

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

А.Я. Недосєка (заст. гол. ред.),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, С.А. Недосєка,

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) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2021

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

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

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

За зміст рекламних матеріалів

редакція журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

Спільна навчально-наукова лабораторія зварювання та
споріднених процесів 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

УЧАНІН В.М. Оптимізація конструкції вихрострумowego
перетворювача параметричного типу для виявлення
поверхневих тріщин 11

*УСОВ В.В., РАБКІНА М.Д., ШКАТУЛЯК Н.М., РИБАК Н.І.,
ШТОФЕЛЬ О.О.* Застосування фрактального аналізу при
діагностиці технічного стану елементів металоконструкцій 22

*НЕДОСЄКА С.А., НЕДОСЄКА А.Я., ЯРЕМЕНКО М.А.,
БОЙЧУК О.І., ОВСІЄНКО М.А.* Оцінка можливості засто-
сування зміни розподілу параметрів акустичної емісії для
удосконалення визначення стану матеріалів 31

*КАЛЕНИЧЕНКО Ю.О., БАЖЕНОВ В.Г., РАЦЕБАР-
СЬКИЙ С.С., КАЛЕНИЧЕНКО О.Г.* Автоматизований
неруйнівний контроль мікроструктури сталевих сплавів
на базі багаточастотного вихрострумowego методу 39

*РЕДЬКА М.О., КУЦ Ю.В., ШАПОВАЛОВ Є.В., УЧАНІН В.М.,
ЛИСЕНКО Ю.Ю., БЛИЗНЮК О.Д.* Застосування фазових
характеристик сигналу в автоматизований вихрострумовой
дефектоскопії 45

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

DAHLSTROM R. Літаючі роботизовані контактні ультразву-
вові товщиноміри для технічних обстежень в польових
умовах 54

ІНФОРМАЦІЯ

З.Т. Назарчуку – 70 60

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»

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) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration
of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2021

Subscription index 74475.

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

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

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

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

CONTENT

Joint Training-Scientific Laboratory for Welding and Related
Processes 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

UCHANIN V.M. Optimization of the design of eddy current
probe of parametric type to detect surface cracks 11

**USOV V.V., RABKINA M.D., SHKATULYAK N.M., RYBAK N.I.,
STOFEL O.O.** Application of fractal analysis in diagnostics of
technical condition of metal structure elements 22

**NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A.YA., YAREMENKO M.A.,
BOICHUK O.I., OVSIENKO M.A.** Evaluation of the possibility
of applying a change in the distribution of acoustic emission
parameters to improve determination of material state 31

**KALENYCHENKO Yu.O., BAZHENOV V.G.,
RATSEBARSKIY S.S., KALENYCHENKO O.G.** Automated
non-destructive testing of steel alloys microstructure based
on multifrequency eddy current method 39

**REDKA M.O., KUTZ Yu.V., SHAPOVALOVA V., UCHANIN V.M.,
LYSENKO Yu.Yu., BLIZNYUK O.D.** Application of phase
characteristics of the signal in automated eddy current flaw
detection 45

INDUSTRIAL

DAHLSTROM R. Aerial robots for contact-based ultrasonic
thickness measurements for field inspections 54

INFORMATION

Z.T. Nazarchuk is 70 60

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

СПІЛЬНА НАВЧАЛЬНО-НАУКОВА ЛАБОРАТОРІЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ

Сучасні умови розвитку прогресивних технологій потребують інтеграції певних процесів для одержання нової якості продукції. Базовою умовою таких інтеграційних процесів є поєднання наукового досвіду дослідників, які працюють в різних наукових підрозділах над близькими задачами. Такий підхід дозволяє більш повно аналізувати та розв'язувати проблеми, що постають перед дослідниками через невинний плин науково-технічного прогресу.

Необхідність поєднання зусиль науковців при вирішенні задач плазмового і гібридного зварювання та адитивних дугових технологій постала вже досить давно. Кілька десятиріч тому ця необхідність призвела до інтенсивного розвитку й розгалуженню діяльності Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. Проте сучасні реалії потребують пошуку нових підходів. У 2017 р. основа для їх створення була знайдена. За ініціативою Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та при підтримці академіка Б.Є. Патона п'ять науково-технічних організацій взяли участь у створенні спільної навчально-наукової лабораторії зварювання та споріднених процесів. До складу засновників увійшли:

- Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України;
- Зовнішньо-економічне представництво Китайсько-українського інституту зварювання ім. Є.О. Патона;
- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР»;
- Корпорація «Укрспецтехнології».

Створення спільної навчально-наукової лабораторії, при підтримці академіка Б.Є. Патона, було юридично оформлено угодою про співробітництво №2500/17-0 від 13.06.2019.

Мета створення лабораторії – побудова науково-технологічної експериментальної бази колективного користування із залученням найбільш передового обладнання для проведення науково-дослідних робіт в галузях плазмових, лазерних і гібридних технологій зварювання та споріднених процесів, адитивних технологій, дифузійного зварювання та паяння.

Для досягнення цієї мети планується вирішення наступних завдань:

1. Створення нових форм науково-технічної кооперації шляхом об'єднання створення наукової експериментальної бази колективного користування із залученням сучасного обладнання для проведення науково-дослідних робіт в галузях передових технологій зварювання та споріднених процесів із використанням матеріально-технічної бази науково-дослідних, учбових та науково-виробничих організацій.

2. Залучення інвестицій, в тому числі від іноземних партнерів.



Головний корпус НТУУ КПІ імені Ігоря Сікорського



Головний корпус Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона

3. Розширення міжнародного науково-технічного співробітництва та співробітництва між науково-дослідними установами і промисловими підприємствами в Україні, залучення провідних українських та міжнародних вчених і спеціалістів до участі в науково-технічних розробках.

4. Виховання наукових кадрів, залучення студентів закладів вищої освіти України бакалаврського, магістерського та Ph-D рівнів навчання до участі в реальних науково-технічних та виробничих проєктах.

В даний час структура спільної лабораторії включає дві експериментально-технологічні площадки: «Плазмове і гібридне зварювання та адитивних дугових технологій» (Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона КНУ імені Ігоря Сікорського) та «Демонстраційно-технологічна дільниця плаз-

мових, гібридних та адитивних технологій» (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР», Зовнішньо-економічне представництво Китайсько-українського інституту зварювання ім. Є.О. Патона). Науковий керівник спільної лабораторії – чл.-кор. Національної академії наук України, д-р техн. наук професор В.М. Коржик.

В рамках Угод про співробітництво, укладених із Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вказана спільна лабораторія є базою для міжнародного науково-технічного співробітництва із Науково-дослідним інститутом зварювальних технологій в провінції Чжецзян (КНР) та Чжецзянським науково-дослідним Інститутом спеціального обладнання (КНР).



Рис.1. Зовнішній вигляд вакуумної камери (а) та плазмотрону (модель (б) і виготовлений за нею зразок (в)) для зварювання плазмове-емісійним розрядом у вакуумі

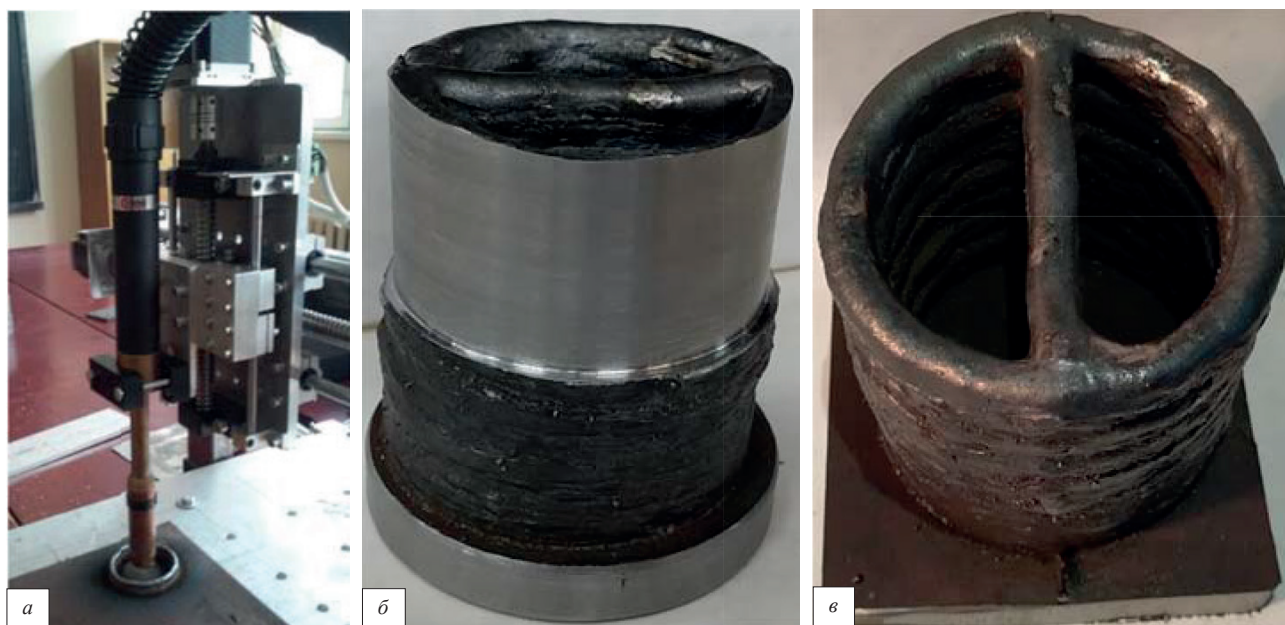


Рис.2. Головка (а) з плавким електродом для адитивного вирощування деталей із внутрішніми ребрами жорсткості (б, в)

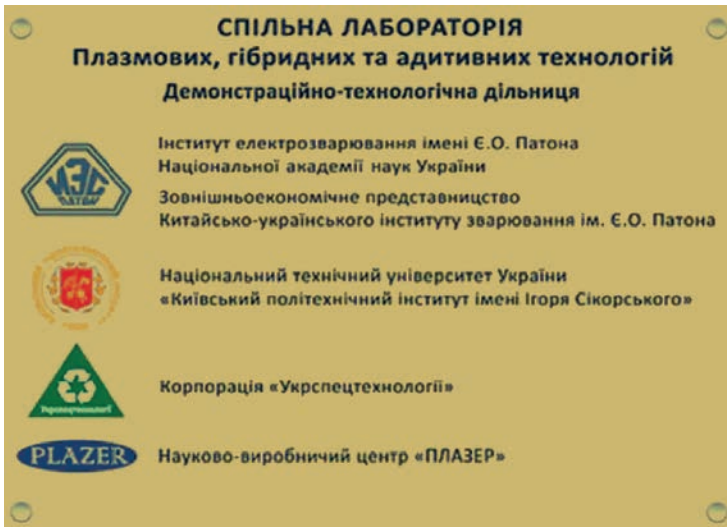


Рис. 3. Макет титульної дошки демонстраційно-технологічної дільниці та її відкриття міжнародним науково-дослідним колективом

В Лабораторії плазмового і гібридного зварювання та адитивних дугових технологій проводяться дослідження по розробці та подальшому розвитку таких прогресивних процесів, як:

- зварювання плазмово-емісійним розрядом постійним струмом прямої полярності порожнинним катодом у вакуумі;
- дифузійне зварювання у вакуумі;
- паяння у вакуумі;
- адитивне вирощування деталей за допомогою плавкого електрода.

Для виконання досліджень створено комплекси відповідного вакуумного обладнання (рис.1). Дослідження плазмово-емісійного розряду (плаз-

мо-дугового розряду з порожнинним катодом) у вакуумі довели можливість його успішного використання при зварюванні титанових сплавів товщиною до 16 мм без розробки крайок. При цьому одержані шви за якістю і продуктивністю виконання наближаються до результатів, отриманих електронно-променевим зварюванням при значно меншій собівартості.

Також в даному підрозділі спільної лабораторії досліджується адитивне вирощування деталей за допомогою плавкого електрода. Зокрема, розроблюються технології виготовлення металевих деталей складної просторової форми із внутрішніми ребрами жорсткості (рис.2).



