь робочої частини (рис. 3, б), тому для подальших випробувань використовувалися зразки саме цього типу.

Результати визначення механічних властивостей металу натурального зразка в залежності від накопиченої локальної пластичної деформації e_p , отримані при випробуванні на розтяг зразків типу 7×12 мм та на основі замірів твердості, які наведено на рис. 6, 7, свідчать, що накопичення залишкових деформацій під дією експлуатаційних навантажень трубопроводу призводить до зміни механічних властивостей металу його критично потоншених зон.

Як бачимо, характеристики механічних властивостей, отримані при випробуванні на розтяг зразків у кільцевому напрямку є нижчими, ніж у поз-

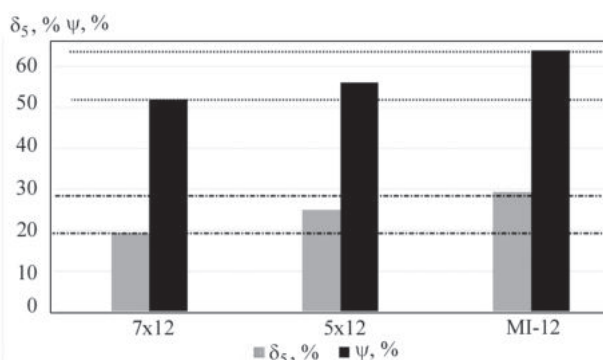


Рис. 5. Залежність характеристик пластичності основного металу (δ_5 – відносне подовження після розриву; ψ – відносне звуження після розриву) у поздовжньому напрямку від типу зразка. Штрих-пунктирними лініями позначено полоса розкиду значень δ_5 (51 %), точковими – ψ (23 %)

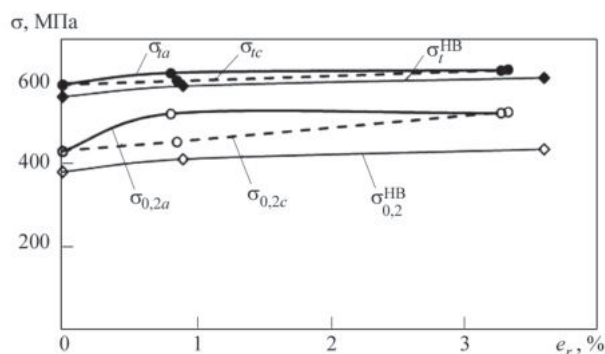


Рис. 6. Середні значення характеристик міцності металу в залежності від залишкової деформації та напрямку. Індексами позначено: *a* – повздовжній напрямок; *c* – кільцевий напрямок; НВ – за вимірами твердості

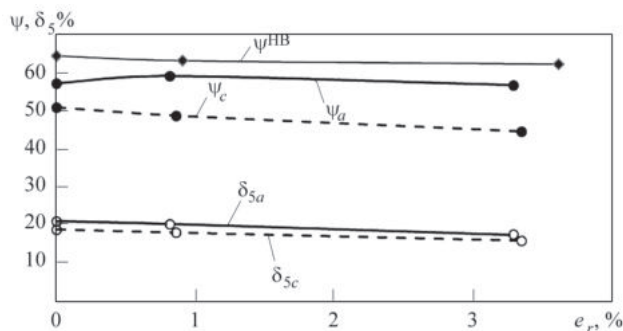


Рис. 7. Середні значення характеристик пластичності металу НЗ в залежності від залишкової деформації та напрямку. Індексами позначено: *a* – повздовжній напрямок; *c* – кільцевий напрямок; НВ – за вимірами твердості

довжніх зразків. Різниця між значеннями σ_{ic} та σ_{ia} , $\sigma_{0.2c}$ та $\sigma_{0.2a}$, δ_{5c} та δ_{5a} , ψ_c та ψ_a знаходиться в межах 0...3, 0...15, 9...13, 13...8 % відповідно. Зі зростанням залишкової пластичної деформації від 0 до 3,5 % відбувається збільшення характеристик міцності σ_{ic} та σ_{ia} на ~6 %; $\sigma_{0.2c}$ та $\sigma_{0.2a}$ – на ~22 %. При цьому характеристики пластичності в кільцевому напрямку δ_{5c} та ψ_c зменшуються на 16 та 13 %; а в повздовжньому напрямку δ_{5a} та ψ_a – на 15 та 1 % відповідно. Відзначимо, що зміна механічних характеристик металу труби в кільцевому напрямку спричиняє найвагоміший вплив на її міцність.

Характеристики механічних властивостей, визначені на основі вимірів твердості, демонструють у залежності від локальної пластичної деформації такі самі тенденції, що й відповідні результати випробувань на розтяг. Розраховані значення напружень σ_t^{HB} та $\sigma_{0.2}^{HB}$ є нижчими за характеристики міцності σ_{ic} та $\sigma_{0.2c}$ на 3...6 та 10...18 %, а σ_{ia} та $\sigma_{0.2a}$ – на 3...6 та 12...22 % відповідно. Відносне звуження ψ^{HB} перевищує аналогічні характеристики відносного звуження зразків у кільцевому ψ_c та осьовому ψ_a напрямках на 27...40 та 7...13 % відповідно.

Експлуатація подавальних/зворотних трубопроводів теплових мереж здійснюється при порівняно низьких номінальних напруженнях $\sim 0,2\sigma_{0.2}/0,1\sigma_{0.2}$. Внаслідок цього пружна робота стінки трубопро-

воду забезпечується протягом тривалого періоду за умов потоншення стінки ділянок трубопроводу внаслідок внутрішньої корозії. Міцність трубопроводу при одноразовому навантаженні внутрішнім тиском визначається у зазначених випадках, як правило, мінімальним значенням товщини стінки.

Вплив змінного внутрішнього тиску в процесі експлуатації теплопроводів створює передумови малоциклового руйнування металу критично потоншених зон при їх пружнопластичному деформуванні. Граничний стан за ознакою малоциклового руйнування (1) пов'язаний з двома основними типами ушкодження – квазістатичним та втомним, що досягається переважно внаслідок одностороннього накопичення деформацій, які дорівнюють деформаціям при статичному розриві, або без вираженого накопичення односторонніх деформацій відповідно до [17]:

$$d_f + d_s = \int_1^{N_f} \frac{dN_i}{dN_{fi}} + \int_0^{e_f} \frac{de_r}{e_f} = 1 \quad (1)$$

де d_f і d_s – доля втомного та квазістатичного пошкодження відповідно; N_i – кількість циклів *i*-го режиму навантаження; N_{fi} – допустима кількість циклів *i*-го режиму навантаження; e_f – наявна пластичність.

Унаслідок низької концентрації напружень на поверхні критично потоншених ділянок трубопроводу при циклічному навантаженні стиснення деформацій відсутнє, характер зміни напружень і деформацій можна прийняти відповідними м'якому навантаженню (постійна амплітуда напружень). У цьому випадку для наближеної оцінки циклічної міцності використовується рівняння:

$$\sigma_{\max i} N_{fi}^{0,08} = \sigma_t N_t^{0,08} \quad (2)$$

де $\sigma_{\max i}$ – максимальне напруження в циклі навантаження *i*-го режиму; приймається $N_t = 10$.

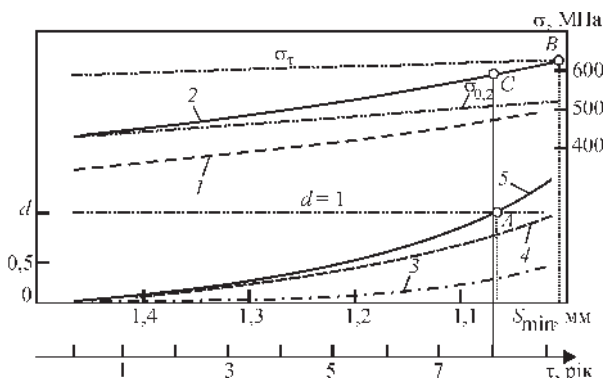


Рис. 8. Міцність подавального трубопроводу при одноразовому та малоцикловому навантаженні у залежності від товщини критично потоншеної ділянки $s_{\min}$ та тривалості корозійного процесу τ на критично потоншеній ділянці: 1 – максимальне робоче напруження $\sigma_{\max}$ ($P = 1,6$ МПа); 2 – максимальне напруження $\sigma_{\max}$ під час ГВ ($P = 2$ МПа); 3 – частка втомної пошкоджуваності d_f ; 4 – частка квазістатичної пошкоджуваності d_s ; 5 – сумарна пошкоджуваність при циклічному навантаженні d

На рис. 8 представлено результати оцінки міцності подавального трубопроводу за наявності критично потоншеної зони з використанням рівнянь (1, 2).

При розрахунку квазістатичного пошкодження d_s в якості наявної пластичності e_f використовувалося значення рівномірної пластичної деформації e_p , зниження якої, як і збільшення величини накопиченої залишкової деформації e_r , приймалося пропорційним максимальному напруженню $\sigma_{\max}$ в зоні критичного потоншення при проведенні гідрравлічних випробувань.

Часовий інтервал зростання напружень під час періодичних гідрравлічних випробувань ($P_{\text{ГВ}} = 2$ МПа) на критично потоншених ділянках від $\sigma_{0,2} = 430$ МПа (поява пластичних деформацій згідно з механічними випробуваннями) до σ_f (критерій статичної міцності) при середньому значенні швидкості корозії 0,05 мм/рік становить близько 9 років, що сумарно відповідає $N \sim 100$ (цикл $P_{\min} = 0$, $P_{\max} = 1,6$ МПа), і $N_{\text{ГВ}} \sim 10$ (цикл $P_{\min} = 0$, $P_{\max} = 2$ МПа).

Як бачимо, частка квазістатичного пошкодження d_s істотно (в три і більше разів залежно від товщини $s_{\min}$) перевищує втомну пошкоджуваність d_f . Втомна складова пошкоджуваності при м'якому навантаженні залежить (2) від межі міцності σ_f (зростання $\sigma_{0,2}$ забезпечує пружне деформування металу при $P_p = 1,6$ МПа до руйнування (рис. 8, крива 1)), а квазістатична – від наявної пластичності e_f . Тому виявлені при проведенні механічних випробувань зміни характеристик міцності (σ_f) і пластичності (ψ , δ_s) сприятимуть зниженню частки втомної і збільшенню частки квазістатичної пошкоджуваності. Оскільки зміна пластичних властивостей металу є суттєвішою, а частка квазістатичної пошкоджуваності d_s – значнішою, зазначені зміни механічних властивостей сприятимуть зміщенню кривої сумарної пошкоджуваності (5 на рис. 8) в область більших товщин. Згідно з отриманими даними досягнення руйнування за критерієм малоциклової міцності випереджає в часі руйнування трубопроводу при одноразовому навантаженні (рис. 8, точки А та В), що може бути однією з причин низького виявлення критично потоншених ділянок під час гідрравлічних випробувань, оскільки їх задовільний результат не виключає можливості руйнування протягом наступного опалювального сезону (рис. 8, точки А та С) внаслідок зростання сумарної пошкоджуваності d при значних коливаннях робочого тиску.

Видається, що можливим рішенням відновлення ефективності періодичних гідрравлічних випробувань (виявлення та усунення основної кількості дефектів в міжопалювальний період) є виключення критично потоншених ділянок з експлуатації за рахунок збільшення тиску гідрравлічних випробувань. Так, для досягнення цієї мети в наведено-

му вище прикладі тиск гідрравлічних випробувань треба було б встановити на рівні $1,7P_p$. Підняття $P_{\text{ГВ}}$ до проміжних значень ($<1,7P_p$) імовірно зменшить загальну кількість наявних ділянок і, відповідно, відмов в опалювальний період, але продовжить непрогнозовані руйнування за критерієм малоциклової міцності на ділянках, що залишилися, у прискореному режимі. Вочевидь, призначення підвищеного тиску гідрравлічних випробувань необхідно здійснювати диференційовано, у залежності від типорозміру трубопроводу, дійсних механічних властивостей конструкційного матеріалу, що можуть у цьому випадку визначатися за результатами вимірів твердості, та на основі моніторингу загального технічного стану. Обґрунтування пропонованого підходу можна було б здійснити на основі порівняльного аналізу результатів гідрравлічних випробувань подавальних ($P_{\text{ГВ}}/P_p = 1,25$) та зворотних ($P_{\text{ГВ}}/P_p \approx 2 \dots 3$) трубопроводів, а також їх відмов в опалювальний період.

Висновки

Найконсервативніші значення характеристик міцності та пластичності отримано при випробуванні зразків без деформування робочої частини та механічної обробки зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби.

Механічні властивості металу труби з залишковою деформацією 0...3,5 %, визначені в кільцевому напрямку, є нижчими, ніж у поздовжньому: границя міцності – на 0...3 %, умовна границя плинності – на 0...15 %, відносне подовження – на 9...13 %, відносне звуження – на 13...28 %.

Накопичення пластичної деформації в діапазоні 0...3,5 % призводить до наближено лінійної зміни механічних властивостей металу його критично потоншених зон у кільцевому напрямку: збільшення границі міцності – на ~ 6 % та умовної границі плинності – на ~ 22 %; зменшення відносного подовження та звуження – на 16 та 13 %, відповідно.

Тенденції зміни механічних властивостей, розрахованих за вимірами твердості, у залежності від пластичної деформації 0...3,5 %, такі самі, як у випадку випробувань на розтяг. Розраховані показники є нижчими у випадку границі міцності на 3...6 %, умовної границі плинності – на 10...18 % та вищими у випадку відносного звуження на 27...40 %, ніж відповідні випробувальні значення у кільцевому напрямку.

Виявлені при проведенні механічних випробувань зміни механічних властивостей критично потоншених ділянок сприяють підвищенню схильності до малоциклового руйнування теплопроводу при більших залишкових товщинах.

Задовільний результат гідрравлічних випробувань не виключає можливості руйнування теплопроводу протягом наступного опалювального

сезону внаслідок зростання малоциклової пошкоджуваності металу критично потоншених ділянок при значних коливаннях робочого тиску.

Надано пропозиції щодо визначення тиску гідравлічних випробувань теплопроводів.

Список літератури

- (2003) ГКД 34.20.507 *Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила.*
- (1994) ГКД 34.20.504 *Теплові мережі. Інструкція з експлуатації.*
- (2007) Наказ МінПЕ № 71 *Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж.*
- (1998) ДНАОП 0.00-1.11 *Правила побудови і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води.*
- (2017) Інструкція Київенерго № 29 *Проведення випробувань теплових мереж на гідравлічну щільність.*
- Дмитрієнко Р.І., Юхимець П.С., Тороп В.М. та ін. (2020) Пошкоджуваність та ефективність проведення гідравлічних випробувань теплових мереж міста Києва. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 37–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.04>
- Стеклов О.І. (1998) Мониторинг и прогноз ресурса сварных конструкций с учетом их старения и коррозии. *Сб. трудов междунар. конф. «Сварка и родственные технологии – в XXI век»*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс.99–109.
- Плешивцев В.Г., Пак Ю.А., Филиппов Г.А. (2008) Факторы, снижающие конструктивную прочность металла труб, и перспективы создания новых трубных сталей для тепловых сетей. 3-я научно-практическая конференция «Тепловые сети. Современные практические решения». www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2076
- Плешивцев В.Г., Филиппов Г.А., Пак Ю.А., Ливанова О.В. (2009) Влияние содержания углерода и напряженного состояния на скорость коррозии трубной стали в тепловых сетях. *Металлург*, 8, 22–25.
- (1991) ГОСТ 10704-91 *Трубы стальные электросварные прямые. Сортамент.*
- Юхимець П.С., Ниркова Л.І., Гопкало О.П. та ін. (2022) Особливості корозії трубопроводів теплових мереж зі сталі 17Г1С. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 1, 35–40.
- (1989) ГОСТ 19281-89 *Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия.*
- Гарбер К.Э. (2008) Влияние напряжений на развитие коррозионных процессов в трубопроводах металлургического предприятия. ОАО «Системэнерго». <http://www.energosovet.ru/stat463.html>
- (2009) ISO 6892-1 *Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature.*
- (2014) ISO 6506 *Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method.*
- (2015) СОУ НАЕК 087:2015 *Методика визначення механічних властивостей металу за випробуваннями на твердість.*
- Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. (1985) *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность.* Москва, Машиностроение.

References

- (2003) GKD 34.20.507. *Technical operation of power plants and networks. Rules* [in Ukrainian].
- (1994) GKD 34.20.504. *Heating networks. Operating manual* [in Ukrainian].
- (2007) Ministry of Fuel and Energy, order No. 71. *Rules for the technical operation of heating equipment and networks* [in Ukrainian].
- (1998) DNaOP 0.00-1.11. *Rules for the construction and safe operation of steam and hot water pipelines* [in Ukrainian].
- (2017) Kyivenergo instruction No. 29. *Testing of heat networks for hydraulic leak tightness* [in Ukrainian].
- Dmytrienko, R.I., Yukhymets, P.S., Torop, V.M., Kysil, I.N., Yehorenko, V.N. (2020) Damageability and effectiveness of conducting hydraulic testing of heating systems of Kyiv city. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 1, 37–44 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.04>.
- Steklov, O.I. (1998) Monitoring and prediction of the service life of welded structures taking into account their aging and corrosion. In: *Proc. of Int. Conf. on Welding and Related Technologies for 21st century* (Kyiv, Ukraine, 24-27 November, 1998), *PWT*, 99–109.
- Pleshivtsev, V.G., Pak, Yu.A., Filippov, G.A. (2008) Factors that reduce the structural strength of pipe metal and the prospects for creating new pipe steels for heating networks. In: *Proc. of 3rd Sci.-Pract. Conf. on Heat Networks. Modern Practical Solutions*. www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2076
- Pleshivtsev, V.G., Filippov, G.A., Pak, Yu.A., Livanova, O.V. (2009) Influence of carbon content and stress state on the corrosion rate of pipe steel in heat networks. *Metallurg*, 8, 22–25 [in Russian].
- (1991) GOST 10704 *Longitudinally welded steel pipes. Grades* [in Russian].
- (1989) GOST 19281 *High-strength rolled steel. General specifications* [in Russian].
- Yukhymets, P.S., Nyrkova, L.I., Gopkalo, O.P., Dmytrienko, R.I., Lytvynenko, A.Ye., Palienko, O.L. (2022) Features of corrosion of heat pipelines made of steel 17G1S. *Fiz.-Chimich. Mekhanika Materialiv*, 1, 35–40 [in Ukrainian].
- Garber, K.E. (2008) *Influence of stresses on the development of corrosion processes in pipelines of Sistemenergo Ltd. Metallurgical Enterprise* [in Russian]. <http://www.energosovet.ru/stat463.html>
- (2009) ISO 6892-1 *Tensile testing – Pt. 1: Method of test at room temperature.*
- (2014) ISO 6506 *Metallic materials – Brinell hardness test – Pt. 1: Test method.*
- (2015) SOU NAEK 087:2015. *Method of determination of metal mechanical properties by hardness measurement* [in Ukrainian].
- Kogaev, V.P., Makhutov, N.A., Gusenkov, A.P. (1985) *Calculations of machine parts and structures for strength and durability.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

MECHANICAL PROPERTIES OF METAL OF CRITICALLY THINNED SECTIONS OF HEAT PIPELINES AND FEATURES OF THEIR DESTRUCTION

P.S. Yukhymets¹, R.I. Dmytrienko¹, O.L. Palienko¹, V.M. Yehorenko²

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

E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

²JV «Kyivteploenergo». 5, Ivan Franko sq., 01001, Kyiv, Ukraine. E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

A comparison of mechanical test results of a pipe metal was conducted depending on the type of sample, the accumulated residual strain and the method of its determination. A comparative assessment of heat pipe strength in the presence of a critically thinned area was performed based on the criteria of static and low-cycle strength. The obtained results proved that changes in the properties of strength and plasticity characteristics of critically thinned areas revealed during mechanical testing contribute to an increase in the probability of low-cycle destruction of the heat pipeline with larger residual thickness. Satisfactory result of periodic hydraulic tests does not exclude the possibility of heat pipeline destruction during the next heating season due to the increase in metal damage of critically thinned areas caused by significant fluctuations of operating pressure. Proposals are provided for determination of hydraulic test pressure of heat pipelines. 17 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Keywords: heat pipeline, metal mechanical properties, low-cycle strength, hydraulic test

Надійшла до редакції 26.08.2022

STUDY OF DEFORMATION BEHAVIOR OF AISI 1025 CARBON STEEL WITH DIFFERENT MICROSTRUCTURES USING METAL MAGNETIC MEMORY AND ACOUSTIC EMISSION TESTING

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ AISI 1025 З РІЗНОЮ МІКРОСТРУКТУРОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАГНІТНОЇ ПАМ'ЯТІ МЕТАЛУ ТА АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

by W. Sharatchandra Singh* and C.K. Mukhopadhyay†

* Non Destructive Evaluation Division (NDED), Indira Gandhi Centre for Atomic Research (IGCAR), Kalpakkam 603102, Tamil Nadu, India

† Formerly with NDED, IGCAR, Kalpakkam 603102, Tamil Nadu, India.
E-mail:ckm602003@gmail.com

Studies are carried out to investigate the tensile deformation behavior of AISI-type 1025 carbon steel with different microstructures using metal magnetic memory and acoustic emission testing (AE) techniques. Seven AISI 1025 carbon steel specimens were heat treated for different microstructures and then subjected to tensile deformation until fracture. AE was conducted during tensile deformation and the deformation-induced self-magnetic leakage fields (SMLFs) were measured using a giant magneto-resistive sensor after unloading. Results reveal that SMLF signal values are influenced by microstructure and residual stress aroused due to plastic deformation. Among different specimens, SMLF signal peak amplitude is highest in the brine-quenched specimen followed by the tempered specimen, while hardness is highest in the brine-quenched specimen. SMLF signal peak amplitude and hardness are the lowest in the annealed specimen. SMLF signal is higher in tempered specimens compared to the untempered specimens. From AE measurements, it is observed that martensitic steel emits higher acoustic emissions during deformation but decreases when tempered. The acoustic emissions generated in the martensitic steel are also of higher amplitude. The results are correlated with optical micrographs and hardness measurements.

Проведено дослідження з вивчення деформації розтягу вуглецевої сталі AISI типу 1025 з різною мікроструктурою з використанням методів магнітної пам'яті металу та акустичної емісії (АЕ). Сім зразків з вуглецевої сталі AISI 1025 було термічно оброблено для отримання різних мікроструктур, а потім піддано деформації розтягу до руйнування. АЕ проводили під час деформації розтягу, а викликані деформацією власні магнітні поля витoku (SMLF) вимірювали за допомогою датчика на основі гігантської магніторезистивної технології (GMR) після розвантаження. Результати показують, що на значення сигналу SMLF впливають мікроструктура та залишкове напруження, що виникає внаслідок пластичної деформації. Серед різних зразків пік амплітуди сигналу SMLF є найвищим у зразку, що загартований в соляному розчині, наступним за яким є зразок з відпуском, тоді як твердість є найвищою у зразку, загартованому в соляному розчині. Пікова амплітуда сигналу SMLF і твердість є найнижчими у відпаленому зразку. Вимірювання АЕ показали, що мартенситна сталь випромінює більшу акустичну емісію під час деформації, але зменшується під час відпуску. Акустична емісія, що виникає в мартенситній сталі, також має вищу амплітуду. Результати корелюють з оптичними мікрофотографіями та вимірюваннями твердості.

Keywords: metal magnetic memory, acoustic emission, microstructure, carbon steel, tensile deformation

Ключові слова: магнітна пам'ять металу, акустична емісія, мікроструктура, вуглецева сталь, деформація розтягу

Introduction

Ferromagnetic materials are widely used in metallic structures such as boilers, pipelines, and railway tracks. Among ferromagnetic materials, carbon steel is commonly used in view of its low cost and good mechanical properties (Vivekananda and Venkataraman 2006; Tang et al. 2019). These structures are constantly subjected to mechanical actions during service that can induce stress, leading to the development of cracks or even fractures that cause severe damage (Bao et al. 2015). Therefore, ongoing nondestructive evaluation (NDE) of the mechanical properties of these structures is of great importance for

evaluating the state of structures in service before catastrophic failure.

Various NDE methods and techniques, such as ultrasonic testing, acoustic emission testing (AE), magnetic Barkhausen noise, and metal magnetic memory (MMM), have been used to evaluate the mechanical properties of ferromagnetic materials (Byeon and Kwun 2003; Song-ling et al. 2004). Among these, the MMM technique has gained considerable interest among nondestructive testing (NDT) researchers, because of its potential for the evaluation of early damage, micro-defects, and the stress state in ferromagnetic materials (Leng et al. 2013; Min et al. 2014; Xing et

al. 2006). This technique is found to be used in various NDT applications for diagnosing oil and gas pipelines, rails, turbine wheels, pressure vessels, and the like (Wang et al. 2012; Doubov 2001). The MMM technique relies on the measurement of the self-magnetic leakage field (SMLF) of ferromagnetic materials under the combined operation of external load and ambient geomagnetic field. In this technique, the distribution of SMLF induced at the stress-concentration zone (SCZ) during mechanical loading is measured using magnetic field sensors (Doubov 2001).