Рис. 4. Одне з лабораторних приміщень демонстраційно-технологічної дільниці

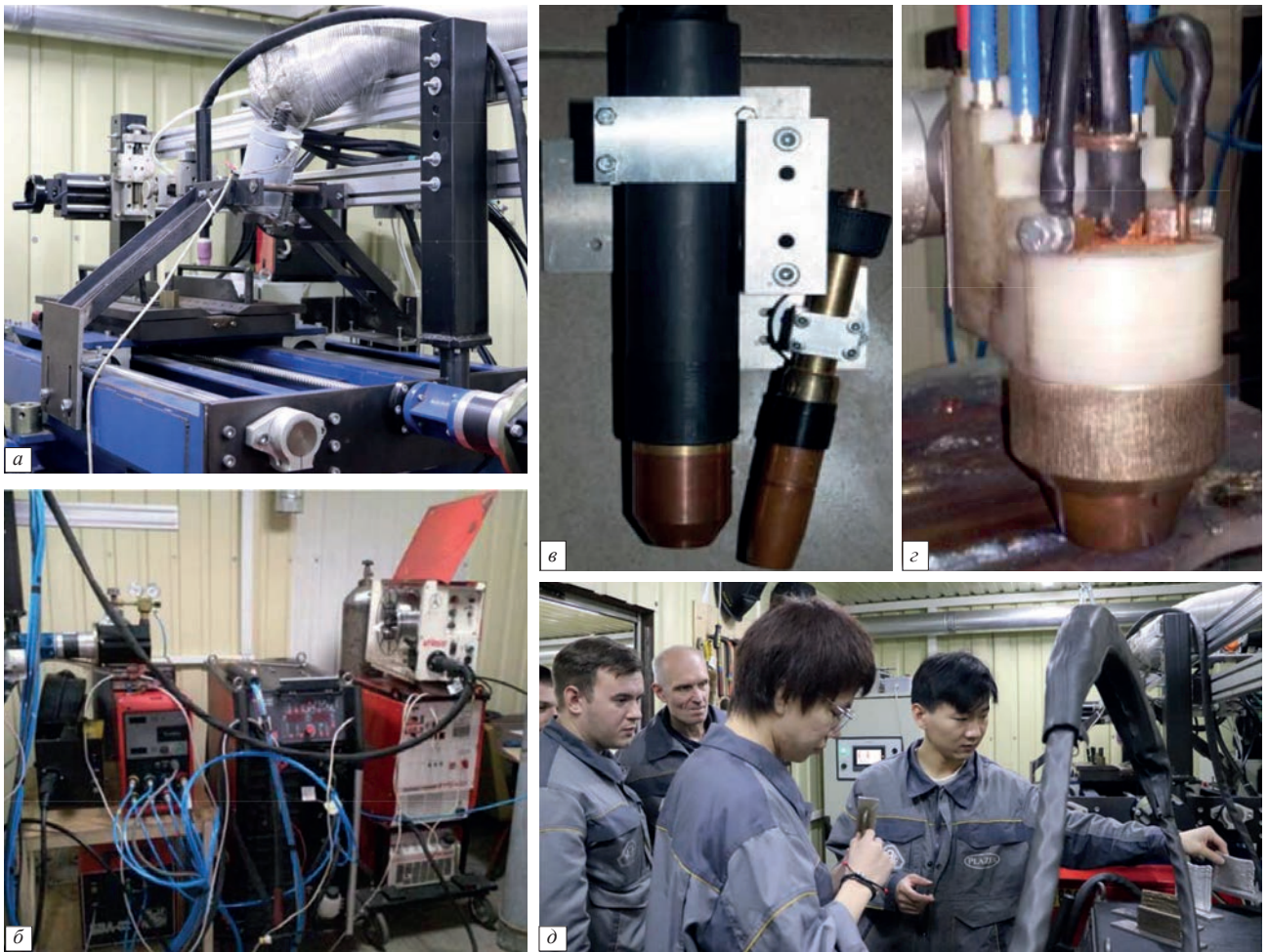


Рис. 5. Універсальний технологічний комплекс плазово-дугових та гібридних технологій, автоматичного комбінованого і гібридного зварювання «плазма + дуга плавкого електрода»: а – маніпулятор для зварювання в різних просторових положеннях; б – зварювальне обладнання; в – моноблок комбінованого Plasma+MIG/MAG зварювання; г – плазмотрон для гібридного Plasma-MIG/MAG зварювання; д - ознайомлення з обладнанням та технологією іноземних партнерів в рамках міжнародного науково-технічного співробітництва

На Демонстраційно-технологічній дільниці плазових, гібридних та адитивних технологій (рис.3) виконується розробка таких технологій, як:

- роботизоване шовне і точкове плазове зварювання постійним струмом прямої полярності;
- роботизоване шовне і точкове плазове зварювання різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих та магнієвих сплавів;
- роботизоване (автоматизоване) плазово-пошккове наплавлення постійним струмом прямої полярності та різнополярним асиметричним струмом (для алюмінієвих та магнієвих сплавів);
- роботизоване (автоматизоване) зварювання в режимі «м'яка плазма» постійним струмом прямої полярності та різнополярним асиметричним струмом (для алюмінієвих та магнієвих сплавів);
- роботизоване (автоматизоване) зварювання та наплавлення за допомогою процесу зварювання плавким електродом із короткими замиканнями (CMT - Cold Metal Transfer);
- роботизоване (автоматизоване) аргонодугове зварювання постійним струмом прямої поляр-

ності та різнополярним асиметричним струмом (для алюмінієвих та магнієвих сплавів);

- лазерне зварювання в контрольованій атмосфері та в динамічному вакуумі;
- роботизоване (автоматизоване) лазерне різання і зварювання;
- гібридні процеси зварювання (плазма-MIG/MAG, плазма-TIG, лазер-плазма, лазер-MIG/MAG, лазер-TIG);
- гібридне лазерно-плазове різання;
- плазове різання на зворотній полярності металевих листів підвищених товщин;
- плазове різання із різними типами плазмотворюючих газів і з добавкою води;
- надзвукове плазове порошкове напилювання покриттів;
- високошвидкісне плазово-дугове напилювання покриттів струмопровідними дротами;
- високошвидкісне електродугове дводротове напилювання покриттів із активацією вуглеводневими газами;

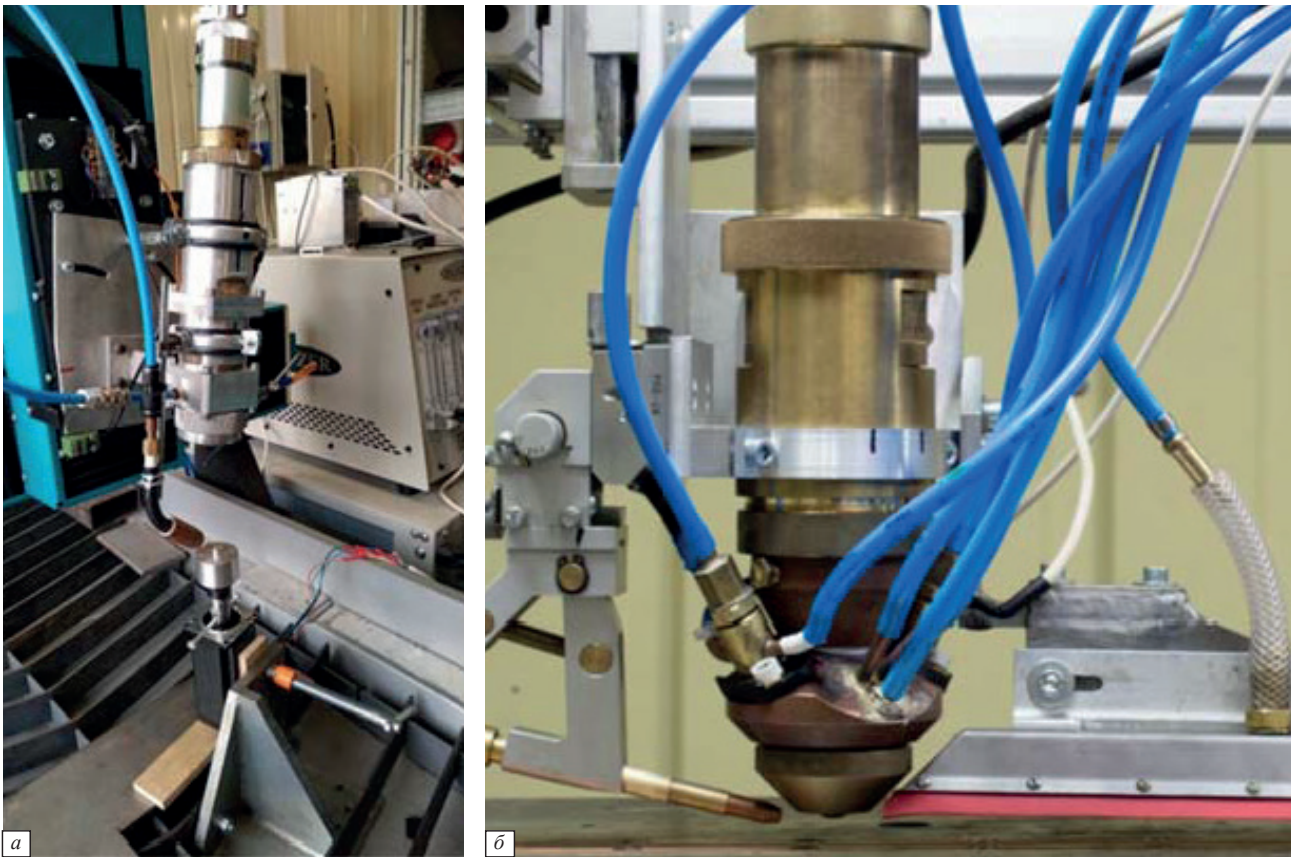


Рис. 6. Створені в спільній лабораторії головки для лазерного (а) і гібридного лазерно-плазмового зварювання (б)

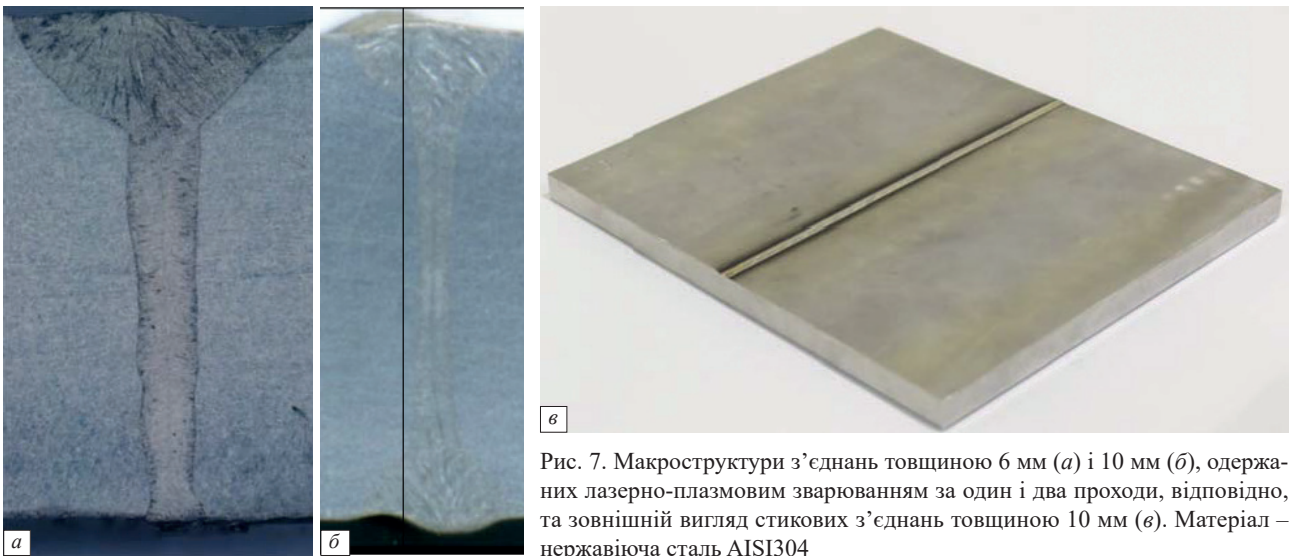


Рис. 7. Макроструктури з'єднань товщиною 6 мм (а) і 10 мм (б), одержаних лазерно-плазмовим зварюванням за один і два проходи, відповідно, та зовнішній вигляд стикових з'єднань товщиною 10 мм (в). Матеріал – нержавіюча сталь AISI304

- гібридне надзвукове електродугове-газополуменеве дводротове напилювання покриттів;
- надзвукове газополуменеве напилювання покриттів порошками та дротами (HVOF);
- плазмові технології сферодизації порошків;
- вирощування тривимірних виробів адитивним пошаровим мікроплазмовим, плазмовим та дуговим наплавленням (3D-друк).

Для дослідження зазначених технологій наявні відповідні лабораторні приміщення із необхідним технологічним обладнанням (рис. 4). Також передбачено офісні приміщення, сучас-

ний конференц-зал з можливістю проведення он-лайн конференцій, ділянки механічної обробки з фрезерним і токарним верстатами, побутові та складські приміщення тощо. Зокрема, демонстраційно-технологічна дільниця плазмово-дугових та гібридних технологій була сертифікована Сертифікатом на систему менеджменту якості ISO 9001:2015.

Окремо слід відмітити інноваційні гібридні технології, що розробляються на демонстраційно-технологічній дільниці. Так, розроблені обладнання і технології автоматичного та роботи-



Рис. 8. Універсальний технологічний комплекс лазерного та гібридного лазерно-плазмового різання



Рис. 9. Комплекс для лазерного, мікроплазмового і лазерно-мікроплазмового зварювання в контрольованій атмосфері та в динамічному вакуумі



Рис. 10. Зовнішній вигляд установки (а) і процесу (б) мікроплазмового 3D-друку порошковими матеріалами

зованого комбінованого (Plasma+MIG/MAG) і гібридного (Plasma-MIG/MAG) зварювання стисненою дугою неплавкого електрода із дугою плавкого електрода дозволяють з'єднувати листи алюмінієвих сплавів товщиною до 16 мм за один прохід, мінімізувати схильність до утворення внутрішніх пор в швах, підвищувати продуктивність зварювання за рахунок усунення операції розробки крайок, підвищувати швидкість зварювання до 2 разів порівняно із традиційним MIG/MAG-зварюванням (рис. 5).

Створене в спільній лабораторії обладнання і технології лазерного та гібридного лазер-

но-плазмового зварювання дозволяють одержувати з'єднання сталей і сплавів з високою термічною локальністю і швидкістю зварювання. Яскравим прикладом досягнень в галузі лазерно-плазмового зварювання є одержання одно- і двопрхідних стикових з'єднань нержавіючої сталі AISI304 товщиною 6 і 10 мм, відповідно, зі швидкістю 60 м/год. при використанні потужності випромінювання волоконного лазера 1,8 кВт (рис. 6, 7).