There are many factors affecting the strength of the SMLF signal such as the environmental magnetic field, stress distribution, and nature of material (Hu et al. 2010; Moonesan and Kashefi 2018; Bao and Zhang 2015; Sonntag et al. 2014; Singh et al. 2016). Moonesan and Kashefi (2018) studied the effect of sample initial magnetic field on SMLF signals and reported that SMLF signals exhibit a drop at the SCZ when the sample has a high level of initial residual magnetic field. Bao and Zhang (2015) analyzed the effect of loading speed on SMLF signals of C45 and Q235 ferromagnetic steels subjected to tensile stress. They observed that the variations of SMLF signals due to different loading speeds change systematically as the applied load increases. Sonntag et al. (2014) studied the change in the surface topography of a notched structural steel (S235JR) specimen due to tensile deformation using an optical 3D surface interferometer and its deformation-induced SMLFs using giant magneto-resistive (GMR) sensors. They reported that the measured SMLF is the result of the combined effect of stress and topography changes due to plastic deformation, and their separation is difficult to perform experimentally. Singh et al. (2016) studied the effect of geometry changes on SMLF signals in notched steel specimens during tensile deformation using finite element modeling. Their results indicated that the stress-induced geometry has a great influence on SMLF signals of about 20%, especially in the plastic deformation stage. Other studies (Liu et al. 2019; Long et al. 2014) also reported on the influence of microstructure on SMLF signals. Liu et al. (2019) discussed the grain size effect on SMLF signals for stress damage evaluation of low-carbon steel and concluded that the slope of the SMLF gradient decreases slightly as the grain size increases. Long et al. (2014) showed the potential of the MMM technique for revealing the tempering effect due to tensile deformation in C45 steel. However, information on the influence of microstructure on SMLF signals for heat-treated carbon steel is scarce in the literature.

On the other hand, acoustic emission is defined as the class of phenomenon whereby transient elastic waves are generated by the rapid release of ener-

gy from localized sources in a material (ASNT 2005). Wadley and Scruby (1991) investigated the acoustic emissions generated during tensile deformation of low-alloy steels with carbon content varying between 0.06 and 0.49 wt% and as a function of cooling rate. It was reported that specimens with (a) slowly cooled microstructures (with $\geq 10 \mu\text{m}$ ferrite dimension), (b) low initial dislocation density, and (c) very widely spaced precipitates, generate the highest acoustic emission activity. This was attributed to higher glide distance and higher velocity of dislocations in the ferrite phase (Wadley and Scruby 1991). Carpenter and Pfleiderer (1994) reported that the magnitude of root mean square (RMS) peak voltage at the yield stress region increases with increasing yield strength in AISI 4340 steel, tempered at different conditions. This was attributed to the increase in difficulty in initiating and propagating Lüders bands with increasing strength level (Carpenter and Pfleiderer 1994). Khamedi et al. (2010) studied the effect of the volume fraction of martensite on AE behavior of dual-phase steel (DPS) under tensile loading. AE dominant frequency was used to find different failure modes such as ferrite–martensite interface decohesion or martensite phase fracture. Haneef et al. (2010) studied the effect of heat treatment on Lüders band formation in medium carbon steel using AE. The decrease in acoustic emission activity in tempered specimens compared to water-quenched specimens was observed due to the decrease in dislocation activity. Monitoring of the deformation and fracture process of ferritic–martensitic DPS by employing AE was carried out by Fallahi et al. (2012). The DPS had different volume fractions of martensite (12%–73%) and various morphologies like equiaxed or fibrous martensite phase produced from low-carbon steel (0.1% C). The results show the usefulness of AE to detect failure micromechanisms consisting of ferrite–martensite interface decohesion and/or martensite phase fracture, and identifying the correlation of failure mechanisms to microstructure in DPS (Fallahi et al. 2012).

This paper presents studies carried out to investigate the tensile deformation behavior of AISI-type 1025 carbon steel with different microstructures using MMM and AE techniques. The effect of tempering on SMLF signals was studied. AE measurements were carried out during tensile deformation, while SMLF was measured after unloading the specimens. The results are correlated with optical micrographs and hardness measurements.

The next section of this paper presents the details of the material and tensile specimen including different heat treatment and corresponding microstructures. Next, the experimental setup of MMM and AE testing is described. The experimental results of tensile, MMM, and AE for different heat-treated specimens are presented

and discussed in the results and discussion section. Lastly, the conclusions drawn from the study are given.

Material and Heat Treatment

The material used in this study is an AISI-type 1025 carbon steel whose chemical composition (wt%) is given in Table 1. The tensile specimens (length of 200 mm, width of 20 mm, and thickness of 4 mm) were fabricated from the sheet material according to the specification given in the ASTM standard (2009). The dimensions of the specimens are shown in Figure 1.

The specimens were given different heat treatments (as per Table 2) to modify the microstructure and, hence, tensile properties. The microstructure of different specimens is shown in Figure 2, with a 500 $\times$ microscope amplification. The microstructure of the untreated specimen contains medium-size grains of ferrite (white region) as a major constituent and a small amount of pearlite (black region in Figure 2a). The microstructure of the normalized specimen contains ferrite, pearlite, and a small amount of martensite (Figure 2b). The microstructure of the annealed specimen shows coarse grains of ferrite as a major constituent and a small amount of pearlite (Figure 2c). During annealing, the specimen undergoes a slow cooling, resulting in coarse grains. The microstructure of the brine-quenched specimen is mostly martensitic and some retained austenite (Figure 2d). The brine-quenched and tempered specimen

has a more refined and homogeneous microstructure with martensite as a major constituent (Figure 2e). The microstructure of the oil-quenched specimen shows martensite as a major constituent and a small amount of retained austenite (Figure 2f). The microstructure of the oil-quenched and tempered specimen has a more refined and homogeneous microstructure with martensite as a major constituent and a small amount of retained austenite (Figure 2g).

After the heat treatment, the specimens were ground and polished to remove any rust or dirt left on the surface. Tensile tests of all the specimens were carried out using a standard tensile testing machine with a crosshead speed of 1 mm/min at ambient temperature. The specimens were subjected to tensile deformation until fracture. A photograph of the fractured specimens is shown in Figure 3a. AE measurements were carried out during tensile deformation while the deformation-induced SMLFs were measured using a GMR sensor along the dotted line AB (shown in Figure 3b) after unloading and dismantling the specimens from the tensile testing machine.

Experimental Setup

In this section, the experimental setup of MMM and AE testing is described.

MMM Testing Setup

The experimental setup for MMM testing is shown in Figure 4. It consists of an in-house developed servo motor-based XY scanning system, GMR sensor tensile specimen, and computer. The scanning system consists of a servo motor and encoders to ensure smooth scanning with the position and speed feedback. The specimens were scanned with a GMR sensor along their centerline for detection of the tangential component of the SMLF from the fractured specimens. The scan step size and scanning speed were set to 10 μ m and 20 mm/s, respectively. To avoid physical damage to the sensor, a liftoff

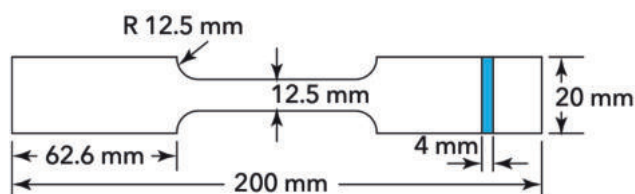


Figure 1. Dimensions of the tensile test specimen

Рис. 1. Розміри зразка для випробувань на розтяг

Table 1. Chemical composition (wt%) of AISI 1025 carbon steel used in study

Таблиця 1. Хімічний склад (мас.%) вуглецевої сталі AISI 1025, використаної в дослідженні

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Fe
wt%	0.208	0.159	0.77	0.007	0.015	0.06	0.01	0.038	0.003	0.013	<0.003	0.002	<0.002	0.050	Bal.

Table 2. Details of heat treatment of AISI 1025 carbon steel tensile specimen

Таблиця 2. Дані термічної обробки зразка на розтяг з вуглецевої сталі AISI 1025

Specimen number	Heat treatment	Temperature (°C)	Hold time (min)	Quenching medium	Microstructure	Ranges of peak amplitude (dB)
S1	Untreated	–	–	–	Ferrite + pearlite	40–62
S2	Normalized	910	60	Air cooling	Ferrite + pearlite + martensite	40–68
S3	Annealed	910	60	Furnace cooling	Ferrite + pearlite	40–74
S4	Brine quenched	910	60	25% brine solution	Martensite + austenite	40–82
S5	Brine quenched and tempered	910 400	60 120	25% brine solution, furnace cooling	Martensite + austenite	40–82
S6	Oil quenched	910	60	Engine oil	Martensite + austenite	40–76
S7	Oil quenched and tempered	910 400	60 120	Engine oil, furnace cooling	Martensite + austenite	40–72

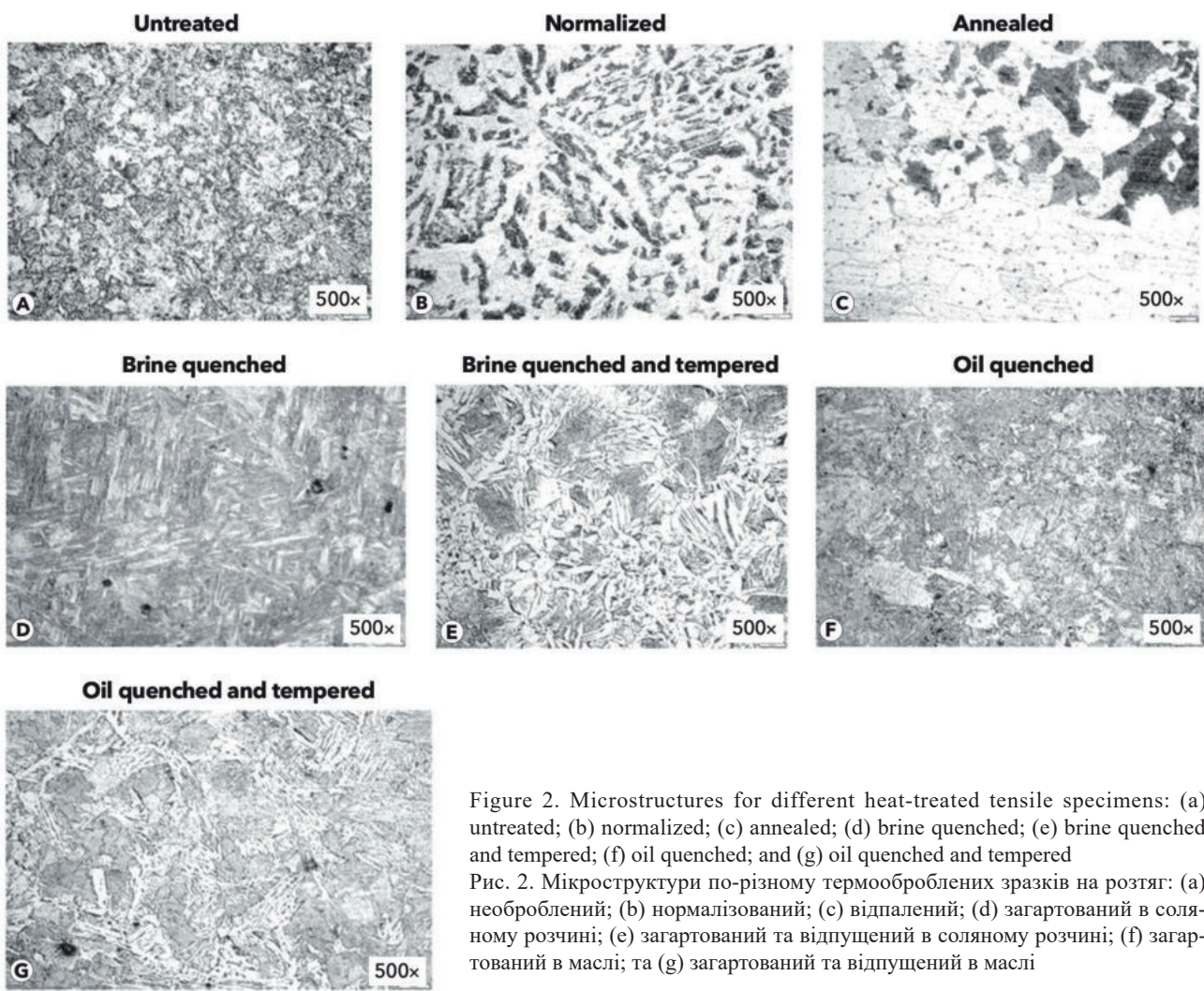


Figure 2. Microstructures for different heat-treated tensile specimens: (a) untreated; (b) normalized; (c) annealed; (d) brine quenched; (e) brine quenched and tempered; (f) oil quenched; and (g) oil quenched and tempered
Рис. 2. Мікроструктури по-різному термооброблених зразків на розтяг: (a) необроблений; (b) нормалізований; (c) відпалений; (d) загартований в соляному розчині; (e) загартований та відпущений в соляному розчині; (f) загартований в маслі; та (g) загартований та відпущений в маслі

of 1 mm was maintained between the GMR sensor and specimen surface. The GMR sensor output data was preamplified and then acquired through an analog-to-digital converter (ADC) card of 16-bit resolution and sampling frequency of 3.5 MS/s. The data was stored in a computer in a spreadsheet for subsequent analysis after voltage to magnetic field conversion (GMR output of 1 V corresponds to 3061 A/m). Data acquisition and signal visualization were performed using an in-house developed software.

AE Setup

The experimental setup used for AE measurement is shown in Figure 5. It consists of a 16-channel AE measurement system along with a broadband AE sensor with a frequency range of 100 kHz to 1 MHz and a resonant AE sensor with a frequency of 150 kHz. The sensor was attached firmly to the surface of each specimen by an elastic cord and a thin film of silicone grease for good transmittance of acoustic signals. The sensor was fixed at the gauge-to-shoulder transition region of the specimens. The AE data was recorded at a sampling rate of 5 MS/s for all the specimens. A preamplifier (40 dB gain) and band-pass filter (100 to 300 kHz) were used to record the

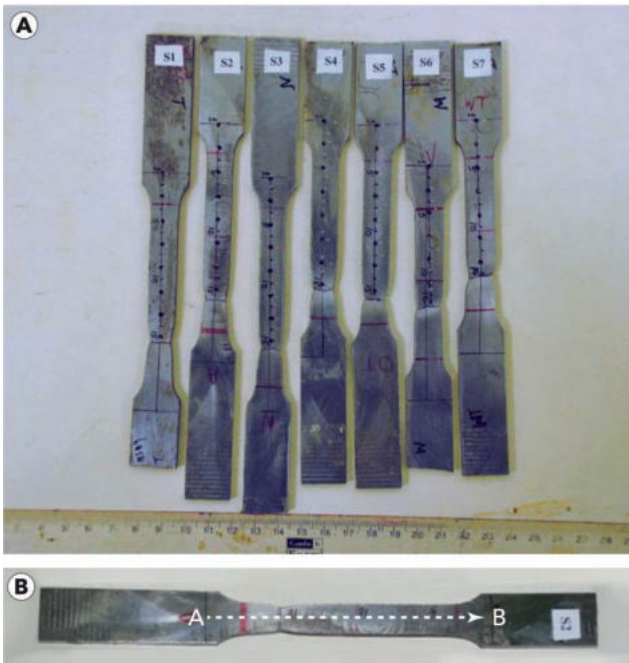


Figure 3. Fracture specimens: (a) photograph; (b) measurement of SMLF along the dotted line AB using a GMR sensor
Рис. 3. Зразки для випробувань на руйнування: (a) фотографія; (b) вимірювання SMLF уздовж пунктирної лінії АВ за допомогою GMR датчика

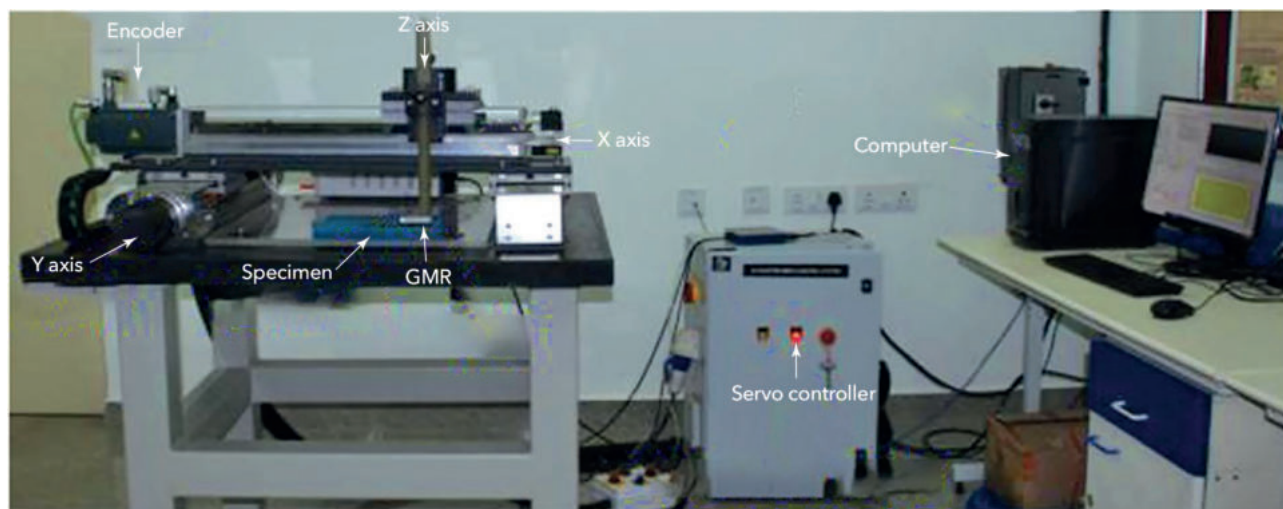


Figure 4. Experimental setup for MMM testing

Рис. 4. Експериментальна установка для досліджень магнітної пам'яті металу (MMM)

signals. A threshold of 40 dB was maintained. The gain and threshold were selected to mitigate external noise during recording.

This was done by repeatedly loading and unloading a dummy specimen to higher load levels expected to be taken by any of the specimens. This ensured that the acoustic emission signals were not recorded either from the machine or from external noise.

Results and Discussion

This section presents the results of the experiments.

Tensile Results

Stress-strain curves for all the specimens were generated from load-elongation plots and then tensile properties were determined. Figures 6a and 6b show the mechanical strengths (yield strength and tensile

strength) and elongation, respectively, for the different heat-treated specimens. As can be seen from Figure 6a, both yield strength and tensile strength are highest for the brine-quenched specimen and lowest for the annealed specimen. The maximum strength in the brine-quenched specimen is primarily attributed to the presence of martensite as a major constituent, which is a very strong phase in carbon steels (Long et al. 2014; Adebiyi et al. 2015). The minimum strength in the annealed specimen is essentially due to relieving stress and an increase in grain size leading to free movement of dislocations. During annealing, the specimen undergoes slow cooling, which results in the formation of coarse grains and enhancement of ductility. The strength of the normalized specimen is found to be more than that of the annealed specimen due to the presence of a small amount of martensite in the normalized specimen. The strength of the oil-quenched and tempered specimen is reduced compared to the brine-quenched specimen. The effect of tempering on mechanical strength is more pronounced in the brine-quenched specimen compared to the oil-quenched specimen. This is attributed to the large difference in cooling rate for brine quenched and brine quenched followed by tempering compared to that of oil quenched and oil quenched followed by tempering.

Among all the specimens, the annealed specimen shows maximum elongation while the brine-quenched specimen shows minimum elongation (Figure 6b). The maximum elongation in the annealed specimen is again attributed to the free movement of dislocations without any obstruction. The minimum elongation in the brine-quenched specimen is attributed to the presence of martensite. The brine quenching increases strength and reduces ductility. Tempering reduces strength but improves ductility of the steel.

The changes in tensile properties are influenced mainly by phase transition and residual stress. The

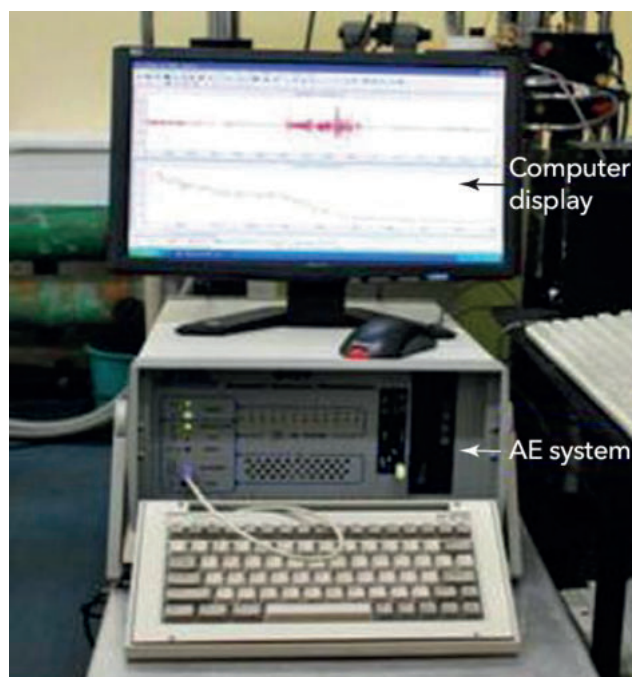


Figure 5. Experimental setup for AE

Рис. 5. Експериментальна установка для досліджень з використанням акустичної емісії (AE)

amounts of marten- site and ferrite are also important factors affecting tensile properties. The tempering process leads to changes in the internal structure of the steel and results in mechanical property changes.

MMM Results

Figure 7a shows the response of the GMR sensor for different specimens scanned along the full gauge length (measured length of 100 mm). As can be seen, the GMR sensor output (after voltage to magnetic field conversion) is different for different specimens, which implies that the SMLF depends upon the microstructure due to different heat treatments. This observation is attributed to the changes in the magnetic properties of carbon steel with the combined effect of microstructure and residual stress (because of tensile deformation) of the steel. As expected, the GMR sensor output is highest at the fracture position for all the specimens due to high magnetic reluctance at the fracture position (Bao et al. 2015). It is also observed that the peak position (~18 to 35 mm) is different for different specimens as the specimens were not fractured at the same location of gauge length.

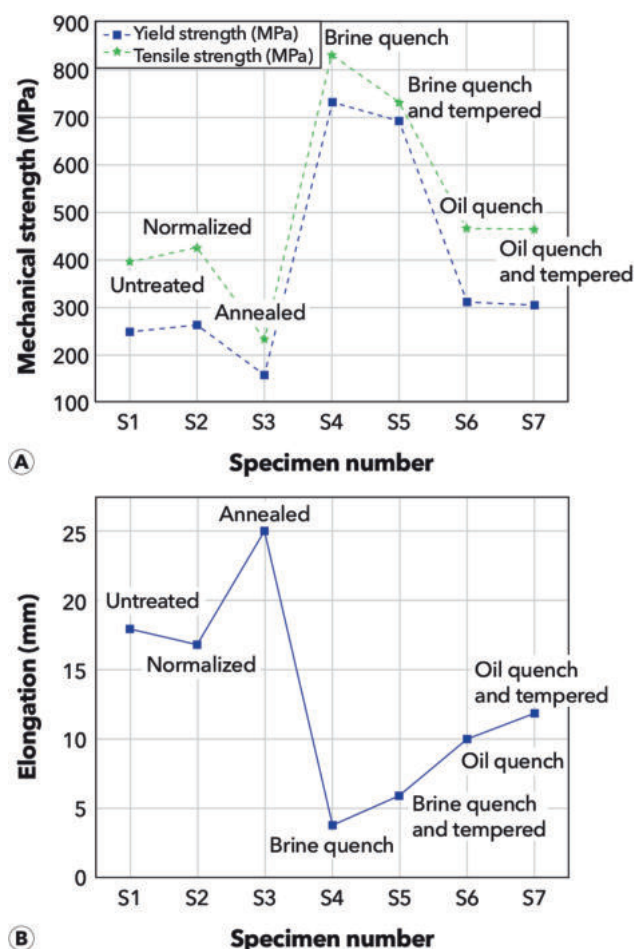


Figure 6. Comparison of different heat-treated specimens: (a) mechanical strength (yield strength and tensile strength); (b) elongation

Рис. 6. Порівняння зразків з різною термічною обробкою: (а) механічна міцність (границя текучості та міцність на розтяг); (б) подовження

In order to analyze the effect of plastic deformation on the SMLFs for all the heat-treated specimens, the response of the GMR sensor scanned along the longer piece of the fractured specimen is plotted in Figure 7b. It can be seen that the GMR sensor output is different due to plastic deformation in different specimens. The GMR sensor output also varies with the degree of plastic deformation. The intensity of the GMR sensor output is found to increase with the increase in deformation. When the tensile load is applied, the stress and magnetic which hinders the motion of the domain wall. It is equivalent to having a reluctance, leading to the distortion of magnetic flow. Therefore, the detectable leakage magnetic field increases and the SMLF signal increases as well.

The response of the GMR sensor for the untreated specimen with and without tensile deformation is also plotted in Figure 7c. As can be seen, the GMR output of the undeformed specimen is a straight line, and it has an average value of about 20 A/m. As compared to the undeformed specimen, the GMR output of the deformed specimen shows a peak at the fracture position and its value is also higher at the plastic deformation region due to the development of dislocation structures.

Hardness measurements (Figure 8a) were carried out at discrete positions (5 mm spacing) of the longer piece of the fractured specimens using a digital Rockwell hardness tester. As can be seen, the hardness values are different (average hardness ~150 to 270 HV) for different heat-treated specimens as well as for different positions of the same tensile deformed specimen. Hardness is highest in the brine-quenched specimen and lowest in the annealed specimen, as expected. The peak amplitudes of the GMR sensor output and hardness values for all the specimens were determined and plotted in Figure 8b. It can be seen that the GMR peak amplitude is highest in the brine-quenched and tempered specimen and lowest in the annealed specimen. The maximum GMR peak amplitude in the brine-quenched and tempered specimen is primarily attributed to its more refined and homogeneous martensitic structure and stronger ferromagnetism of tempered martensite than that of the quenched martensite (Long et al. 2014). After tempering, SMLF increases as the relative permeability values become higher due to tempering. The minimum GMR peak amplitude in the annealed specimen is essentially due to relieving stress and an increase in grain size leading to free movement of dislocations.