До перспективних технологічних розробок, створених на базі спільної лабораторії, можна віднести універсальний технологічний ком-

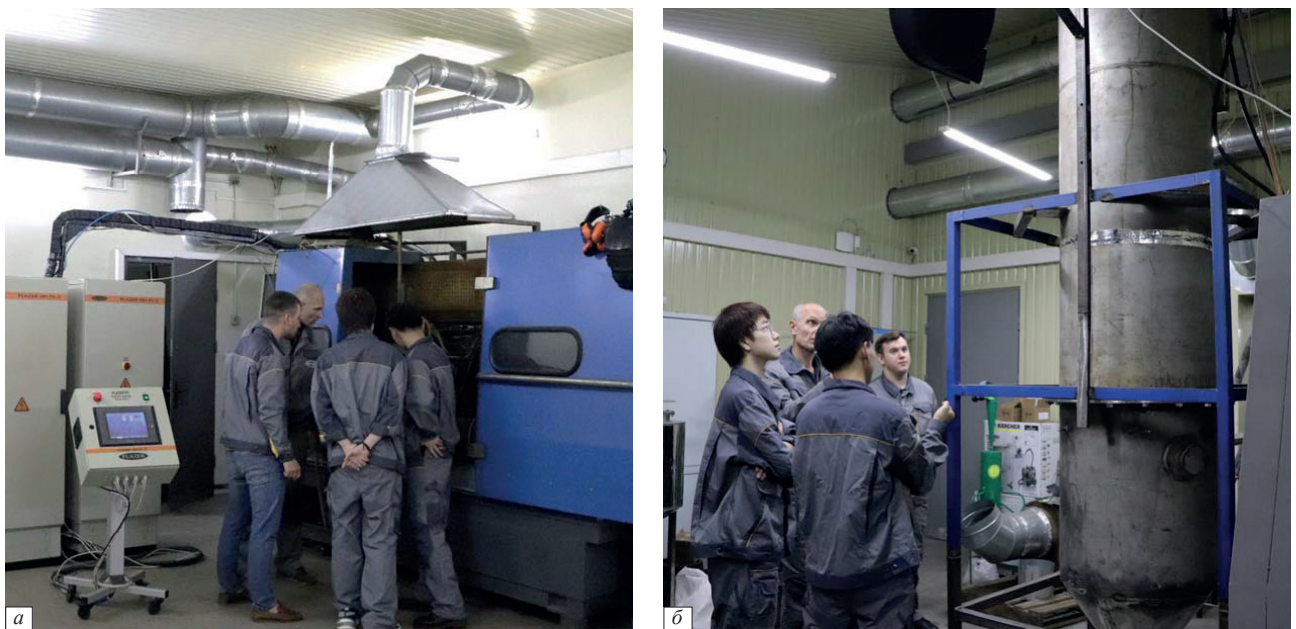


Рис. 11. Обладнання для реалізації плазмово-дугових технологій нанесення покриттів та обробки матеріалів: а – універсальний технологічний комплекс плазмово-дугового напилювання та різання; б – дослідна установка для плазмово-дугової сфероїзації дротових матеріалів та прутків і порошоків неправильної форми



Рис. 12. Ознайомлення директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона академіка НАНУ І.В. Кривцуна з можливостями спільної лабораторії

плекс лазерного і гібридного лазерно-плазмового різання (рис. 8), лазерного, мікроплазмового і лазерно-мікроплазмового зварювання в контрольованій атмосфері та в динамічному вакуумі (рис. 9), установку (3D-принтер) для 3D-друку порошковим мікроплазмовим пошаровим наплавленням (рис. 10).

Наразі активно продовжуються роботи по розробці та індустріалізації плазмово-дугових технологій напилювання покриттів та обробки матеріалів, отримання сферичних порошків плазмово-дуговим розпилюванням дротів та прутків, плазмово-дугова сферодизація порошків неправильної форми. З цією метою створено необхідне обладнання і технологічна база (рис. 11).

Після відкриття спільної лабораторії її демонстраційно-технологічну дільницю відвідали провідні співробітники НАН України, зокрема, академіки НАНУ І.В. Кривцун і Л.М. Лобанов (рис. 12). Ними було схвалено технічне оснащення лабораторії та надано високу оцінку науково-технічним розробкам, що в даний час проводяться її співробітниками. В подальшому плануються відвідання спільної лабораторії делегаціями закордонних науковців і менеджерів, які

мають зацікавленість у науковому співробітництві та промислового впровадженні розроблених технологій.

Керівництво спільної лабораторії пропонує застосування описаного передового інноваційного обладнання усіма бажаними науковими дослідниками, студентами і аспірантами. Дослідження можуть проводитися як в межах спільних проєктів, так і за окремими договорами. Окремим завданням є навчання студентів та аспірантів. Лабораторія радо відчиняє двері не лише вітчизняним учням, але й закордонним – усім бажаним підвищити власну кваліфікацію в рамках виконання спільних проєктів та програм. Для цього можуть бути задіяні як спеціалісти лабораторії, так і сторонні спеціалісти. Останні можуть залучатися на окремо встановлених засадах. В цілому, спільна навчально-наукова лабораторія побудована як науково-технологічна експериментальна база колективного користування. Накопичений передовий досвід і наявне інноваційне обладнання спрямовані для залучення в проведенні науково-дослідних робіт в галузях передових технологій зварювання та споріднених процесів.

В.М. Коржик¹, В.В. Квасницький^{1,2}, В.Ю. Хаскін¹

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,

²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПАРАМЕТРИЧНОГО ТИПУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ТРІЩИН

В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5.

E-mail: vuchanin@gmail.com

У роботі узагальнено результати досліджень щодо оптимізації конструкції параметричних ВСП, які призначені для виявлення поверхневих дефектів. Показано, що вибір діаметра ВСП суттєво залежить від найменшої довжини тріщин, які необхідно виявляти. Зокрема визначено, що для виявлення тріщини завдовжки більше 2 мм оптимальним є використання ВСП з обмотками, встановленими на ФО діаметром 1,2 мм. Для виявлення коротших тріщин завдовжки більше 1 мм необхідно використовувати ВСП з обмотками на ФО діаметром 0,75 мм. Проаналізовано вплив параметрів ФО (довжини, магнітної проникності та відступу обмотки від кінця ФО) на ефективність параметричних ВСП, що необхідно використати для їх оптимізації. Проаналізовано умови розділення впливу дефекту та зазору шляхом інтерпретації сигналів в комплексній площині та показано можливість їх розділення для розроблених ВСП для всіх немагнітних конструкційних сплавів. Представлено конструкцію параметричного ВСП, яка дозволяє збільшити їх добротність більше ніж у 2 рази та розглянуто питання оптимального вибору з'єднувального кабелю для підключення ВСП до ВД. Проведено випробування оптимізованого параметричного ВСП, які підтвердили його високу чутливість до коротких тріщин завдовжки більше 2 мм з надійним розділенням впливу дефекту і зазору. Бібліогр. 21, табл. 2, рис. 12.

Ключові слова: вихрострумний неруйнівний контроль, поверхнева тріщина, вихрострумний перетворювач, феритове осердя

Вступ і стан проблеми. Останні десятиріччя вихрострумний метод займає чільне місце серед найпоширеніших методів неруйнівного контролю, які забезпечують виявлення поверхневих дефектів (наприклад, втомних тріщин) у металевих конструкціях без контакту з контрольованою поверхнею або навіть через діелектричне покриття [1–9]. Зазначимо в якості безальтернативного прикладу, що тільки мініатюрні вихрострумні перетворювачі (ВСП) можуть надійно виявити тріщини у важкодоступних місцях авіаційних конструкцій, зокрема, розташованих на бічній стінці заклепкових отворів, де тріщини зазвичай утворюються через концентрацію механічних напружень [1, 7]. У той же час методам вихрострумової дефектоскопії притаманна чутливість до низки факторів (окрім дефектів), які суттєво впливають на вихідний сигнал ВСП. Ці фактори включають зміни електропровідності та магнітної проникності досліджуваного матеріалу, варіації геометричних параметрів чи зазору між ВСП і поверхнею об'єкта контролю (ОК). Досвідчені оператори шукають можливості усунути або зменшити ці завади для досягнення достовірних результатів контролю. Зміни зазору або нахилу ВСП є особливо небезпечними для ручного вихрострумного контролю, коли під час сканування змінюється положення ВСП відносно ОК. Зміни зазору, викликані різною шорсткістю поверхні ОК або зміною товщини ді-

електричного покриття, також можуть призвести до помилкових рішень про наявність дефектів. Тому для надійного виявлення дефектів важливо зменшити вплив зміни зазору. Зазвичай в конструкціях важко виявити короткі (навіть глибокі) дефекти, такі, як корозійні язви та неглибокі (навіть довгі) тріщини. Тому розвиток технологій контролю спрямовано на покращення можливостей виявлення коротких і неглибоких дефектів з високою достовірністю на основі зменшення впливу завад різної фізичної природи. Достовірність контролю оцінюють імовірністю виявлення дефектів як кількісного показника, заснованого на статистиці. Навіть для одного й того ж обладнання на ймовірність виявлення дефектів впливають кілька факторів, таких, як властивості матеріалу ОК, тип і розміри дефекту, умови контролю тощо.

Важливими складовими методики виявлення поверхневих тріщин є вибір типу та геометричних параметрів ВСП для надійного виявлення тріщин, розміри яких характеризують поріг чутливості, та проста інтерпретація сигналу, що дозволяє відокремити корисні сигнали, створені тріщинами, від сигналів, пов'язаних з такими факторами, як зазор або вплив краю [1, 5, 7, 9]. Для більшості методик вихрострумного контролю вважається достатнім надійно виявляти тріщини завдовжки більше 2 мм і завглибшки більше 0,2 мм, що визначає поріг чутливості вихрострумних дефектоскопів (ВД). Такий дефект необхідно надійно виявляти через діелектричне покриття товщиною до 0,5 мм. У

цьому випадку захищені антикорозійним покриттям елементи конструкції будуть контролюватися без коштовної процедури його видалення. Але для контролю деталей авіаційних двигунів перспективним завданням є можливість виявляти тріщини удвічі меншої довжини (близько 1 мм), для чого в принципі також можна використати вихрострумний метод за умови правильного вибору параметрів ВСП.

У роботах [1–8] розглянуто та проаналізовано різні типи ВСП, які можна застосувати для виявлення поверхневих тріщин. Для виявлення коротких поверхневих тріщин у режимі ручного сканування найзручнішим є використання найпростішого ВСП з однією одношаровою обмоткою, розташованою на циліндричному феритовому осерді (ФО) [1, 8, 10–13]. Важливою перевагою такого ВСП є незалежність його чутливості від напрямку тріщини, що дозволяє вибирати довільні траєкторії сканування без необхідності втримувати орієнтацію ВСП відносно напрямку ймовірної тріщини. Не менш важливими особливостями параметричних ВСП, що впливають на такий вибір, є простота конструкції, малий розмір, нескладність виконання вимог щодо повторюваності параметрів під час виробництва та низька ціна [1, 7, 8, 10, 11]. Такі ВСП традиційно використовують в автогенераторних ВД [8]. Крім того, ВСП з однією обмоткою використовують в ВД, що працюють в резонансному режимі, серед яких найпоширенішими є відомі ВД сімейства DEFECTOMETR (наприклад, DEFECTOMETR 2.837), розроблені в Німеччині інститутом доктора Ферстера (Institute Dr. Foerster GmbH & Co). У деяких ВД універсального типу, наприклад, ВД типу EDDYCON C виробництва НВФ «Промприлад» (Україна) або ВД типу ELOTEST M2 фірми Rohmann GmbH (Німеччина) резонансний режим використовується як додатковий.

Відомий традиційний підхід щодо визначення ефективності ВСП, при якому сканують поверхню стандартного зразка (СЗ) з дефектом і спостерігають обумовлений дефектом вихідний сигнал ВСП. Ефективність ВСП визначають за параметрами сигналу від дефекту, зокрема його амплітудою. Таку процедуру зазвичай використовують під час вибору оптимального ВСП і робочої частоти для рішення конкретної задачі дефектоскопії [1, 8, 14]. Подібна практика закладена також в європейський стандарт з визначення характеристик ВСП [15]. За такого підходу результати з оцінювання ефективності, виконані різними дослідниками, складно порівнювати, так як необхідно витримати умови експерименту. Зокрема для виготовлення СЗ необхідно використати матеріал з ідентичними електрофізичними характеристика-

ми та виконати дефект з ідентичними розмірами. Прогресивнішим є спосіб визначення ефективності ВСП, представлений американським бюро стандартів у роботах [16, 17], коли вимірюють імпеданс ВСП при розміщенні його на віддалі від СЗ (у «повітрі») та при встановленні на поверхню алюмінієвого СЗ. Ефективність ВСП оцінюють за різницею отриманих імпедансів. Недоліком цього способу є його залежність від вибраної робочої частоти, резонансної частоти та кількості витків обмоток ВСП, що обмежує його використання для визначення конструктивної ефективності ВСП незалежно від кількості витків і робочої частоти контролю.

Для кількісного оцінювання впливу різних конструкційних чинників на ефективність ВСП запропоновано використати безрозмірний коефіцієнт вихрострумної ефективності ξ (Учанін В.М. Спосіб визначення ефективності вихрострумних перетворювачів. України пат. 105072, 2014, Бюл. № 4). Було також визначено умови, необхідні для його дослідження, та показано інваріантні властивості коефіцієнта вихрострумної ефективності ξ для обмоток без ФО щодо діаметра обмотки та кількості витків [18]. Опрацьовано методику розрахунків ефективності ξ ВСП для різних ВСП (у тому числі з ФО) методом об'ємних інтегральних рівнянь [12, 13, 19] за допомогою програми VIC-3D [20].

У цій роботі узагальнено результати низки досліджень і розробок, пов'язаних з оптимальним вибором конструкційних і електричних параметрів найпростіших ВСП параметричного типу, які найчастіше використовують для виявлення поверхневих дефектів.

1. Забезпечення порогу чутливості по довжині тріщини шляхом вибору діаметра обмотки параметричного ВСП. Вибір діаметра обмотки ВСП визначається довжиною найкоротшої тріщини, яку необхідно виявляти. Неоптимальний вибір розмірів ВСП може призвести до пропусків критичних дефектів або невиннованого збільшення витрат часу на проведення контролю. Крім того, аналіз особливостей сигналу ВСП для тріщини різної довжини необхідний для інтерпретації результатів контролю. Для вибору діаметра обмотки ВСП використаємо результати роботи, в якій методом об'ємних інтегралів досліджено просторовий розподіл сигналу, створеного тріщинами різної довжини [9]. Під час моделювання тріщина розміщувалась в центрі системи координат: координата X відповідала поперечному відносно тріщини напрямку, координата Y – напрямку вздовж тріщини. Параметри обмотки ВСП наступні: середній діаметр обмотки D_c , товщина обмотки (різниця між зовнішнім і внутрішнім радіусами) Δr і

висота обмотки l_o . Сигнал від тріщини розраховували у вигляді внесеної дефектом модуля $Z_{\text{тр}}$ імпедансу ВСП, який нормували до модуля імпедансу ВСП $Z_{\text{ок}}$ під час встановлення на бездефектній частині ОК: $Z'_{\text{тр}} = \Delta Z / Z_{\text{ок}}$. Довжину тріщини та координати ВСП нормували до середнього діаметра обмотки ВСП: приведена довжина тріщини $l'_{\text{тр}} = l_{\text{тр}} / D_c$, приведена координата ВСП вздовж тріщини y' / D_c .