AE Results

Figures 9a through 9g show stress versus time plots for different specimens. The variations of acoustic emission counts with time are also superimposed on the same plots. According to the stress-strain curve, the tensile process in the untreated, normalized, and annealed specimens can be divided

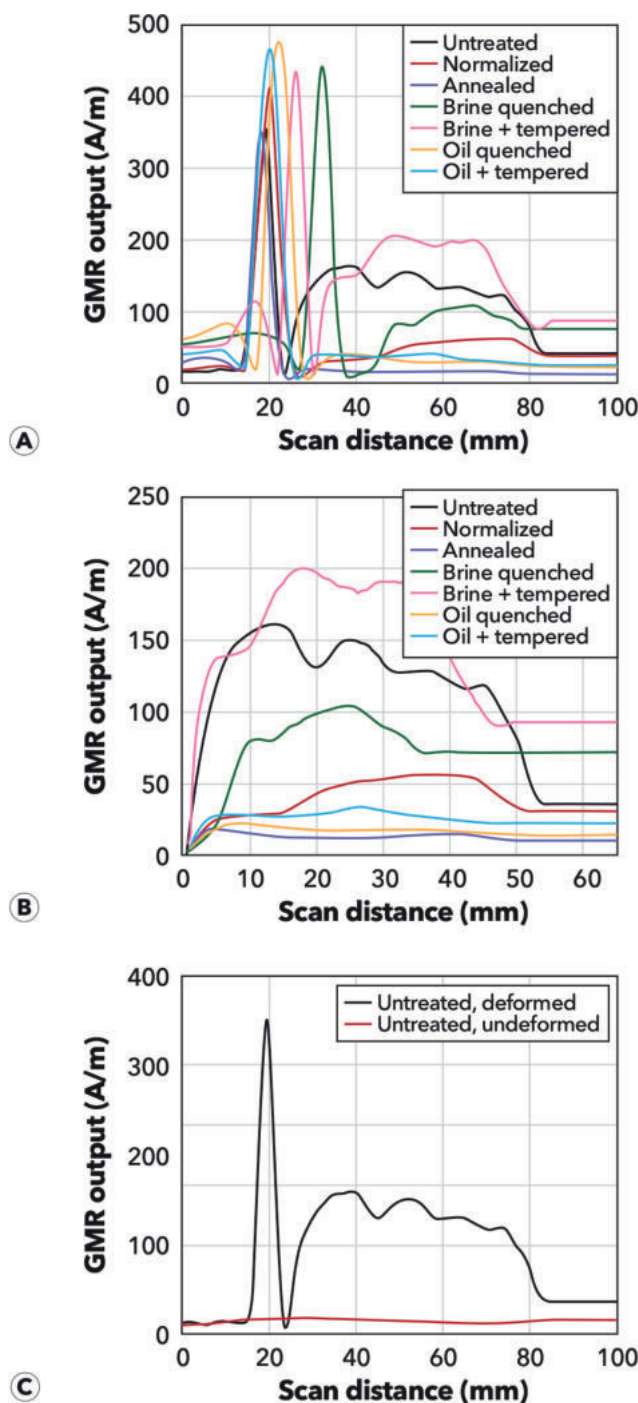


Figure 7. Response of GMR sensor for different heat-treated specimens: (a) scanned along the full gauge length; (b) scanned along longer piece of fractured specimen; (c) response of GMR sensor for the untreated specimen with and without tensile deformation (GMR output of 1 V corresponds to 3061 A/m)
Рис. 7. Відповідь датчика GMR для зразків з різною термічною обробкою: (а) сканування по всій ширині; (б) сканування уздовж довшого шматка зруйнованого зразка; (с) відповідь датчика GMR для необробленого зразка з деформацією розтягу та без неї (вихід GMR 1 В відповідає 3061 А/м)

into three regimes; namely, elastic region, Lüders or discontinuous yield region, and strain hardening region. In the brine-quenched, oil-quenched, and tempered specimens, the Lüders region is absent. In the quenched and tempered specimens, the presence of

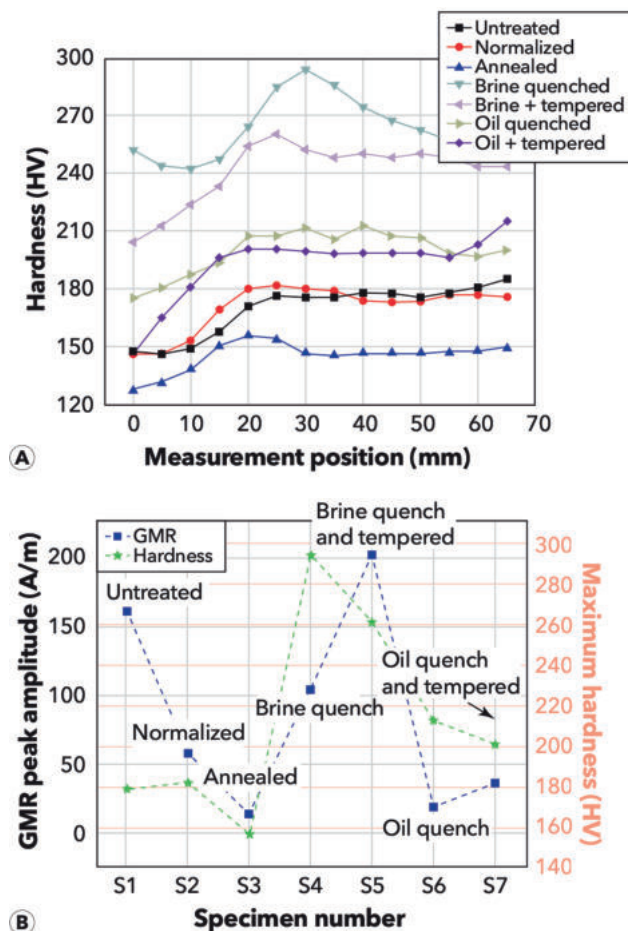


Figure 8. Comparison of different heat-treated specimens: (a) hardness measured at discrete positions of longer fractured specimen; (b) comparison of GMR peak signal amplitude with maximum hardness

Рис. 8. Порівняння зразків з різною термічною обробкою: (а) твердість, виміряна в дискретних положеннях довшого зруйнованого зразка; (б) порівняння амплітуди пікового сигналу GMR з максимальною твердістю

martensite causes initial yielding to commence at low stresses and the stress-strain curve becomes smooth and rounded. This is due to the presence of large densities of new dislocations created by martensitic transformation; retained austenite, which is much softer; and residual stresses after quenching, which assist in local yielding at low applied loads. Peak amplitude distribution of acoustic emission hits (or events) of two specimens (untreated and brine quenched) is shown in Figures 10a and 10b. Ranges of peak amplitude for different specimens are shown in Table 2.

In the untreated specimen (Figure 9a), higher counts are generated during preyield and yield deformation, and this is attributed to the generation and movement of dislocations. In the elastic region, emission is high. The acoustic emission counts in the Lüders region are comparatively lesser than the elastic region, and this is attributed to the reduced dislocation motion caused by an increase in dislocation density. At higher strain levels, a lesser num-

ber of counts compared to up-to-yield is due to the reduction in glide distance and velocity of moving dislocations. AE signals emitted by the normalized specimen are given in Figure 9b, where acoustice-mission activity is higher in the elastic and Lüders region in comparison with the strain-hardening region. Higher counts in the normalized specimen than in the case of the untreated specimen are due to the presence of martensite and the heterogeneous nature of the microstructure. In the case of the annealed specimen (Figure 9c), acoustic emission counts are significantly higher in the elastic region and reduced in the Lüders region and work-hardening

region. Thus, in general, acoustic emission activity in untreated, normalized, and annealed specimens shows higher counts in the elastic region. In carbon steels, an increase in acoustic emission activity near yield point and a decrease thereafter was reported (Akbari and Ahmadi 2010). Acoustic emissions generated during micro-yielding were attributed to dislocation activity at grain boundaries and a rapid increase in acoustic emissions after massive plastic deformation was attributed to intensive development of slip bands in ferrite grains and Lüders band propagation in the lower yield point (Wang et al. 2015).

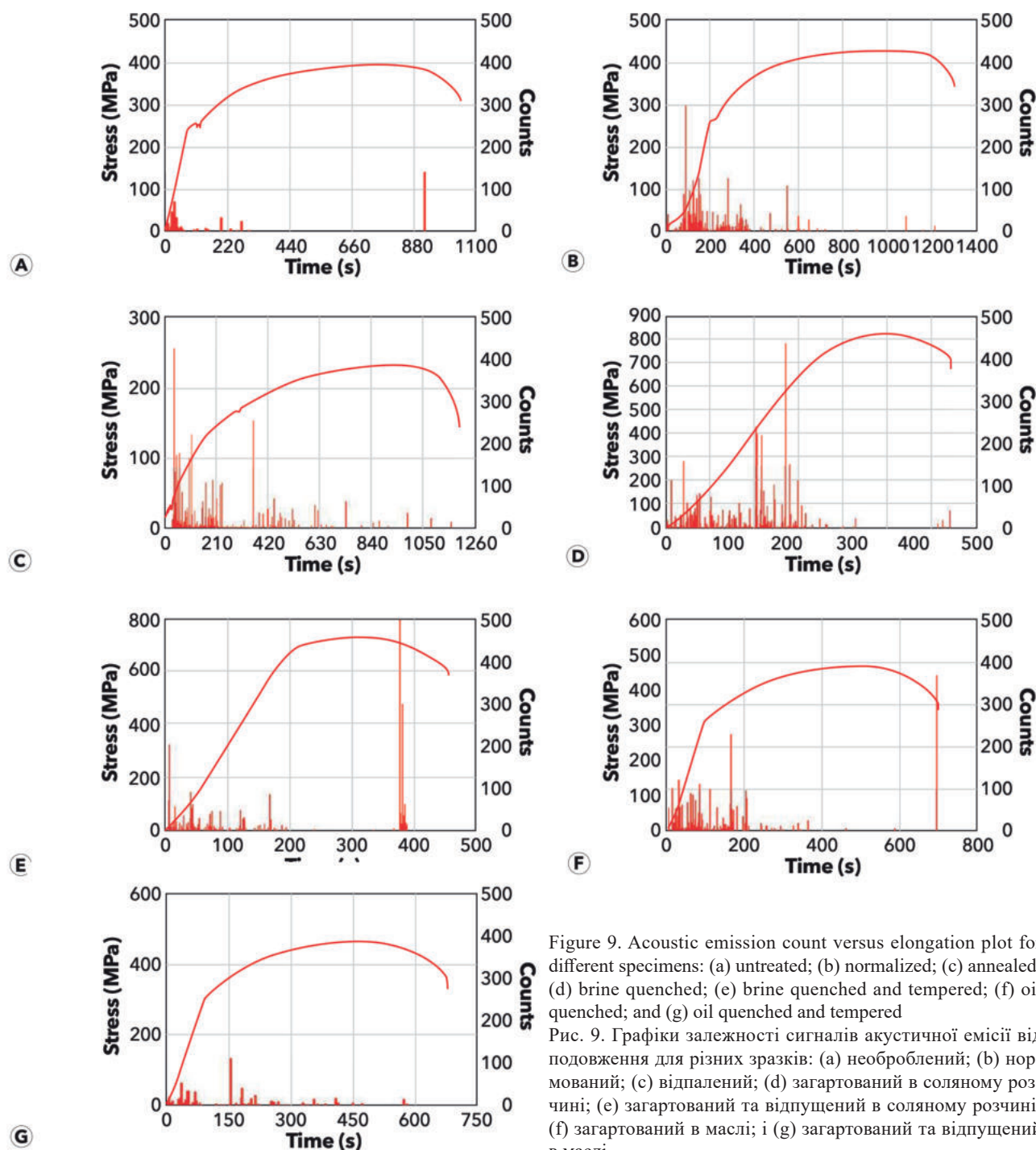


Figure 9. Acoustic emission count versus elongation plot for different specimens: (a) untreated; (b) normalized; (c) annealed; (d) brine quenched; (e) brine quenched and tempered; (f) oil quenched; and (g) oil quenched and tempered

Рис. 9. Графіки залежності сигналів акустичної емісії від подовження для різних зразків: (а) необроблений; (б) нормований; (с) відпалений; (д) загартований в соляному розчині; (е) загартований та відпущений в соляному розчині; (ф) загартований в маслі; і (г) загартований та відпущений в маслі