Під час розробки процедур вихрострумового контролю часто враховують інформацію про напрямок можливого поширення тріщин, які в реальних конструкціях визначаються діючими механічними напруженнями. Це дозволяє проводити сканування в поперечному відносно тріщини напрямку, що відповідає розподілу амплітуди сигналу ВСП по координаті X (рис. 1), який отримано для сканування через середину ($y' = 0$) чотирьох

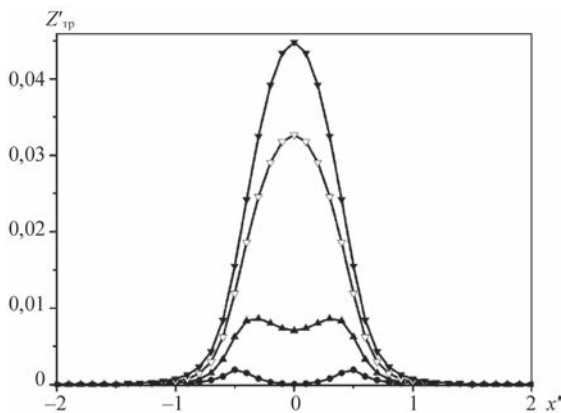
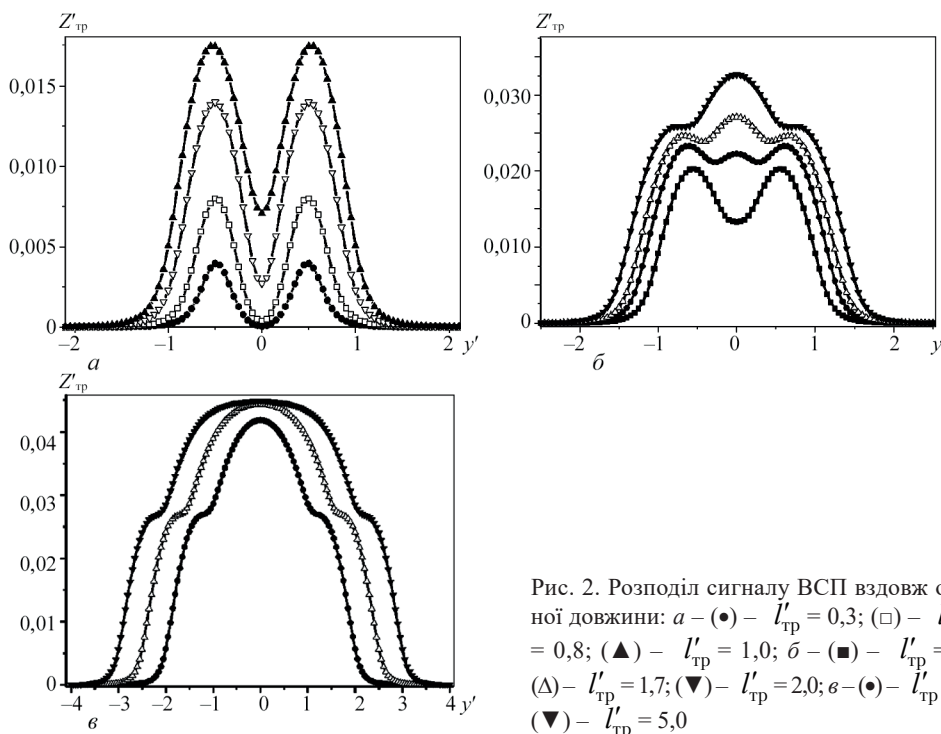


Рис. 1. Зміни сигналу ВСП під час сканування впоперек тріщин з приведеними довжинами: (●) – $l'_{\text{тр}} = 0,3$; (▲) – $l'_{\text{тр}} = 1,0$; (▼) – $l'_{\text{тр}} = 2,0$; (■) – $l'_{\text{тр}} = 5,0$



тріщин різної приведеної довжини ($l'_{\text{тр}} = 0,3; 1,0; 2,0$ і $5,0$). Видно, що залежність сигналу ВСП для коротких тріщин $l'_{\text{тр}} < 0,3$ має два максимуми, а при розташуванні ВСП над центром такої тріщини сигнал може досягати нуля при розташуванні ВСП над центром тріщини ($x' = 0$). Але зі збільшенням довжини тріщин максимальне значення амплітуди сигналу від тріщини спостерігається саме під час розташування ВСП безпосередньо над дефектом ($x' = 0$). За такого сканування максимум є достатньо «гострим», коли сигнал ВСП від дефекту на незначній відстані, що близька до одного діаметру обмотки ВСП, швидко зростає до максимуму, а після проходження максимуму так само швидко зменшується. Така особливість дозволяє оператору-дефектоскопісту впевнено відрізнити сигнал від дефекту від можливих завад, вплив яких призводить до повільніших змін сигналу під час сканування. Власне ця особливість і надає такому скануванню певні переваги.

Розподіли сигналу ВСП під час сканування вздовж тріщини по осі Y за умови збереження центрального положення ВСП відносно середньої площини тріщини наведено на рис. 2. Зазначимо, що максимуми сигналу ВСП при проведенні впорядкованого поперечного сканування в різних перерізах тріщини (при різних координатах y) також утворюють профіль, подібний за розподіли на рис. 2. Отримані залежності дозволяють дослідити, за якого розташування ВСП відносно тріщини ми маємо максимальні значення сигналів та можливі «провали» чутливості («мертві» зони).

Аналіз отриманих розподілів (рис. 2) показує їх суттєву залежність від співвідношення довжи-

ни тріщини до діаметру ВСП, тобто приведеної довжини тріщини $l'_{\text{тр}}$. При цьому змінюються не тільки амплітудні характеристики сигналу ВСП, а і загальний вигляд розподілів сигналу. Це спонукає розподіли сигналу для тріщин різної довжини аналізувати окремо.

Для початку розглянемо найцікавіший випадок коротких тріщин, під якими умовно будемо розуміти тріщини з приведеною довжиною $l'_{\text{тр}} < 1,2$. Для коротких тріщини розподіл сигналу ВСП має двогорбий симетричний характер сигналу з мінімумом при розміщенні ВСП безпосередньо над тріщиною (при $y = 0$). Для дуже короткої тріщини (відносно розмірів ВСП) при $l'_{\text{тр}} < 0,3$ амплітуда під час розміщення тріщини по центру обмотки ВСП може досягати нуля. Це легко пояснити особливостями розподілу густини вихрових струмів ВСП, яка є максимальною безпосередньо під витками обмотки та загасає до нуля при наближенні до центру ВСП (так звана «мертва» зона). Тобто нульовий сигнал ВСП маємо у випадку, коли коротка тріщина розташована в центральній «мертвій» зоні ВСП і практично не впливає на перерозподіл вихрових струмів. В той же час максимального значення сигнал ВСП досягає, коли середина тріщини розташовується безпосередньо під витками ВСП і максимально впливає на вихрові струми. Звідси стає зрозумілим, чому для коротких тріщин з $l'_{\text{тр}} < 1,0$ відстань між максимумами приблизно дорівнює діаметру обмотки D_c , а в приведених координатах на рис. 2 дорівнює 1,0. Зі збільшенням довжини тріщини відстань між максимумами несуттєво збільшується (див. розподіл для $l'_{\text{тр}} = 1,2$ і $1,5$ на рис. 2, б), а значення амплітуди сигналу в точці мінімуму зростають. При $l'_{\text{тр}} = 1,5$ розподіл сигналу ВСП має вже три максимума, так як центральний мінімум поступово починає перероджуватись в максимум. З подальшим збільшенням довжини тріщини цей максимум зростає (див., наприклад, зміни сигналу для $l'_{\text{тр}} = 1,7$ на рис. 2, б).

При подальшому зростанні довжини тріщини розподіл сигналу ВСП має тільки один максимум при знаходженні ВСП безпосередньо по центру тріщини з двома симетричними майже горизонтальними ділянками по обидва боки. Важливо, що збільшення довжини тріщини починаючи від $l'_{\text{тр}} = 4,0$ вже не впливає на амплітуду сигналу в центральній частині розподілу. Зі зростанням приведеної довжини тріщини $l'_{\text{тр}}$ центральний максимум розширюється і утворюється горизонтальна ділянка (рис. 2, в). Встановлені особливості розподілу сигналу від тріщин різної довжини дозволили запропонувати новий спосіб визначення їх довжини, інваріантний відносно заданої чутливості контролю (див. Учанін В.М. Вихрострумівий

спосіб визначення довжини тріщин. України пат. 86505, 2009, Бюл. № 3).

«Провали» розподілів сигналів на рис. 1 і рис. 2, а дозволяють зробити висновок про можливість пропуску коротких тріщин за умови неправильного вибору діаметра ВСП і сканування через центр тріщини. Тут також можливе хибне трактування результатів, так як два максимума для короткої тріщини можна прийняти за сигнали від двох окремих дефектів. Розглянемо фізичне пояснення процесу формування характерного розподілу сигналу ВСП на прикладі тріщини з приведеною довжиною $l'_{\text{тр}} > 1,5$ (рис. 2, б). При переміщенні ВСП в зону тріщини починається поступове збільшення амплітуди сигналу. При подальшому переміщенні ВСП вздовж тріщини по осі Y початок тріщини входить в «мертву» зону, збільшення амплітуди сигналу ВСП уповільнюється і утворюється горизонтальна ділянка. Далі тріщина перетинає контур вихрових струмів з другої сторони ВСП і починається подальше зростання сигналу, який досягає максимуму безпосередньо над дефектом. При подальшому переміщенні ВСП в «мертву» зону попадає вже кінець тріщини і утворюється друга горизонтальна ділянка.

Представлені результати було використано для обґрунтування розмірів ВСП для контролю вузлів літаків, де було поставлено завдання виявляти тріщини завдовжки більше 2 мм [8]. Для цього оптимальним є ВСП з обмотками, встановленими на ФО діаметром 1,2 мм, що відповідає відносно рівномірному розподілу сигналу для $l'_{\text{тр}} > 1,7$ на рис. 2, б. Параметричний ВСП з ФО такого діаметру будемо детальніше аналізувати в наступному розділі на предмет оптимізації вибору параметрів ФО. Для виявлення коротких тріщин в деталях авіаційних двигунів завдовжки більше 1 мм зроблено ВСП з обмоткою, розташованою на ФО діаметром 0,75 мм.

2. Оптимізація параметрів феритового осердя параметричного ВСП. Взаємодія витків ВСП з матеріалом об'єкта контролю (ОК) суттєво зменшується залежно від їх відстані від поверхні ОК. Тому геометрія ВСП має суттєвий вплив на його чутливість [1, 16, 17]. Використання ФО має на меті збільшити електромагнітну взаємодію верхніх витків ВСП з матеріалом ОК. Тому оптимальний вибір конструкції ВСП з ФО є важливим етапом його створення. Серед конструкційних параметрів ВСП з ФО найсуттєвішими є діаметр D_{ϕ} і довжина l_{ϕ} ФО, довжина l_o обмотки (яка для одношарової обмотки визначається кількістю витків w і діаметром проводу d) та відступ (зміщення) l_b обмотки відносно кінця ФО (рис. 3).

Очевидно, що діаметр ФО D_{ϕ} у більшості випадків визначає діаметр обмотки ВСП, вибір яко-

го подано у попередньому розділі. Усі інші зазначені параметри ВСП з ФО (рис. 3) по різному впливають на роботу параметричного ВСП. Для кількісного оцінювання їх впливу скористаємось представленим вище коефіцієнтом вихрострумової ефективності ξ (далі – ефективність ξ). Для параметричних ВСП з однією обмоткою проаналізуємо вплив ФО на ефективність ξ залежно від кількості витків w , яку під час розрахунків змінювали від 1 до 100. Для порівняння визначена також ефективність ξ аналогічних обмоток ВСП без ФО. Досліджували залежність коефіцієнта ξ від кількості витків при встановленні обмотки безпосередньо на кінці ФО довжиною 10,0 мм з початковою магнітною проникністю (МП) матеріалу $\mu = 100, 600, 1200, 2000$ без зміщення ($l_0 = 0$). Розрахунки проводили для робочої частоти 10,0 МГц під час встановлення на мідний зразок, що відповідає умовам дослідження ефективності ξ [18]. Залежності ефективності ξ від кількості витків w для котушок без осердя та з ФО з різною початковою МП μ подано на рис. 4, а.

Отримані залежності (рис. 4, а) показують, що ефективність ξ для ВСП з одношаровою обмоткою, встановленою на ФО, суттєво збільшується порівняно з ВСП без осердя залежно від довжини обмотки (від кількості витків w) навіть за мі-

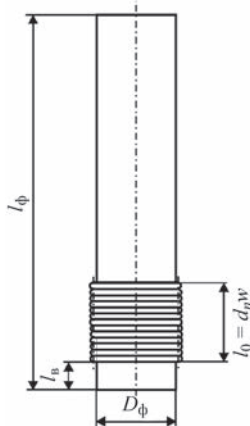


Рис. 3. Конструкція найпростішого ВСП з однією одношаровою обмоткою на ФО

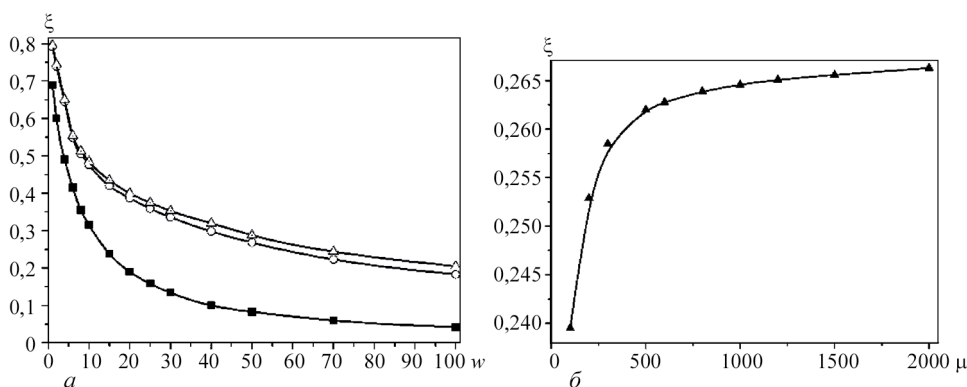


Рис. 4. Залежності ефективності ξ одношарового параметричного ВСП від кількості витків w за відсутності ФО (■) і з ФО з МП матеріалу $\mu = 100$ (○) і $\mu \geq 600$ (Δ) (а) і від початкової МП μ матеріалу ФО (б)

німального значення МП μ матеріалу ФО. У той же час цей ефект залежить від довжини обмотки, так як з її збільшенням ефективність ξ поступово зменшується. Отримані залежності ефективності ξ для МП $\mu = 100$ і 600 є досить близькими. Залежності ефективності ξ від кількості витків w (або довжини обмотки) для $\mu = 600, 1200$ і 2000 практично ідентичні. Це підтверджується залежністю ефективності ξ від початкової МП μ матеріалу ФО (рис. 4, б). Цю залежність розраховано для одношарової котушки, що складається з 25 витків, намотаних дротом діаметром 0,06 мм, розміщеним зі зміщенням 0,5 мм на ФО, що має діаметр 1,2 мм і довжину 7,0 мм. Подані на рис. 4, б результати показують, що зі збільшенням початкової МП μ від 100 до 2000 ефективність ξ збільшується з 0,24 до 0,27. Проте найбільше зростання ефективності ξ спостерігається на початковій ділянці залежності, коли МП ще не досягає значення $\mu = 500$. При подальшому збільшенні МП μ зростання ефективності ξ є несуттєвим.

Наступні залежності (рис. 5) дозволяють оцінити вплив на ефективність ξ ВСП довжини ФО та розташування на ньому обмотки. Для цього було пораховано ефективність ξ ВСП, одношарова обмотка якого складається з 25 витків, намотаних на ФО діаметром 1,2 мм. Як зазначено вище, ВСП такого діаметра є оптимальним для виявлення тріщин завдовжки 2 мм. Розрахунки проводилися для МП матеріалу осердя $\mu = 500$. Коефіцієнти ефективності ξ для параметричних ВСП з різною довжиною ФО були розраховані для обмотки, яка розміщена на кінці ФО без зміщення ($l_0 = 0$), і для обмотки, встановленої зі зміщенням $l_0 = 0,5$ мм (рис. 3). Ефективність ξ ВСП з аналогічною обмоткою без ФО також була розрахована і становила близько 0,025 (точка □ на рис. 5).

Наведені результати свідчать, що використання ФО суттєво збільшує ефективність параметричного ВСП. Для обмоток, розміщених на кінці ФО, коефіцієнти ξ збільшуються в 7 разів навіть для коротких ФО завдовжки 0,5 мм. Ефективність ξ ВСП зростає зі збільшенням довжини ФО. При

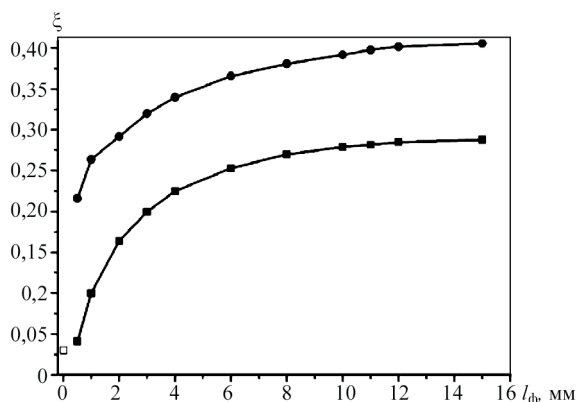


Рис. 5. Залежність ефективності від довжини ФО за розміщення обмотки на кінці ФО (●), з відступом 0,5 мм (■) і за відсутності ФО (□)

досягненні певної довжини ФО (близько 5 мм для даної обмотки) зростання ефективності ξ сповільнюється, а при досягненні довжини ФО $l_f = 10,0$ мм наближається до максимального значення. Ці результати показують, що довжину l_f ФО доцільно вибирати в діапазоні від 6,0 до 10,0 мм. При цьому ефективність обмоток ВСП, встановлених з відступом 0,5 мм, знижується не так сильно, як для коротких ФО довжиною менше $l_f = 2,0$ мм. Для ФО завдовжки $l_f = 10$ мм зміщення обмотки відносно кінця ФО на відстань $l_b = 0,5$ мм зменшує ефективність ξ в 1,45 рази. Такі втрати можна вважати припустимими. Зазначимо, що таке зміщення обмотки відносно робочого кінця ФО запобігає можливому руйнуванню ВСП через зношення під час сканування поверхні ОК. Тому певний компроміс під час вибору зміщення обмотки є виправданим. Крім того, ці результати дозволяють оцінити можливі зміни характеристик ВСП, коли частина ФО зношується в процесі експлуатації. Необхідно пам'ятати, що при використанні ФО суттєво збільшується і абсолютне значення індуктивності ВСП.

3. Оптимізація електричних і конструкційних характеристик параметричних ВСП. Подані в розділах 1 і 2 дослідження використано для проектування базового параметричного ВСП для авіаційної галузі України згідно з технічними вимогами основних замовників (ДП «Антонов», ДП

Таблиця 1. Характеристики базового ВСП

Характеристика	Значення
Діаметр ФО D_ϕ , мм	1,2
Висота ФО l_ϕ , мм	7,0
Кількість витків w	25
Діаметр проводу d_n , мм	0,06
МП матеріалу ФО μ_ϕ	500
Відстань l_b , мм	0,5
Кількість шарів	1
Опір обмотки, Ом	1,2

«Івченко-Прогрес», ПАТ «Мотор-Січ» тощо). Під час розробки було проаналізовано та враховано існуючу номенклатуру ФО. Основні характеристики базового ВСП зведено в табл. 1.

Вибір робочої точки для розділення впливу дефекту та зазору. Наведені в табл. 1 параметри ВСП визначають повний електричний опір індуктивної обмотки $Z_{об}$ за умови розміщення її віддалено від електропровідних об'єктів (у «повітрі»). Розглянемо зміни електричних характеристик обмотки базового параметричного ВСП при встановленні його на немагнітні конструкційні матеріали з різною питомою електропровідністю (ПЕП). Індуктивність L і внесений опір $R_{вн}$ базового ВСП (без кабелю) розраховували методом об'ємних інтегральних рівнянь [11, 12, 19] на робочій частоті 2,0 МГц при встановленні його на СЗ з немагнітного металу, ПЕП σ якого змінювали від 0,05 до 58,0 МСм/м. Крім того, індуктивності базового ВСП без кабелю під час його встановлення на СЗ із різними ПЕП вимірювали за допомогою вимірювача добротності ВМ 560. Отримані результати (рис. 6, а) показують непогану збіжність результатів розрахунків з експериментом (в межах 5...8 %). При цьому індуктивність базового ВСП на робочій частоті 2 МГц суттєво зменшується в діапазоні змін ПЕП до 0,5 МСм/м. За подальшого збільшення ПЕП в діапазоні до 5,0 МСм/м швидкість зростання індуктивності зі збільшенням ПЕП уповільнюється. При подальшому збільшенні ПЕП до значення ПЕП міді (58,0 МСм/м) індуктивність L обмотки ВСП практично не змінюється. Це дозволяє обґрунтувати можливість використання для ВД тільки двох режимів: перший – для контролю низькопровідних немагнітних сплавів (титанові сплави, аустенітна сталь) з ПЕП від 0,44 до 2,4 МСм/м; другий – для контролю у ширшому діапазоні від магнієвих сплавів (найменше значення ПЕП – 5,8 МСм/м) до міді (58,0 МСм/м). Такий широкий діапазон ПЕП контрольованих сплавів у другому режимі може бути забезпечений завдяки незначним змінам індуктивності базового ВСП в діапазоні змін ПЕП у цих сплавах (рис. 6, а). Це суттєво спрощує схему побудови автогенераторних ВД.

Внесений опір $R_{вн}$ обмотки ВСП зі збільшенням ПЕП спочатку зростає до максимуму при $\sigma \approx 0,2$ МСм/м, а потім починає зменшуватися, що відповідає загальним закономірностям теорії вихрострумового методу щодо змін складових імпедансу зі збільшенням ПЕП [1–6].

Розділити вплив дефекту та зазору між ВСП і поверхнею ОК можна шляхом реалізації «закритичного» режиму (точка Б на рис. 7), який має місце за великих значень узагальненого параметру, де: R – еквівалентний радіус обмотки ВСП; $\omega = 2\pi f$, де

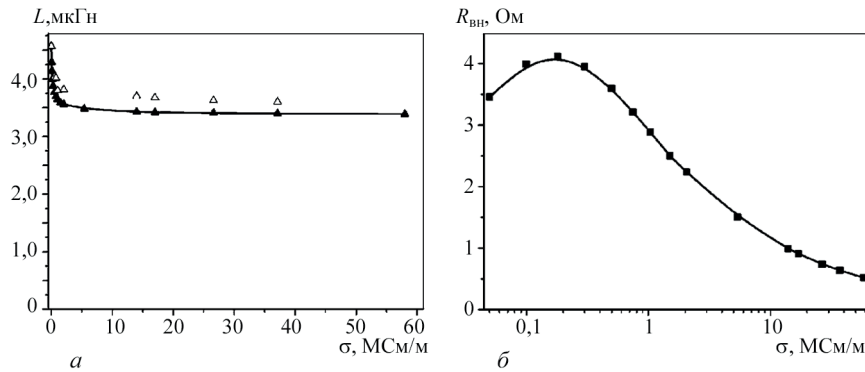


Рис. 6. Залежність індуктивності (а) і внесеного опору (б) базового ВСП від ПЕП σ матеріалу ОК: $\blacktriangle$ і $\blacksquare$ – розрахунок; $\triangle$ – експеримент

f – робоча частота; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; μ і σ – відносна МП та ПЕП матеріалу ОК.

На рис. 7 показано, що в «закритичному» режимі зміни внесеного опору, обумовлені дефектом (Д) і зазором (З), мають різний знак на відміну від «докритичного» режиму (точка А). Точка максимуму на рис. 6, б відповідає початку виконання умови «закритичного» положення робочої точки годографу внесеного імпедансу, необхідні для розділення впливу дефекту і зазору. Це означає, що для базового ВСП на робочих частот понад 2,0 МГц можливість розділення впливу дефекту та зазору реалізована навіть для низькопровідних титанових сплавів, ПЕП яких лежить в діапазоні від 0,44 до 2,4 МСм/м.

Зменшення впливу паразитних складових імпедансу. Еквівалентну схему параметричного ВСП включно з вузлами під'єднання їх до ВД можна подати у вигляді трьох послідовно з'єднаних елементів, імпеданс яких позначимо: $Z_{об}$ – імпеданс безпосередньо обмотки ВСП; $Z_{в}$ – імпеданс виводів обмотки та $Z_{к}$ – імпеданс кабелю для з'єднання ВСП з ВД. Імпеданс $Z_{об}$ безпосередньо обмотки ВСП аналізували в попередньому розділі. Імпеданс інших елементів, зокрема, імпеданс виводів

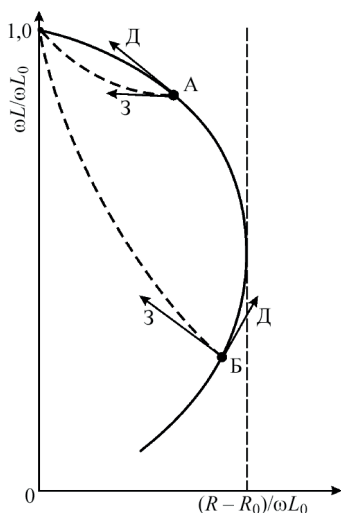


Рис. 7. Вплив дефекту (Д) і зміни зазору (З) на годографі імпедансу ВСП для робочої точки в «докритичному» (точка А) і «закритичному» (точка Б) режимах [1]

$Z_{в}$ і імпеданс з'єднувального кабелю $Z_{к}$ є паразитними, так як вони не беруть участь у формуванні корисного сигналу від дефекту, а їх зміни можуть призводити до зменшення добротності ВСП в цілому та створення додаткових завад. У автогенераторних або резонансних ВД ці елементи входять до складу коливального контуру, через що можуть суттєво впливати на їх роботу та обмежувати взаємозамінність ВСП (рис. 8).