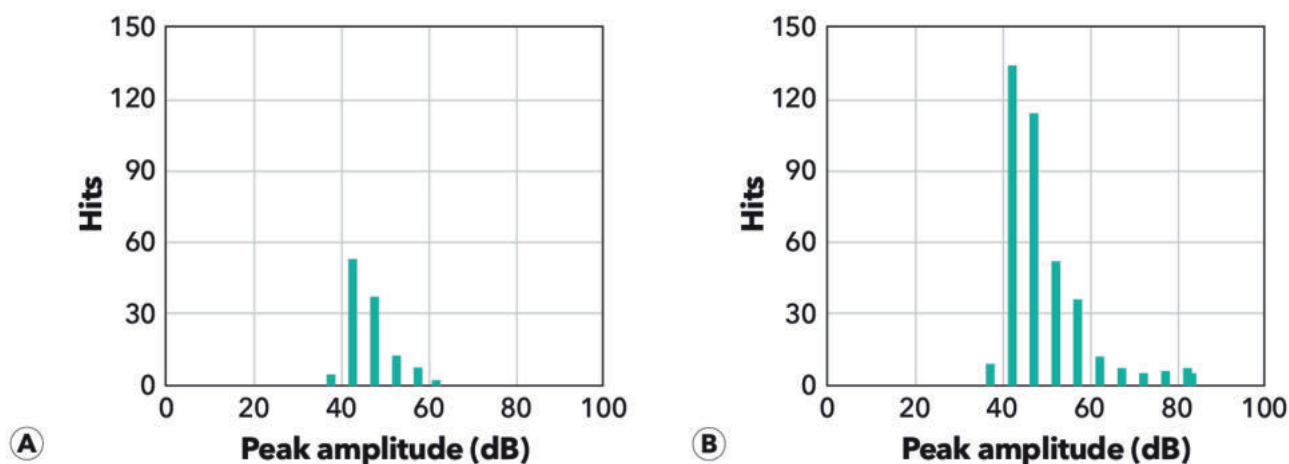


Figure 10. Distribution of acoustic emission hits by peak amplitude: (a) untreated; (b) brine quenched

Рис. 10. Розподіл сигналів акустичної емісії за піковою амплітудою: (a) необроблений; (b) загартований в соляному розчині

In the brine-quenched specimen (Figure 9d), acoustic emission counts are generated continuously from the beginning and are higher during strain hardening compared to the elastic region. The acoustic emission counts in the oil-quenched specimen (Figure 9f) follow an almost similar trend. The increasing acoustic emission activity with strain in quenched specimens could be attributed to cracking at interfaces and in martensitic particles. This generates signals of higher amplitude in these two specimens compared to the untreated, normalized, and annealed specimens (Table 2). The number of hits in the brine-quenched specimen is also higher compared to the untreated specimen (Figure 10). In DPS, for tensile fracture of samples with low martensite content, the dominant micromechanism of failure is ferrite/martensite interface decohesion; but in samples with high martensite content, martensite phase fracture is also observed (Khamedi et al. 2010; Fallahi et al. 2012). The cracking in martensite is apparently related to the residual stress at the interfaces and the toughness of the martensitic particles themselves (Long and Hua-zi 1990). After tempering, residual stresses are considerably reduced. This decreases acoustic emission counts in both of the tempered specimens (Figures 9e and 9g). A decrease in acoustic emissions in tempered specimens compared to quenched specimens is known (Haneef et al. 2010).

This study demonstrates that the SMLF is influenced by microstructure as well as residual stress aroused due to plastic deformation in heat-treated AISI 1025 carbon steel. Similar effects are found in acoustic emission signals and mechanical properties. AE is effective in evaluating the deformation behavior of heat-treated carbon steel specimens during tensile deformation, while the MMM technique is effective in evaluating deformation behavior after testing. Therefore, it is recommended to use both MMM and AE techniques for comprehensive understanding of deformation and, hence, damage estimation of carbon

steel. The MMM technique is semivolumetric, which is sensitive to only surface and near-surface discontinuities and deformation. On the other hand, AE is a volumetric technique, which is sensitive to deformation and damage occurring throughout the volume of the material. Also, the MMM technique can be used only for ferromagnetic materials, while AE can be used for both ferromagnetic and nonferromagnetic materials. Further, it is suggested to consider the microstructure effect for reliable damage estimation of engineering components using the MMM technique. It will be beneficial to develop techniques to differentiate the effect of microstructure and residual stress in tensile-deformed carbon steels. Efforts are underway in this direction.

Conclusions

MMM and AE measurements were carried out to investigate the tensile deformation behavior of AISI 1025 carbon steel with different microstructures. The results show that SMLF signals are influenced by microstructure as well as residual stress in AISI 1025 carbon steels. Among various specimens, SMLF signal peak amplitude is highest in brine-quenched specimens followed by tempering, while hardness is highest in the brine-quenched specimen. However, SMLF signal peak amplitude and hardness are lowest in the annealed specimen. The SMLF signal is found to be more in tempered specimens compared to untempered specimens. From AE measurements, it is observed that AE in untreated, normalized, and annealed specimens shows higher counts in the elastic region. The quenched specimens with higher martensite emit higher acoustic emissions during deformation but decreases when tempered. Acoustic emissions in the quenched specimens generate a signal of higher amplitude than the tempered specimens. These results would be useful for reliable estimation of damage in engineered structures using MMM and AE techniques. They could also be used to provide effective feedback on the heat-treatment process.

Acknowledgments

Authors are thankful to Dr. Shaju K. Albert, Former Director, Metallurgy and Materials Group (MMG), IGCAR, and Dr. R. Divakar, Associate Director, Materials Characterization & Engineering Group, MMG, IGCAR, for encouragement and support.

References

1. Adebisi, K.A., L.O. Mudasiru, and I.A. Babatunde, 2015, "Effect of Brine Solution on Grain Size Formations in AISI 1080 Low Carbon Steel," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 178–183, <https://doi.org/10.9790/1684-1232178183>
2. Akbari, M., and M. Ahmadi, 2010, "The Application of Acoustic Emission Technique to Plastic Deformation of Low Carbon Steel," *Physics Procedia*, Vol. 3, pp. 795–801, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.102>
3. ASNT, 2005, *Nondestructive Testing Handbook, Vol. 6: Acoustic Emission Testing*, 3rd edition, American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH
4. ASTM, 2009, *ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA
5. Bao, S., and D. Zhang, 2015, "The Effect of Loading Speed on the Residual Magnetic Field of Ferromagnetic Steels Subjected to Tensile Stress," *Insight*, Vol. 57, No. 7, pp. 401–405, <https://doi.org/10.1784/insi.2015.57.7.401>
6. Bao, S., X. Liu, and D. Zhang, 2015, "Variation of Residual Magnetic Field of Defective U75V Steel Subjected to Tensile Stress," *Strain*, Vol. 51, pp. 370–378, <https://doi.org/10.1111/str.12147>
7. Byeon, J.W., and S.I. Kwun, 2003, "Magnetic Evaluation of Microstructures and Strength of Eutectoid Steel," *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 10, pp. 2184–2190
8. Carpenter, S.H., and C. Pfeiderer, 1994, "Acoustic Emission from AISI 4340 Steel as a Function of Strength," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 12, pp. 141–148
9. Doubov, A.A., 2001, "Diagnostics of Equipment and Constructions Strength with Usage of Magnetic Memory," *Inspection Diagnostics*, Vol. 6, pp. 19–29
10. Fallahi, A., R. Khamedi, G. Minak, and A. Zucchelli, 2012, "Monitoring of the Deformation and Fracture Process of Dual Phase Steels Employing Acoustic Emission Techniques," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 548, pp. 183–188, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.104>
11. Haneef, T.K., C.K. Mukhopadhyay, B.P.C. Rao, and T. Jayakumar, 2010, "Acoustic Emissions Generated during Lüders Band Elongation of Tempered Medium Carbon Steel," *Strength, Fracture and Complexity*, Vol. 6, pp. 149–159, <https://doi.org/10.3233/SFC-2011-0113>
12. Hu, B., L. Li, X. Chen, and L. Zhong, 2010, "Study on the Influencing Factors of Magnetic Memory Method," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 33, pp. 1351–1357, <https://doi.org/10.3233/JAE-2010-1260>
13. Khamedi, R., A. Fallahi, and A.R. Oskoue, 2010, "Effect of Martensite Phase Volume Fraction on Acoustic Emission Signals Using Wavelet Packet Analysis during Tensile Loading of Dual Phase Steels," *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 2752–2759, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.019>
14. Leng, J., Y. Liu, G. Zhou, and Y. Gao, 2013, "Metal Magnetic Memory Signal Response to Plastic Deformation of Low Carbon Steel," *NDT & E International*, Vol. 55, pp. 42–46, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.01.005>
15. Liu, B., X. Xue, J. Li, R. Li, S. Dong, and J. Fang, 2019, "Grain Size Effect on Metal Magnetic Memory Signal for Stress Damage Evaluation of Low Carbon Steel," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 34, No. 3, pp. 267–282, <https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1590830>
16. Long, F., J. Wang, G. Gao, W. Li, and J. Zhao, 2014, "Tempering Effect and Tensile Properties Evaluation of C45 Steel Based on Magnetic Memory Technology," *Materials Evaluation*, Vol. 72, No. 11, pp. 1414–1420
17. Long, Q.Y., and Y. Huazi, 1990, "Acoustic Emission during Deformation of Dual-Phase Steels," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21, No. 1, pp. 373–379, <https://doi.org/10.1007/BF02782417>
18. Min, Y., G. Rui-Bin, Z. Chunyu, Q. Yinhu, S. Zhiyuan, and X. Zhanshan, 2014, "Research on the Relationship between Metal Magnetic Memory Signal Distortion and Yield Strain under Static Tension Test," *Insight*, Vol. 56, No. 12, pp. 669–675, <https://doi.org/10.1784/insi.2014.56.12.669>
19. Moonesan, M., and M. Kashefi, 2018, "Effect of Sample Initial Magnetic Field on the Metal Magnetic Memory NDT Result," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 460, pp. 285–291, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.04.006>
20. Singh, W.S., R. Stegmann, and M. Kreutzbruck, 2016, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Stress-Induced Geometry Effect on Self-Magnetic Leakage Fields during Tensile Deformation," *Insight*, Vol. 58, No. 10, pp. 544–550, <https://doi.org/10.1784/insi.2016.58.10.544>
21. Song-ling, H., L. Lu-ming, S. Ke-ren, and W. Xiao-fen, 2004, "Magnetic Field Properties caused by Stress Concentration," *Journal CSUT*, Vol. 11, No. 1, pp. 23–26
22. Sonntag, N., R. Stegmann, B. Skrotzki, and M. Kreutzbruck, 2014, "Deformation Induced Magnetization of Ferromagnetic Steels Using the Example of an Unalloyed Structural Steel," *Proceedings of the Werkstoffprüfung*, pp. 355–360 (in German)
23. Tang, J., J. Li, H. Wang, Y. Wang, and G. Chen, 2019, "In-Situ Monitoring and Analysis of the Pitting Corrosion of Carbon Steel by Acoustic Emission," *Applied Sciences*, Vol. 9, <https://doi.org/10.3390/app9040706>
24. Vivekananda, K.S., and K.S. Venkataraman, 2006, "NDE Techniques for Reliable Inspection of Carbon Steel Tubes," *Proceedings of National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, 7–9 December, Hyderabad, India
25. Wadley, H.N.G., and C.B. Scruby, 1991, "Cooling Rate Effects on Acoustic Emission-Microstructure Relationships in Ferritic Steels," *Journal of Materials Science*, Vol. 26, pp. 5777–5792, <https://doi.org/10.1007/BF01130115>
26. Wang, H.W., H.M. Yu, H.Q. Xiao, Z.Y. Han, and H.Y. Luo, 2015, "Steel Damage based on Acoustic Emission," *Materials Research Innovations*, Vol. 19, <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.0000000001094>
27. Wang, Z.D., Y. Gu, and Y.S. Wang, 2012, "A Review of Three Magnetic NDT Technologies," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, pp. 382–388, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.08.048>
28. Xing, C., L. Luming, H. Bin, C. Xiaojie, D. Yuanhui, Y. Dezhi, and Y. En, 2006, "Magnetic Evaluation of Fatigue Damage in Train Axles without Artificial Excitation," *Insight*, Vol. 48, No. 6, pp. 342–345, <https://doi.org/10.1784/insi.2006.48.6.342>

Permission to Reprint 20.10.2022:
The American Society for Nondestructive Testing, Inc.
CITATION
Materials Evaluation 80 (6): 44-53
<https://doi.org/10.32548/2022.me-04195>
©2022 American Society for Nondestructive Testing



КОНФЕРЕНЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ ТА ТЕХНІЧНА



ДІАГНОСТИКА ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ»



17 листопада 2022 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України було проведено одноденну науково-технічну конференцію «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України». Організаторами конференції виступили Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України і Міжнародна Асоціація «Зварювання».

У роботі конференції, яка була організована у вигляді сесій пленарних (наживо та онлайн) і стендових доповідей, взяли участь понад 80 науковців та спеціалістів з України. Конференцію відкрив директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона академік І.В. Кривцун. У своєму виступі він відзначив традиційність проведення подібних заходів у стінах ІЕЗ, особливості та складність поточного військового положення в країні, що зумовлені широкомасштабною агресією росії, життєву важливість і актуальність підготовки та реалізації програми післявоєнного відновлення і подальшого розвитку економіки країни, в яку значний внесок мають зробити вчені і спеціалісти зварювального виробництва та неруйнівного контролю.