Розглянемо детальніше паразитні компоненти імпедансу ВСП, а саме: імпеданс виводів $Z_{в}$ і імпеданс з'єднувального кабелю $Z_{к}$. Паразитний імпеданс $Z_{в}$ виводів може бути неприпустимо великий, так як у параметричних ВСП з невеликою кількістю витків (у базовому ВСП – 25) довжина виводів співмірна з сумарною довжиною витків обмотки. Це призводить до зменшення інформативної частки складових внесеного дефектом імпедансу (активного та індуктивного опорів) параметричного ВСП. При цьому також зменшується добротність ВСП, яка суттєво впливає на їх чутливість в автогенераторному або резонансному режимах роботи. З метою зменшення впливу паразитного імпедансу $Z_{в}$ виводів запропоновано конструкцію параметричного ВСП, в який введено діелектричний вкладиш з двома електропровідними шинами, перетини яких на порядок перевищують перетини дроту обмотки (див. Учанин В.М., Рибачук В.Г., Кириченко І.І. Накладний параметричний вихрострумний перетворювач. України пат. 137775, 2019, Бюл. № 21). Конструкцію параметричного ВСП для проведення ручного контролю наведено на рис. 9, а, де: 1 – корпус ВСП; 2 – обмотка; 3 – з'єднувач; 4 – діелектричний вкладиш; 5 – елек-

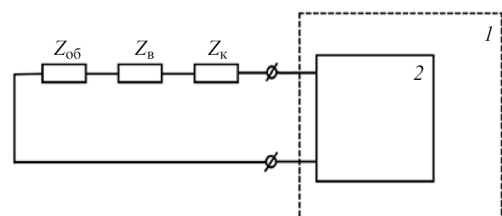


Рис. 8. Еквівалентна електрична схема параметричного ВСП: 1 – ВД; 2 – коливальний контур

тропровідні шини; 6 – виводи; 7 – з'єднувальні дроти; 8 – контакти з'єднувача. Виводи індуктивної обмотки з'єднані з кінцями електропровідних шин зі сторони торця вкладишу, який межує з обмоткою, а виводи з'єднувача кабелю або безпосередньо самого кабелю з'єднані з кінцями електропровідних шин зі сторони протилежного торця діелектричного вкладишу. Електропровідні шини краще розташувати з одного боку пластини діелектричного вкладишу, так як у цьому випадку їх паразитна ємність є суттєво меншою.

Крім того, ці конструктивні особливості використано для створення мініатюрних ВСП для виявлення дефектів на внутрішніх поверхнях важкодоступних порожнин за допомогою маніпуляторів. Конструкція мініатюрного ВСП (рис. 9, б) складається з трубчастого полістиролового корпусу 1 діаметром і висотою 4 і 8 мм відповідно, в якому розміщено ФО 2 з обмоткою 3 і діелектричний вкладиш 4 з електропровідними шинами. Усі елементи ВСП зафіксовано в корпусі 1 за допомогою епоксидної смоли 5. Виступаючі за межі корпусу частини електропровідних шин діелектричного вкладиша є контактами для підключення ВСП до кабелю ВД. Випробування показали, що добротність такого ВСП становить $Q = 0,53$ на відміну від ВСП традиційної конструкції, для якого $Q = 0,253$. Таким чином, запропоноване технічне рішення дозволяє збільшити добротність параметричних ВСП більше ніж у 2 рази.

Оптимальний вибір з'єднувального кабелю для підключення параметричних ВСП. Як зазначено вище, характеристики кабелю для під'єднання параметричного ВСП також суттєво впливають на роботу ВД. Особливо це стосується автогенераторних і резонансних ВД, в яких імпеданс кабелю змінює характеристики резонансного контуру. Значення Z_k

кабелю залежить від його марки та довжини кабелю. Для вибору марки кабелю аналізують його механічні властивості, зокрема гнучкість і витривалість при багатократних перегинаннях під час виконання контрольних операцій. Довжина кабелю повинна знаходитись у межах 1...1,5 м для зручного сканування оператором поверхні ОК в реальних виробничих умовах. Через це імпеданс кабелю Z_k не може бути зменшений до настільки малих значень порівняно з повним опором обмотки $Z_{об}$, щоб ним можна було б нехтувати. Під час вибору кабелю важливо забезпечити стабільні значення Z_k під час процедурних маніпуляцій та взаємозамінність ВСП. Останнє особливо критично для автогенераторних ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД, для яких визначено, що розподілена ємність з'єднувального кабелю має становити 100 ± 5 пФ. Залежно від марки кабелю змінюється не тільки ємність, але й інші параметри, зокрема погонне (на одиницю довжини) загасання. У кабелів малого діаметру воно досягає 0,4 дБ/м. У товстіших кабелів цей параметр є суттєво меншим і може знижуватися до 0,05 дБ/м, але вони не зовсім придатні для використання через низьку гнучкість. Характеристики кабелю, зокрема їх добротність, суттєво залежить від використаних матеріалів. Для ізоляції використовують матеріали на основі поліетилену, полістиролу, політетрафторетилену тощо. Центральна жила радіочастотного кабелю може складатися з одної або декількох дротів з міді, лудженої міді, міді з покриттям із срібла тощо. Для оптимального вибору кабелю за допомогою вимірювача добротності типу ВМ 560 виміряно електричні параметри різних варіантів кабелю довжиною 1,5 м. Результати наведено в табл. 2, де: R – активний опір; C – ємність; Q – добротність; L – індуктивність; $-$ хвильовий опір; $R_{екв} = \rho Q$ – еквівалентний опір.

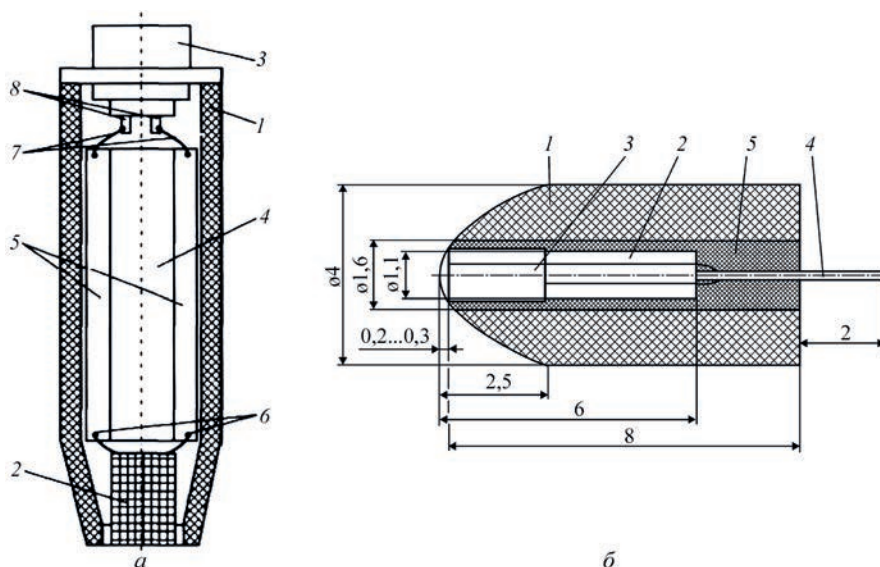


Рис. 9. Конструкції високодобротних параметричних ВСП: а – ВСП для ручного контролю; б – мініатюрний ВСП для контролю важкодоступних зон за допомогою маніпулятора

Таблиця 2. Електричні характеристики кабелів (довжина 1,5 м)

Тип кабелю	R , Ом	C , пФ	Q	L , мкГн	ρ , Ом	$R_{\text{сбв}}$, Ом
РК 50-1,5-11	0,24	121,0	6,0	0,23	40,3	242
РК 50-1,5-13	0,09	147,3	10,4	0,15	38,4	399
РК 50-2-11	0,25	168,0	7,0	0,19	33,7	236
РК 75-2-11	0,17	100,6	10,2	0,28	48,9	499
РК 75-2-13	0,20	97,9	10,8	0,34	58,5	632
РК 75-2-13А	0,18	99,0	10,6	0,31	63,5	673
Екранована вита пара МГТФ-0,14	0,41	110,0	12,0	0,79	95,3	1144
Екранована вита пара МГШВ-0,2	0,11	165,0	26,0	0,44	101,7	2644
Екранований дріт МГШВЭ-0,2	0,14	257,0	7,5	0,90	54,8	411

Аналіз табл. 2 дозволяє зробити наступні висновки:

1. За відсутності жорстких вимог щодо довжини кабелю можна використовувати всі марки радіочастотних кабелів з погонною ємністю до 100 пФ і задовільною добротністю.

2. За електричними параметрами найпридатнішим виглядає кабель марки РК 75-2-11. Але його використання обмежено через велику механічну жорсткість, яка суттєво зростає за низьких температур.

3. Екрановані пари дротів марок МГТФ-0,14, МГШВ-0,2 та МГШВЭ-0,2 за сукупністю електричних параметрів також є малопридатними для використання.

4. Кабелі марок РК 75-2-13 і РК 75-2-13А є оптимальними для виготовлення довших (близько 1,5 м) кабелів, що пов'язано з низькими значеннями погонної ємності.

5. Кабелі марок РК 50-1,5-11 і РК 50-2-11 мають порівняно більшу ємність, меншу добротність, хвильовий та еквівалентний опір. Тому вони можуть бути використані у випадках, коли допустима відносно мала (близько 1 м) довжина кабелю.

4. Експериментальні випробування параметричних ВСП: аналіз чутливості і можливості розділення впливу дефекту та зміни зазору. Презентований вище ВСП досліджували за допомогою

ВД типу EDDYCON C у резонансному режимі. ВСП випробували з використанням стандартних зразків (СЗ) типу СОП 5 із алюмінієвого, титанового сплаву та із феромагнітної сталі відповідно (рис. 10). На поверхню СЗ електроерозійним методом нанесено короткі пази довжиною 2 мм і розкриттям до 0,1 мм. На поверхні СЗ із алюмінієвого сплаву нанесені пази глибиною 0,2 і 0,5 мм, а на СЗ із титанового сплаву та сталі виконані пази глибиною 0,5 і 1,5 мм. Крім пазів на плоскій частині СЗ (на рис. 10 дефекти 1, 2) нанесено пази на циліндричних випуклостях (на рис. 10 дефекти 3, 4) та увігнутій (на рис. 10 дефекти 5, 6) ділянках радіусом 6 мм. Крім того, в крайовій зоні СЗ нанесено 2 дефекти довжиною 0,5 і 1,0 мм (на рис. 10 дефекти 7, 8). Такі СЗ дозволяють оцінювати чутливість ВСП за глибиною та довжиною дефекту у феромагнітних сталях і неферомагнітних матеріалах з різною ПЕП для плоских і криволінійних поверхонь. Бездефектну область цих СЗ була також використано для реєстрації сигналу ВСП від зміни зазору. Забігаючи наперед, зазначимо, що базовий ВСП дозволив надійно виявити усі дефекти в зазначених СЗ, включаючи дефекти на випуклостях і увігнутій поверхнях та в зоні краю.

Результати випробувань параметричного ВСП з метою виявлення коротких тріщин на СЗ із алюмінієвого сплаву (рис. 11) показали достатню чутливість до дефектів завдовжки 2 мм і завглибшки більше 0,2 мм з хорошим розділенням сигналу від зазору та дефекту на робочій частоті 1,0 МГц. Для цього також використано методичний прийом, коли чутливість по вертикалі більша за чутливість по горизонталі (на 24 дБ на рис. 11, а і на 18 дБ на рис. 11, б).

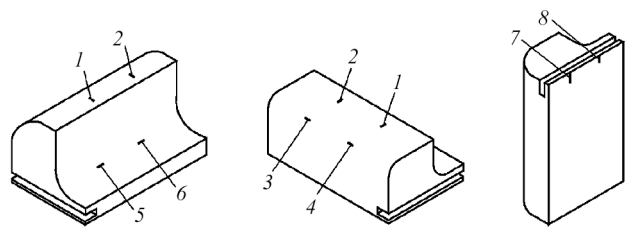


Рис. 10. Зовнішній вигляд СЗ з дефектами типу СОП 5

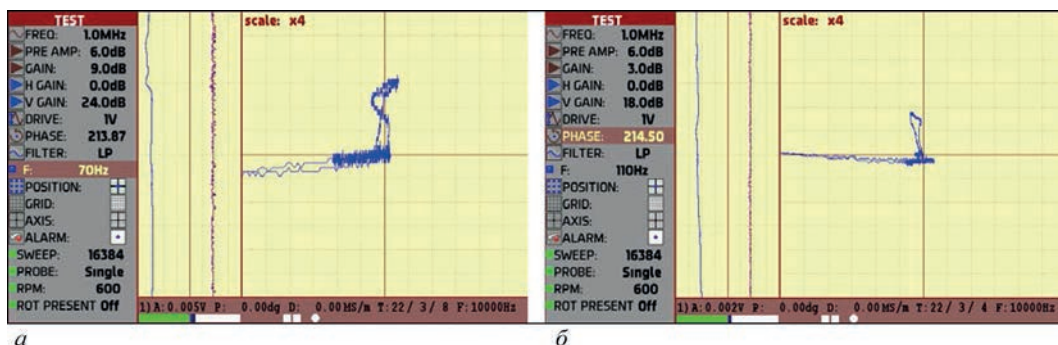


Рис. 11. Сигнали параметричного ВСП від дефекту типу тріщина завдовжки 2 мм і завглибшки 0,2 мм (а) і 0,5 мм (б) в СЗ із алюмінієвого сплаву та від зміни зазору (а, б) на робочій частоті 1,0 МГц

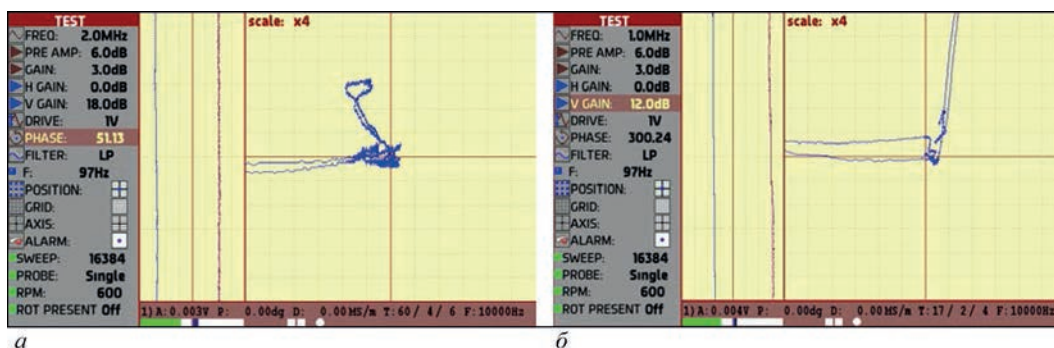


Рис. 12. Сигнали параметричного ВСП від дефекту типу тріщина завдовжки 2 мм і завглибшки 1,5 мм та від зміни зазору в СЗ з титанового сплаву (а) і феромагнітної сталі (б)

Для випробувань параметричних ВСП на СЗ з титанового сплаву робочу частоту було збільшено до 2 МГц через їх суттєво меншу ПЕП. Результати випробувань на СЗ із титанового сплаву наведено на рис. 12, а. На рис. 12, б наведено результати випробування СЗ із феромагнітної сталі на робочій частоті 1 МГц. Тут чутливість по вертикалі також більша за чутливість по горизонталі (на 18 дБ на рис. 12, а і на 12 дБ на рис. 11, б).

Результати, подані на рис. 12, а, б показують, що ВСП забезпечує виявлення тріщин завдовжки більше 2,0 мм в титанових сплавах і феромагнітних сталях з можливістю ефективного відлаштування від впливу зміни зазору. Необхідно зазначити, що менша чутливість по глибині для дефектів у титанових сплавах порівняно з чутливістю до дефектів в алюмінієвих сплавах відома та пояснюється їх суттєво нижчою ПЕП. Для феромагнітних сталей чутливість по глибині часто обмежується суттєво більшим рівнем завад, для зменшення якого необхідні або додаткове підмагнічування, або використання селективніших ВСП [21].

Висновки

1. Узагальнено результати досліджень і розробок, пов'язаних з оптимізацією конструкції параметричних ВСП для виявлення поверхневих дефектів.

2. Обґрунтовано вибір діаметру ВСП залежно від найменшої довжини тріщин, які необхідно виявляти. Показано, що для виявлення тріщин завдовжки більше 2 мм оптимальним є використання ВСП з обмотками, встановленими на ФО діаметром 1,2 мм. Для виявлення коротких тріщин завдовжки більше 1 мм розроблено ВСП з обмоткою, розташованою на ФО діаметром 0,75 мм.

3. Проаналізовано вплив параметрів ФО (довжини, магнітної проникності та відступу обмотки від кінця ФО) на ефективність параметричних ВСП з метою їх оптимізації.

4. Проаналізовано умови розділення впливу дефекту та зазору шляхом інтерпретації сигналів в комплексній площині та показано можливість їх

розділення для усіх немагнітних конструкційних сплавів.

5. Представлено конструкцію параметричного ВСП, яка дозволяє збільшити їх добротність більше ніж у 2 рази та розглянуто питання оптимального вибору з'єднувального кабелю для підключення ВСП до ВД.

5. Проведено випробування базового параметричного ВСП, які підтвердили його високу чутливість до коротких тріщин завдовжки більше 2 мм з надійним розділенням впливу дефекту і зазору.

Список літератури

1. Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic flaw detection*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. (1992) *Не разрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электromagnитный контроль*. Москва, Высшая школа. Gerasimov, V.G., Pokrovsky, A.D., Sukhorukov, V.V. (1992) *Non-destructive testing. In: 5 books. Book 3: Electromagnetic testing*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
3. Libby, H.L. (1971) *Introduction to Electromagnetic Non-destructive Test Methods*. New-York, etc: Wiley-Interscience.
4. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, **11**, 2525–2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
5. AbdAlla, A.N., Faraj, M.A., Samsuri, F. et al. (2019) Challenges in improving the performance of eddy current testing: Review. *Meas. Control*, **52**, 46–64. <https://doi.org/10.1177/0020294018801382>.
6. Rao, B.P.C. (2011) Eddy Current Testing: *Basics. J. of Non-Destructive Testing & Evaluation*, **10**(3), 7–16.
7. Hagemair, D.J. (1991) Application of crack detection to aircraft structures. In *«Fatigue crack measurement: techniques and applications»* (Eds K.J. Marsh, R.A. Smith and R.O. Ritchie). Warley (UK): EMAS, 419–455.
8. Uchanin, V. (2021) Enhanced eddy current techniques for detection of surface-breaking cracks in aircraft structures. *Transactions on Aerospace research*, **1**(262), 1–14. <https://doi.org/10.2478/tar-2021-0001.e>, ISSN 2445-2835.
9. Uchanin, V. (2007) Specific features of the space distribution of the signal of an eddy-current converter caused by cracks of different lengths. *Materials Science*, **43**(4), 591–595. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0068-2>
10. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. (1967) *Накладные и экранные датчики*. Новосибирск, Наука. Sobolev, V.S. Shkarlet, Yu.M. (1967) *Put-on and screen sensors*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
11. Дякин В.В., Сандовский В.А. (1981) *Теория и расчет накладных вихревых преобразователей*. Москва, Наука.

- Dyakin, V.V., Sandovsky, V.A. (1981) *Theory and calculation of overhead eddy current converters*. Moscow, Nauka [in Russian].
12. Sabbagh, H.A., Sabbagh, L.D., Bowler, J.R. (1988) A Model of Ferrite-core Probes over Composite Workpieces, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 7A. New York, Plenum Press, 479–486.
 13. Sabbagh, L.D., Hedengren, K.H., Hurley, D.C. (1991) Interaction of Flaw with a Ferrite-core Eddy Current Probe: Comparison Between Model and Experiment, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 10A. New York, Plenum Press, 883–888.
 14. Беда П.И. (1970) Исследование сигнала накладного датчика в зависимости от изменения размеров и расположения дефектов типа трещин. *Дефектоскопия*, 1, 62–68.
Beda, P.I. (1970) Examination of signal of overhead sensor depending on change of sizes and location of crack type defects. *Defektoskopiya*, 1, 62–68 [in Russian].
 15. (2000) EN 13860-2 *Non-destructive testing – Eddy current examination – Equipment characteristics and verification* – Part 2: Probe characteristics and verification, European Committee for standardization.
 16. Capobianco, T.E., Splett, J.D., Iyer, H.K. (1990) Eddy Current Probe Sensitivity as a Function of Coil Construction Parameters. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2, 169–186.
 17. Capobianco, T.E. (1987) Field mapping and performance characterization of commercial eddy current probes. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 6A, New York, Plenum Press, 687–694.
 18. Uchanin, V. (2012) Invariant efficiency parameter of eddy-current probes for nondestructive testing. *Materials Science*, 48(3), 408–413. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9520-z>.
 19. Dunbar, W.S. (1985) The volume integral method of eddy current modeling, *J. Nondestruct. Eval.*, 5(1), 9–14.
 20. (1996) *User's Guide for VIC-3D: An Eddy current NDE Code. Version 2.4*. USA, Bloomington, Sabbagh Associates, Inc.
 21. Uchanin, V., Nardoni, G. (2020) *Eddy Current Detection of Cracks in Ferromagnetic Steel Structures*, in «*The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*». Ed. Richard M. Wilcox, Nova Science Publishers, NY, USA, 193–221.

OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF EDDY CURRENT PROBE OF PARAMETRIC TYPE TO DETECT SURFACE CRACKS

V.M. Uchanin

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

The paper summarizes the results of research concerned with the optimization of the eddy current probe of the parametric type used for surface defects detection. It is shown that the choice of eddy current probe diameter significantly depends on the smallest length of cracks needed to be detected. In particular, it was determined that to detect a crack longer than 2 mm, it is optimal to use an eddy current probe with windings mounted on the 1.2 mm diameter ferrite core. To detect shorter cracks longer than 1 mm, it is necessary to use an eddy current probe with windings on the 0.75 mm diameter ferrite core. The influence of ferrite core parameters (length, magnetic permeability, and offset of winding from the ferrite core end) on the efficiency of parametric type eddy current probes is analyzed. The results obtained should be used for eddy current probe optimization. The conditions of separation of defect and lift-off influence are analyzed by interpretation of signals in the complex plane, and the possibility of their separation for the developed eddy current probes for all nonmagnetic structural alloys is shown. The design of a parametric type eddy current probe makes it possible to increase their quality factor more than twice. The optimal choice of the cable for connection of an eddy current probe and flaw detector is considered. The optimized parametric eddy current probes were tested. The high sensitivity of the developed probe to short cracks longer than 2 mm with reliable separation of the defect and lift-off influence was shown. Ref. 21, Tabl. 2, Fig. 12.

Keywords: eddy current non-destructive testing, surface crack, eddy current probe, ferrite core

Надійшла до редакції 18.03.2022

XI МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах

12–16 вересня 2022 р., Одеса, готель «Аркадія»

Голова програмного комітету академік І.В. Кривцун



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 серпня 2022 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць десяти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/mmww>

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей

до 19.08.2022 р.

Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі

до 05.09.2022 р.

Оплата реєстраційного внеску

до 12.09.2022 р.

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича 11,
м. Київ, 03150, Україна
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/ukr/mmww2022>



ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ДІАГНОСТИЦІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

В.В. Усов¹, М.Д. Рабкіна², Н.М. Шкатуляк¹, Н.І. Рибак¹, О.О. Штофель³

¹Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К.Д. Ушинського. 65020, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26. E-mail: valentinusov67@gmail.com

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: marjanara17@gmail.com

³НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Показано, що фрактальний аналіз як допоміжний засіб технічної діагностики та неруйнівного контролю дозволяє визначити важливі особливості стану та поведінки елементів металоконструкцій в процесі їх експлуатації та руйнування. Представлено приклади використання фрактальної розмірності зламів для оцінки критичних розмірів крихких тріщин та визначення її впливу на ударну в'язкість, границі плинності, міцності, руйнівний тиск при гідравлічних випробуваннях, а також для виявлення взаємозв'язку фрактальної розмірності із довговічністю після малоциклового втомного руйнування металу зварних з'єднань трубопроводу. Встановлено, що характер фрактальних розмірностей зламів і діаграм залежності прикладеного навантаження від часу при ударних навантаженнях обумовлений напрямком вирізки та температурою випробування зразків. Показано, що основний компонент текстури {001} <110> низьколегованої сталі сприяє збільшенню фрактальної розмірності зламів і крихкому руйнуванню при ударних випробуваннях. Бібліогр. 25, табл. 4, рис. 9.

Ключові слова: ударні випробування, фрактальна розмірність, крихка тріщина, руйнування

Вступ. Надійність довготривалого використання металевих конструкцій в значній мірі залежить від підходів до визначення їх технічного стану, насамперед, методами неруйнівного контролю. Але передчасне руйнування конструкцій може бути обумовлено наявністю невидимих дефектів, які сприяють деградації фізико-механічних властивостей самих матеріалів. Це потребує проведення механічних іспитів зразків, зокрема на відібраних пробах.

Фрактальний аналіз структури металу та деталей металоконструкцій щодо прогнозування їх руйнування виступає на даному етапі в ролі допоміжного методу діагностики експлуатаційного ресурсу. Наприклад, безпечна експлуатація нафтових і газових трубопроводних систем може бути забезпечена, в першу чергу, шляхом вивчення причин руйнування трубопроводів, заснованим на лабораторних дослідженнях основного металу (ОМ) і металу характерних зон зварювальних з'єднань (ЗЗ).

Руйнування сталей пов'язано з такими їх характеристиками, як кристалографічна текстура, макро- і мікроструктура, ферит-перлітна смугастість, частка структурних складових тощо [1, 2]. Експериментальні дослідження впливу зазначених структурних характеристик на закономірності пружно-пластичного деформування, малоциклового втомного руйнування із залученням фізичних

методів досліджень (рентгенографічний і фрактографічний аналізи) є актуальним. Тому застосування фрактального аналізу при дослідженні поверхонь руйнування є нагальним [3].

Назва «фрактал» походить від латинського «Fractus», що означає «дробовий», «ламаний». При вимірі довжини берегової лінії виявилось, що її довжина L залежить від вибору масштабу виміру ℓ за співвідношенням (у логарифмічних координатах – пряма лінія):

$$L \propto \ell^{1-D}, \quad (1)$$

де D – фрактальна розмірність (ФР) [4], яка не збігається із топологічною розмірністю d , є дробовою величиною та перевищує топологічну розмірність d ($D > d$). Наприклад, для берегової лінії Англії $D \approx 1,3$, а для Норвегії $D \approx 1,5$. Величина D тим більша, чим більш порізаним є берег [4]. Виявилось, що структура границь зерен у металевих полікристалах значно впливає на механічні властивості [5]. Відомо, що крихкість металевих матеріалів часто супроводжується міжзеренним руйнуванням [6]. Для запобігання міжзеренного руйнування потрібно зміцнювати межі зерен шляхом збільшення їх звивистості [7]. Характеристикою звивистості меж зерен є фрактальна розмірність.

Методики досліджень. Визначення фрактальної розмірності. Одним із прямих методів

визначення ФР двовимірних зображень (мікрофотографій) поверхні руйнування є метод покриття плоскої кривої квадратними сітками, розміри яких зменшуються в певну кількість разів («box-counting method») [8].

Цей метод не вносить спотворень в об'єкт досліджень. При цьому проводять фрактальний аналіз плоских меж фрагментів поверхні руйнування. Широке застосування цього методу обумовлено тим, що він може бути застосований до будь-якої плоскої конфігурації [9]. Для математичної фрактальної кривої ФР збігається з хаусдорфовою розмірністю (ХР). Проте аналітичний розрахунок ФР є досить трудомістким і можливий лише у деяких випадках. Показано, що фрактальна розмірність, знайдена за допомогою «box-counting method» у разі динамічних систем, має те саме значення, що й розмірність Хаусдорфа [9].