У конференції взяли участь представники ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ФМІ ім. Г.В. Карпенка, ПрАТ «Червона Хвиля», ТОВ «Патон Інтернешнл», НУ «Львівська політехніка», ДП «Міжнародний центр електронно-променевих технологій ІЕЗ», НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ТОВ «Ультракон Сервіс», ДП «Антонов», НУ Кораблебудування ім. адмірала Макарова, ТОВ «Діагностичні Прилади», Дніпровський ДТУ, ДКТБ ІЕЗ, ТОВ «Плазер», Навчально-науковий ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ФТІМС, ДП НВЦ «Титан» ІЕЗ, ТОВ «Стіл Ворк», ПрАТ «ПлазмаТек», ТОВ «МІGATEX ін-

дустрія», ТОВ «Плазма Мастер», ТОВ «Електро-терм» та інші.

Спонсорську підтримку в організації проведення конференції надали ТОВ «Патон Інтернешнл», НВЦ «Титан» ІЕЗ, КУІЗ ім. Є.О. Патона, ТОВ «Ультракон Сервіс», ТОВ «Діагностичні Прилади», ТОВ «Велтек».

На конференції було заслухано 12 пленарних та 65 стендових доповідей, присвячених таким напрямкам зварювального виробництва та суміжних технологій, як дугове зварювання, електронно-променеві технології, 3D-друк, зварювальні матеріали та обладнання, неруйнівний контроль та інші.

Були заслухані наступні пленарні доповіді: *Синергетична активація процесу TIG зварювання* (Кривцун І.В., Коваленко Д.В., Коваленко І.В.), *Розвиток устаткування для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом* (Жерносеков А.М., Токмаков М.М.), *Застосування профільних електронних променів для розширення технологічних можливостей 3D-друку та супутніх процесів* (Ковальчук Д.В., Мельник В.Г., Мельник І.В.), *Використання методу фотограметрії для технічної діагностики Київської телевежі* (Лобанов Л.М., Стельмах Д.І., Савицький В.В., Шуткевич О.П.), *Сучасні технології електрофізичної обробки для регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань* (Лобанов Л.М., Пашин М.О., Михайлюк О.Л., Кривий В.І.), *Науково-виробнича фірма «Діагностичні прилади» – 25 років інноваційного розвитку* (Павлій О.В.), *Прогнозування впливу водневої деградації трубних сталей на несучу здатність зварних елементів магістральних газопроводів при транспортуванні ними газоводневих сумішей* (Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І.), *Електрошлаковий переплав як метод рециклінгу в умовах обмеженого ресурсу сировинної бази* (Педченко Є.О., Костецький Ю.В., Полішко Г.О., Петренко В.Л., Зайцев В.А.), *Modelling of heat transfer and fluid flow in the metal being welded during DC and HFPC TIG spot welding* (Semenov O., Krivtsun I., Demchenko V., Reisgen U, Mokrov O., Sharma R., Sydoruk V.), *Розробка самозахисних порошкових дрітків для ремонтно-відновлювального зварювання металоконструкцій рухомого складу залізничного транспорту та споруд гірничо-металургійного комплексу* (Шлепаков В.М., Котельчук О.С., Головка В.В.). *Застосування вібродіагностичних систем відбору та обробки вібраційних сигналів для визначення технічного*

стану промислового обладнання (Юзефович Р.М., Яворський І.М., Слєпко Р.Т., Личак О.В., Стецько І.Г., Варивода М.З., Трохим Г.Р.) (онлайн доповідь), *Можливості сучасних електронно-променевих технологій для отримання нових матеріалів та захисних покриттів* (Яковчук К.Ю.).

Також під час роботи конференції можна було ознайомитись із 65 стендовими доповідями. Вони відображають результати широкого спектру досліджень і розробок в галузі зварювання та суміжних технологій.

Тези доповідей разом із програмою роботи конференції було опубліковано до початку роботи конференції. Тези доповідей у електронному вигляді розміщені на сайті конференції www.pwiscientists.com/ukr/wtd2022.

Учасники конференції відзначили високий науковий рівень та практичну значимість пленарних та стендових доповідей, що дозволило зокре-

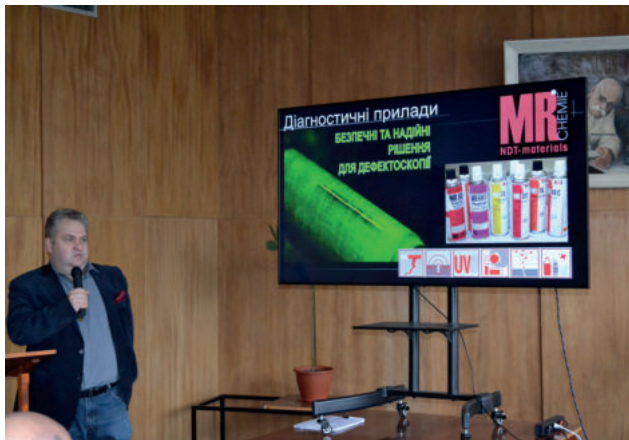
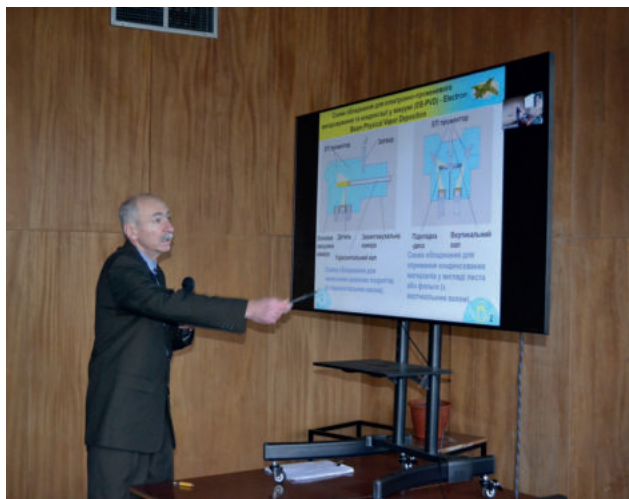
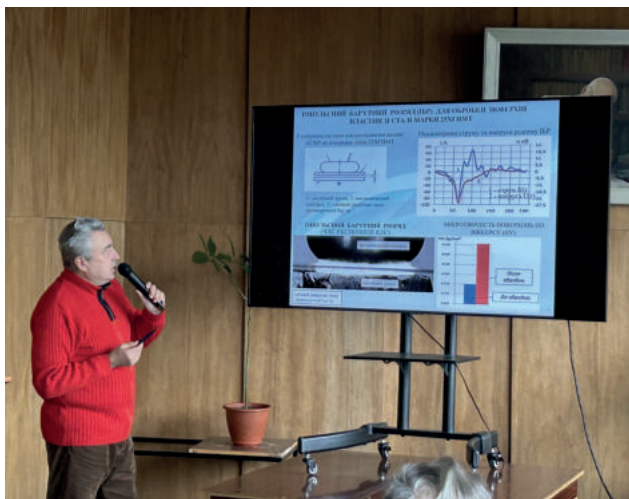
ма обговорити перспективи розвитку подальших досліджень у галузі зварювання та неруйнівного контролю.

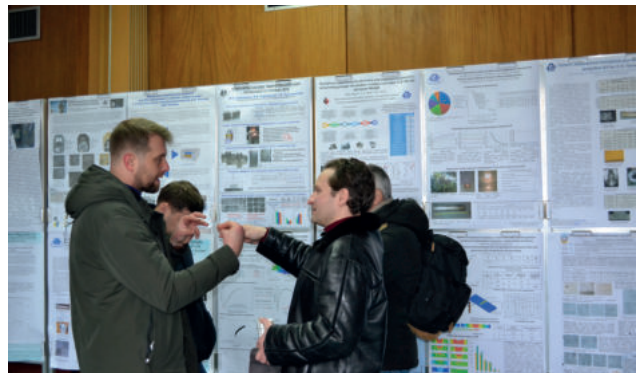
Під час роботи конференції працювала виставка «Зварювання та споріднені технології». У виставці взяли участь ТОВ «Патон Інтернешнл», ТОВ «Діагностичні прилади», ПрАТ «Червона Хвиля», ТОВ «Плазма Мастер», ТОВ «Ультракон», ТОВ «Спектран».

Учасники конференції могли ознайомитись з останніми випусками журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», «The Paton Welding Journal» та оформити передплату на ці видання на 2023 р., а також ознайомитись з новою книгою «Моніторинг стану конструкцій» (автор В.О. Троїцький) та замовити її.

Олександр Зельніченко







Погляд в історію науки і техніки

/рубрику веде Ю.М. Посипайко/

ДАТИ, ПОДІЇ, ФАКТИ З ІСТОРІЇ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

(календар IV кв.)

1 жовтня 1934 р. Президія АН УРСР затвердила директором Інституту електрозварювання Євгена Оскаровича Патона (1870-1953 рр.). Для визнання зварювання як надійного технологічного процесу знадобились комплексні дослідження механіки зварних конструкцій, металургійних процесів і металознавства зварювання, фізики дугового розряду. Необхідно було створити апаратуру, матеріали та нові технології зварювання та випробування. Саме для цих цілей і був створений перший в світовій практиці інститут, що в наступні роки зайняв лідируючі позиції в розвитку зварювальної науки і техніки.



1 жовтня 1931 р. розпочав роботу Харківський тракторний завод, з конвеєра якого зійшли перші 10 тракторів СХТЗ 15/30 потужністю 15-30 кінських сил (його прототип – американський International 15/30). Завод став випускати біля 50 тис. тракторів на рік. Цього ж року на заводі розпочав працювати один з перших в Україні ВТК – Відділ технічного контролю. Згодом завод став найбільшим в Україні підприємством з виробництва уніфікованих гусеничних та колісних сільськогосподарських тракторів. З 2016 року входить до складу ДСН.



1 жовтня 1960 р. з конвеєра заводу «Комунар» в Запоріжжі зійшли перші українські мікролітражні автомобілі моделі ЗАЗ-965 «Запорожець». До кінця року було випущено близько 1,5 тис. «Запорожців». Цей автомобіль швидко став популярним, тому що порівняно мало коштував та був економічним. Експлуатаційна витрата пального становила 7,3 л на 100 км. Повноцінна 4-місна машина була компактною та маневреною: довжина її становила 3,33 м, а радіус повороту за колією зовнішнього колеса – 5 м. Незалежна підвіска всіх коліс, рівне, без тунелю для «кардана», дно, 20-сантиметровий кліренс під задньою віссю забезпечували непогану прохідність.



3–7 жовтня 1926 р. в Празі відбувся Перший український науковий з'їзд – форум українських науковців в екзилі. Голова оргкомітету з'їзду – академік Іван Горбачевський. З'їзд розпочав роботу в Геологічному інституті Праги в присутності українських і чеських учених та представників емігрантських організацій у Чехії. Робота з'їзду відбувалась у 4-х секціях: історично-філологічній; права і суспільних наук; природничій; технічно-математичній. Загалом відбулись 41 засідання та обговорення 154 доповідей. Робота секцій проходила у стінах Карлового університету.



14 жовтня 1884 р. американський бізнесмен і винахідник, засновник компанії «Eastman Kodak» Джордж Істмен (1854-1932 рр.) запатентував фотоплівку. Все його життя і діяльність були пов'язані з фотографією: він поставив перед собою мету максимально спростити цей трудомісткий процес. У 1879 р. Істмен побудував машину для виготовлення сухих броможелатинових фотографічних платівок, а з вересня 1880 р. почав випускати самі фотопластинки. У 1883 р. його фірма випустила рулонну плівку, яка підходила практично до всіх фотоапаратів зі скляними пластинками. Сьогодні важко уявити життя без фотографії.



15 жовтня 1964 р. відбулася офіційна церемонія запуску нафтопроводу «Дружба». Він збудований для транспортування нафти в країни Європи. Загальна довжина – близько 5200 км. Маршрут нафтопроводу розгалужується на дві гілки: північну (через Білорусь, Польщу та Німеччину) і південну (через Україну, Чехію, Словаччину та Угорщину). Будівництво трубопроводів супроводжується великим обсягом робіт зі зварювання та технічного контролю.



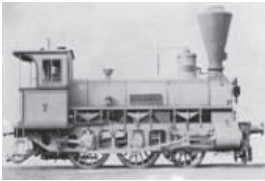
25 жовтня 2007 р. розпочато експлуатацію авіалайнера A380 – широкофюзеляжного двопалубного пасажирського літака, найбільшого серійного авіалайнера у світі. За словами працівників, найскладнішим завданням при створенні літака стала проблема зниження його маси. Місткість – 525 пасажирів у салонах трьох класів, 853 пасажирів в однокласовій конфігурації. Для зниження маси літака використовувались прогресивні технології зварювання та покращені алюмінієві сплави. На нижніх панелях фюзеляжу застосовано лазерне зварювання стрингерів та обшивки, що суттєво знизило кількість кріплень. У виробництві літаків застосовано велику кількість випробувальних та контрольних операцій.



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



29 жовтня 2013 р. спущено на воду ескадрений міноносець «Зумвольт», що є першим в програми SC-21 ВМС США. Програма, розпочата в 1991 р., була спрямована на створення сімейства універсальних кораблів нового покоління. Есмінці цієї серії є багатоцільовими та призначені для атаки супротивника на узбережжі, боротьби з авіацією супротивника та вогневої підтримки військ з моря. Розробка цього типу корабля – одне з останніх досягнень військової техніки. При реалізації проекту широко використовувалось електродугове зварювання з підвищеними вимогами до якості зварних швів.



4 листопада 1861 р. до Львова прибув перший потяг з Кракова (через Перемишль) по новозбудованій Галицькій залізниці ім. Карла Людвіга. Зі Львова залізницю продовжили до Бродів (1869 р.). З Красного було прокладено відгалуження до Золочева, Зборова, Тернополя і Підволочиська (1871 р.). У південному напрямку залізниця вела з Кракова до Цешина і далі до Угорщини. Відтинки залізниці від кордону до Львова вважається першою на території України залізницею. Паровози Галицької залізниці закуплялись впродовж 1858-1884 р.р. на паровозобудівних підприємствах Німеччини і Австро-Угорщини.



5 листопада 1953 р. відкрито рух мостом через Дніпро в Києві. Згодом цей міст став носити ім'я Є.О. Патона. Провідна роль у проектуванні, виготовленні та монтажі прогнових будов належала Інституту електрозварювання та особисто Є.О. Патону. Проект мосту розроблено інститутом «Укрпроектстальконструкція». Міст довжиною 1543 м має 24 прольоти, з них чотири судноплавні з висотою 87 м. Основний обсяг робіт зі зварювання головних балок було виконано розробленими в ІЕЗ автоматами та напівавтоматами. У 2020 р. виконано діагностування технічного стану несучих конструкцій мосту.



6 листопада 1960 р. у Києві пущено першу чергу метрополітену – ділянку Святошинсько-Броварської лінії від станції «Вокзальна» до станції «Дніпро». Одночасно було запущено перше депо для технічного огляду та ремонту. Депо розташовувалося у невеликому будинку, поблизу від наземного вестибюля станції «Дніпро», і було розраховано на два вагони. Згодом було створено технічні служби дефектоскопії рельсового шляху, рухомого складу та ескалаторів.



14 листопада 1918 р. гетьман Павло Скоропадський підписав Закон про заснування Української Академії наук. Затверджений закон ухвалював статут Академії, визначав її структуру та організацію, процедуру прийняття рішень, обговорював бюджет. Складався з 9-и статей. Набув чинності 27 листопада 1918 р. Першим президентом обрано академіка Володимира Вернадського – українського науковця, природознавця, засновника геохімії, біогеохімії та радіогеології, вчення про біосферу, ноосферу, космізм. Згодом розпочалось формування установ Академії наук.



15 листопада 1878 р. американським винахідником Томасом Едісоном засновано компанію «General Electric». Спочатку вона називалась «Едісон електрик лайт», а після об'єднання в 1892 р. з компанією «Томсон-Х'юстон Електрик компані», заснованою іншим видатним американським винахідником – Е. Томсоном, отримала свою сучасну назву. З самого заснування компанія була першопрохідником у багатьох галузях науки та техніки, місцем розвитку технологій з'єднання та технічного контролю. На сьогодні до складу компанії входять ряд підприємств, що виробляють засоби неруйнівного контролю: Krautkramer, Seifert, AGFA NDT, Everest VIT, Hocking NDT та ін.



16 листопада 1990 р. на Установчій конференції, що відбулась в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона, утворене Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД) – творча громадська організація, яка об'єднує науковців, інженерів і робітників різних організацій, підприємств і лабораторій, професійна діяльність яких пов'язана з неруйнівним контролем та технічною діагностикою. Організаційну підтримку ініціативній групі надали Спілка наукових та інженерних об'єднань України та Національна Академія наук України. Установча конференція прийняла Статут Товариства, обрала правління та голову (проф. В.О. Троїцький). Товариство зареєстроване в Міністерстві юстиції України як всеукраїнське громадське об'єднання.

18 листопада 1885 р. випробувано перший в історії мотоцикл з двигуном внутрішнього згоряння, Daimler Reitwagen, конструкції німецьких інженерів Готтліба Даймлера і Вільгельма Майбаха. Бензиновий карбюраторний двигун мав потужність 1,5 к.с. і був встановлений на дерев'яній рамі з дерев'яними колесами. На перших випробуваннях мотоцикл розвинув швидкість 12 км/год. У цьому ж році він був запатентований Даймлером як «машина для верхової їзди з газовим двигуном». Таким чином, мотоцикл в сучасному розумінні з'явився на рік раніше першого бензинового автомобіля. Мотоцикл є однією з найбільш доступних форм автотранспорту. У світі станом на 2002 р. було приблизно 205 мільйонів мотоциклів, або 33 мотоцикла на 1000 чоловік.



23 листопада 2022 р. на засіданні Президії НАН України було прийнято рішення про присудження Золотої медалі ім. Б.Є. Патона НАН України. За результатами конкурсу 2022 р. нагороду було присуджено заступнику директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона академіку НАН України Л.М. Лобанову за створення технологій бездеформаційного зварювання виробів ракетно-космічної техніки та розроблення й впровадження методів лазерної інтерферометрії для оцінювання якості зварних з'єднань. Слід зазначити, що Золота медаль ім. Б.Є. Патона НАН України була присуджена вперше. Вона була заснована у 2020 р. з метою увічнення пам'яті академіка Б.Є. Патона.



25 листопада 1896 р. було ухвалено рішення про заснування Київського політехнічного інституту на нараді почесних громадян міста, представників міської влади, адміністрації Південно-західної залізниці, інженерів та промисловців. Згідно з ухваленим протоколом навчальний заклад мав бути політехнічним інститутом за типом і складатися з кількох відділів різних спеціальностей, за прикладом політехнікумів у Цюриху, Мюнхені, Відні тощо. На сьогодні це один із найбільших університетів України за кількістю студентів з широким спектром спеціальностей і освітніх програм для підготовки фахівців з технічних і гуманітарних наук. Успішно працює в університеті кафедра ПЗНК – Прилади і засоби неруйнівного контролю.



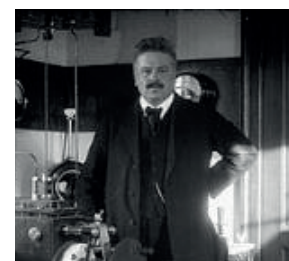
27 листопада 1918 р. народився Борис Євгенович Патон (1918-2020 рр.) – видатний український вчений у галузі зварювання, металургії та матеріалознавства. Видатний громадський діяч та талановитий організатор науки, академік Національної академії наук України, Академії наук СРСР, Президент НАН України, Міжнародної асоціації академії наук, директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, заслужений діяч науки та техніки УРСР, лауреат Ленінської та Державних премій СРСР та України, двічі Герой Соціалістичної Праці, Герой України. Разом зі своїм батьком, Євгеном Оскаровичем Патonom, створив всесвітньо відому патонівську науково-інженерну школу.



28 листопада 1660 р. засновано Лондонське королівське товариство з розвитку знань про природу – провідне наукове товариство Великої Британії, одне з найстаріших у світі. Перший президент – сер Роберт Морей. Лондонське королівське товариство, будучи незалежною від урядових наукових установ, відіграє важливу роль в організації та розвитку наукових досліджень Великої Британії та діє як дорадчий орган при розв'язанні основних питань наукової політики, виступаючи як національна Академія наук. У 1665 р. Лондонське королівське товариство почало видавати перший у світі журнал, присвячений виключно науці – «Philosophical Transactions of the Royal Society», запровадивши процедуру рецензування, яка зараз широко практикується у наукових журналах.



1 грудня 1898 р. данський інженер Вальдемар Поульсен (1869-1942 рр.) запатентував перший прилад для магнітного запису звуку – телеграфон. У першому приладі використовувався металевий (сталевий) дріт як носій. У 1928 р. в Німеччині з'явилась магнітна стрічка, але базовий принцип аналогового запису звуку не змінився: з підсилювача сигнал подається на записувальну головку, повз яку з постійною швидкістю переміщується носій (стрічка або дріт), у результаті чого носій намагнічується відповідно до звукового сигналу. При відтворенні звуку носій з тією ж швидкістю протягується повз головку відтворення. У середині XX століття з'явився магнітографічний метод неруйнівного контролю, заснований на магнітному запису на стрічку.





6–7 грудня 1994 р. в одній з аудиторій корпусу 20 Київського політехнічного інституту було проведено першу в Україні виставку засобів неруйнівного контролю. Організаторами виставки були кафедра «Прилади і системи неруйнівного контролю» КПІ (проф. С.М. Маєвський) та НВФ «Ультракон» (В.І. Павлій, І.В. Павлій). На виставці було продемонстровано засоби ультразвукового, магнітного, вихрострумового, капілярного контролю, товщинометрії, твердометрії, вібродіагностики тощо. Одночасно з виставкою було проведено семінар, де виступили розробники з Києва, Харкова, Дніпра, Донецька, Львова, Миколаєва і Сєверодонецька.



17 грудня 1897 р. на Харківському паровозобудівному заводі збудували перший український паровоз (останній у Харкові випустили у 1968 р.). Підприємство засноване 1895 р. поруч із харківським Балашовським вокзалом як паровозобудівний завод, і було одним із найбільших у Російській імперії та СРСР. Згодом стали випускати двигуни (з 1911 р.; зокрема, дизель-генератори), сільськогосподарську (1909 р.) та вугледобувну техніку (з 1922 р.; зокрема, рудникові електровози), трактори (1924 р.), тепловози, танки та тягачі (1927 р.). Нині ДП «Завод імені В. О. Малишева» пропонує і реалізує на зовнішньому ринку бронетехніку: основні бойові танки Т-84У «Оплот», бронетранспортери БТР-3 та БТР-4, здійснює модернізацію танків, випущених у колишньому СРСР – Т-54, Т-55, Т-62, Т-64, Т-72, Т-80; бронетранспортерів – БТР-60, БТР-70.



21 грудня 1928 р. Президент США Джон Калвін Кулідж (1872–1933 рр.) підписав білль, що дав змогу здійснити проект будівництва залізобетонної греблі на річці Колорадо. Перша електрика була вироблена генераторами станції вже через вісім років. Гребля Гувера (так вона названа на честь 31-го президента США, який відіграв важливу роль у її спорудженні) – унікальна гідротехнічна арочна споруда заввишки 221 м. Вода до турбін гідроелектростанції надходить з висоти 100 м крізь сталеві циліндричні колодязі, зібрані зі зварних сегментів. Греблю включено до Національного реєстру історичних місць США.



22 грудня 1895 р. німецький фізик Вільгельм Рентген опромінив руку своєї дружини «Х-променями», отримавши один із перших рентгенівських знімків. Рентген 8.11.1895 р. відкрив короткохвильове електромагнітне випромінювання, відоме нині як рентгенівське проміння – досягнення, завдяки якому отримав першу Нобелівську премію з фізики у 1901 р. Його відкриття мало величезний вплив на подальший розвиток фізики, зокрема призвело до виявлення радіоактивності та сприяло швидкому практичному застосуванню винаходу у медицині та техніці. На сьогодні радіаційний контроль (радіографічний, радіометричний, радіоскопічний) є основним методом діагностування металопродукції.



23 грудня 1913 р. відбувся перший політ літака Ігоря Сікорського «Ілля Муромець». Це загальна назва декількох серій чотиримоторних біпланів, що випускалися в Російській імперії на Російсько-Балтійському вагонному заводі протягом 1913–1918 рр. Уперше в світовій практиці в даних літаках був застосований суцільний фюзеляж, який містить кабінку в обтічному корпусі. Цей літак поставив низку рекордів: вантажопідйомності, кількості пасажирів, часу і максимальної висоти польоту. Є першим у світі бомбардувальником, який вироблявся масово. Першими пілотами повітряних кораблів стали інструктори Гатчинської авіашколи. Пілотуванню їх вчив особисто конструктор Ігор Сікорський на кораблі «Київському», який згодом став навчальним.



24 грудня 1993 р. в Києві на установчій конференції проголошено створення Української асоціації фахівців з неруйнівного контролю «ОКО». Головною метою її діяльності названо вирішення питань контролю якості продукції, оцінки технічного стану обладнання підприємств, а також забезпечення підприємств засобами контролю. Президентом обраний проф. І.П. Білокур. У наступні роки Асоціацію «ОКО» було реформатовано. Вона об'єднала провідні підприємства України в розробці засобів неруйнівного контролю: ТОВ «Ультракон-Сервіс», ТОВ «Промприлад», ПрАТ УкрНДІНК. На сьогодні Асоціацію «ОКО» очолює Т.М. Луценко.