Для визначення фрактальної розмірності потрібно охопити зображення елементарними квадратними сітками зі сторонами ℓ_i [9]. На кожному етапі одну й ту саму криву покривають клітинками зменшеного масштабу. Чим менший розмір клітинки, тим точніше відтворюється крива. В той же час підраховують кількість квадратів $N(\ell_i)$, що перетинає крива. Потім змінюють розмір вікна сітки ℓ_i . Знову підраховують кількість квадратів, що перетинає крива: $N(\ell_2), N(\ell_3) \dots N(\ell_n)$. Кількість квадратів $N(\ell_i)$, які перетинала крива, пов'язана з розміром вікна сітки ℓ_i залежністю [9]:

$$N(\ell) = \alpha^{\ell-D} \quad (2)$$

де $\lg N(\ell_i) = f(\lg \ell_i)$, $D = \lim_{\ell \rightarrow 0} \frac{\lg N(\ell)}{\lg(1/\ell)}$ за визначенням зазвичай називається фрактальною розмірністю або розмірністю Хаусдорфа-Безиковича [9].

Практично D визначають за тангенсом кута нахилу графічної залежності $\lg N(\ell_i) = f(\lg \ell_i)$ [9]. Для визначення фрактальної розмірності зручно застосувати комп'ютерне програмне забезпечення HarFA («Harmonic and Fractal Image Analysis»), яке є у вільному доступі [10]. Перед визначенням фрактальної розмірності фотографії зламів зазвичай очищають від фону, наприклад, за допомогою комп'ютерного програмного забезпечення ACDSeePhotoStudioSoftware [11], для того, щоби отримати тільки лінії меж фрагментів руйнування (рис. 1).

Фрактальний аналіз крихких зламів. Досліджували [12] фрактальну розмірність зразків сталі контрольованої прокатки (Fe, 0,11 % C, 1,58 % Mn, 0,38 % Si) завтовшки 20 мм після випробувань на ударний вигин при температурах від кімнатної до -110 °C, а також визначали ФР дроту алюмінієвого сплаву АД1 після втомних випробувань на симетричний вигин при кімнатній температурі та при -10 °C.

Поверхні зламів досліджено на мікрорівні по мікрофрактограмах, отриманих на растровому електронному мікроскопі РЕМ-200 при збільшенні 20000, а на мезорівні – за оптичними мікрофотографіями (МІМ-7, збільшення 350).

У зламах зразків сталі частка поверхні з крихким руйнуванням складала 35 % при кімнатній

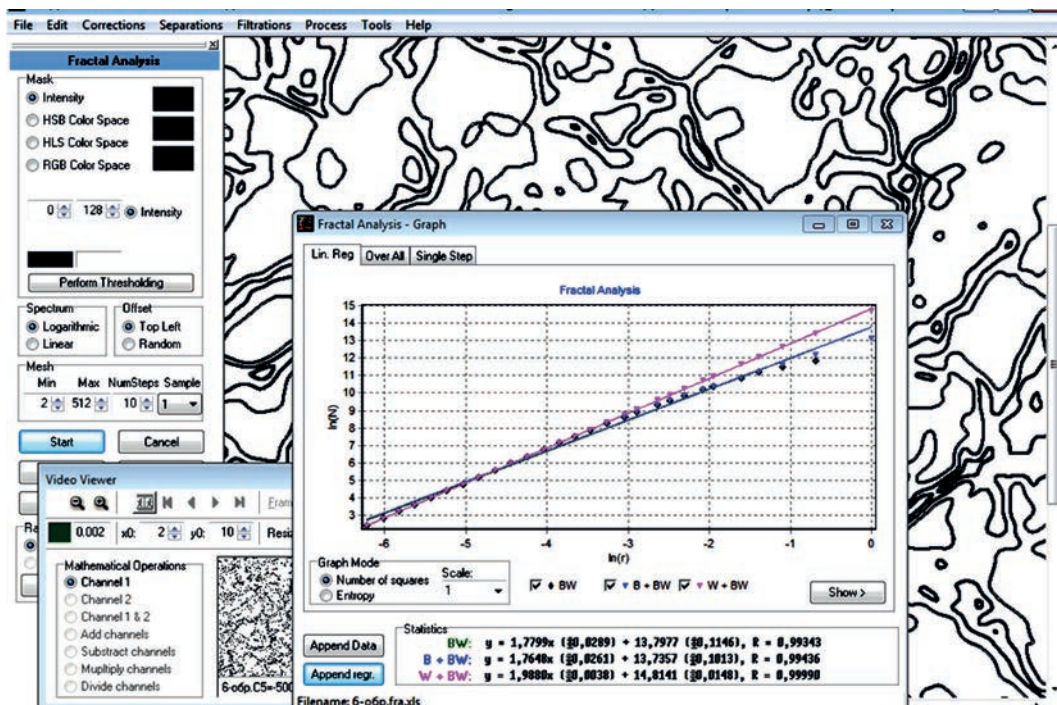


Рис. 1. Приклад визначення ФР зламу зразка сталі марки 20К після ударного випробування за Шарпі з використанням комп'ютерного програмного забезпечення HarFA та ACDSeePhotoStudioSoftware

температурі і 55 % при -70°C . У зламах алюмінію «крихка» частка збільшувалася від 50 до 65 % при зниженні температури від 20 до -10°C . Типова мікрофотографія крихкого зламу сталі показана на рис. 2. Визначали фрактальну розмірність меж нумерованих ділянок.

Встановлено, що злами після крихкого руйнування мають середні значення ФР $1,20 \pm 0,06$ та $1,15 \pm 0,06$ для сталі та алюмінію відповідно. На основі припущення, що у відповідності до критерію Гриффітса при збільшенні розміру тріщини на ΔR виділяється пружна енергія, що дорівнює приросту поверхневої енергії розрізу [13], було отримано залежність для оцінки критичних розмірів крихких тріщин:

$$R^{2-D} \approx \frac{2\gamma DE}{\sigma^2} \quad (3)$$

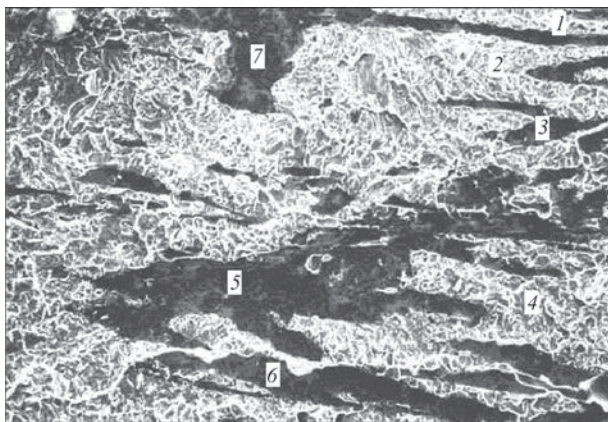
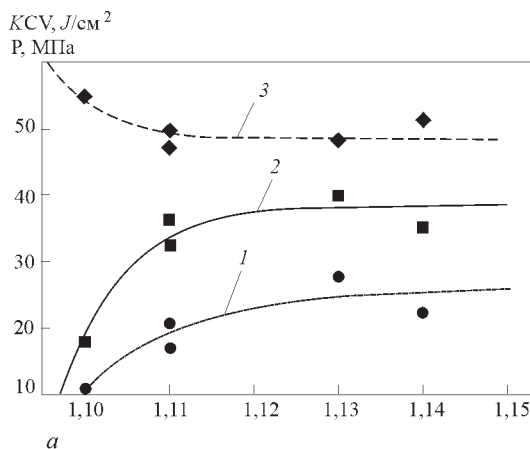


Рис. 2. Електронна мікрофрактограма шарувато-крихкого руйнування сталі після випробувань на ударний вигин

Таблиця 1. Хімічний склад металу досліджених балонів, мас. %

Номер	Термін експлуатації, роки	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	C _{сбв.}
Б1	45	0,513	1,01	0,319	0,023	0,023	0,14	0,11	0,72
Б2	52	0,467	0,85	0,247	0,023	0,022	0,11	0,07	0,64
Б3	18	0,490	0,88	0,255	0,019	0,026	0,23	0,10	0,69
Б4	36	0,442	0,90	0,366	0,014	0,017	0,11	0,11	0,62
Б5	49	0,482	0,72	0,257	0,026	0,019	0,10	0,08	0,63



де E – модуль пружності матеріалу, а $\gamma \approx 1$ – питома поверхнева енергія [14].

Підстановка у (3) даних випробувань досліджуваної сталі при -70°C ($D_{cp} = 1,2$; $E = 220$ ГПа [14], $\sigma \approx 100$ МПа) дала величину критичного розміру фрактальної тріщини $R \approx 4,5$ мкм, що відповідає середньому розміру комірчастої дислокаційної структури сталі [1] та добре узгоджується з шарувато-крихким руйнуванням за механізмом крихкого транскристалітного відколу (рис. 2).

Аналогічна оцінка для крихкого руйнування алюмінію при $D_{cp} \approx 1,15$, $E = 70$ ГПа [15] і $\sigma \approx 20$ МПа (по ударної в'язкості [15]) дала $R \approx 6,75$ мкм.

Фрактальна розмірність меж зерен і механічні властивості металу кисневих балонів. Під робочим тиском 14,7 МПа досліджували кисневі балони ємністю 40 л зі сталі Дс (ГОСТ 949-73) різного терміну експлуатації [16].

Фрактальна розмірність меж зерен сталі Дс кисневих балонів різних термінів експлуатації від 18 до 52 років змінюється від 1,10 до 1,14. Встановлено кореляційні зв'язки фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю, руйнівним тиском і межею плинності з коефіцієнтами кореляції R не нижче 0,80 (рис. 3).

Криві на рис. 3 відповідають рівнянням регресії з високим ступенем кореляції R :

$$KCV(-10^{\circ}\text{C}) = (-1,14 \cdot 10^4 + 26,03 D_{cp}^{93,98}) / (32,14 + D_{cp}^{93,98}); R = 0,92 \quad (4)$$

$$KCV(20^{\circ}\text{C}) = (-1,30 \cdot 10^5 + 38,29 D_{cp}^{164,73}) / (820,64 + D_{cp}^{164,73}); R = 0,96 \quad (5)$$

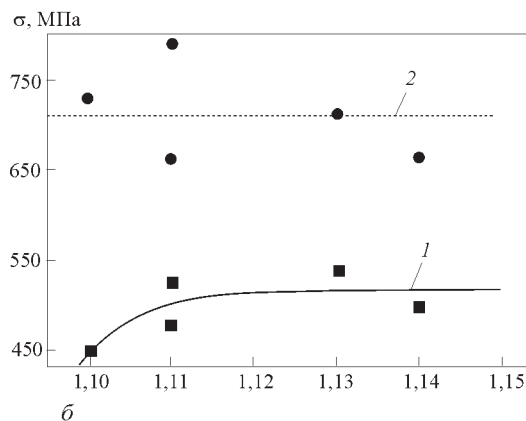


Рис. 3. Кореляційні зв'язки середньої ФР D_{cp} границь зерен: а – з ударною в'язкістю KCV при -10°C (крива 1) і 20°C (крива 2), руйнівним тиском (крива 3); б – з границями плинності $\sigma_{0,2}$ (крива 1) й міцності σ_b (крива 2)

$$P(20^\circ\text{C}) = (5,34 \cdot 10^{-3} + 2,28 \cdot 10^4 D_{\text{cp}}^{-184,77}) / (1,10 \cdot 10^{-4} + D_{\text{cp}}^{-184,77}); R = 0,80 \quad (6)$$

$$\sigma_{0,2} = (-1,53 \cdot 10^8 + 5,18 \cdot 10^2 D_{\text{cp}}^{152,92}) / (8,09 \cdot 10^2 + D_{\text{cp}}^{152,92}); R = 0,80 \quad (7)$$

Кореляційний аналіз межі міцності σ_b металу балонів засвідчив відсутність її зв'язку з ФР границь зерен. Рівняння регресії має вигляд:

$$\sigma_b = 710,28; R = 0,02. \quad (8)$$

Фрактальні особливості малоциклового втомного руйнування (МЦУ) металу зварних з'єднань трубопроводу. Лабораторні зразки для експериментального визначення основних закономірностей циклічного пружно-пластичного деформування основного металу (ОМ) та металу характерних зон зварного з'єднання – зони термічного впливу (ЗТВ) та металу шва (МШ) – вирізали в поперечному напрямку труби діаметром 530×8 мм магістрального трубопроводу зі сталі 17Г1С-У після тривалої експлуатації [17]. На рис. 4 наведено зруйнований зразок після випробувань на розтяг, на якому показано ділянки дослідження текстури.

На рис. 5–7 представлені фото зламів зразків, ОМ, МШ та ЗТВ відповідно, після випробування на МЦУ. Проведений фрактографічний аналіз показав відмінності в механізмах руйнування зразків, вирізаних із ОМ (рис. 5) та металу характерних зон СС після випробувань на МЦУ.

Для зразків, вирізаних із ОМ, має місце квазікрихке руйнування з утворенням вторинних тріщин розшарування. Цьому сприяє кристалографічна текстура ОМ $\{001\} \langle 110 \rangle$. Розшарування може здійснюватися по площинах відколу $\{001\}$.

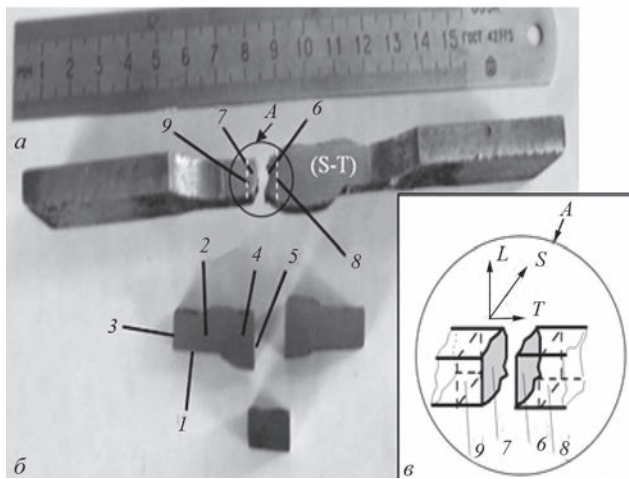


Рис. 4. Ділянки дослідження текстури: а – недеформована ділянка (1 – ОМ в площині прокатки LT; 2, 3 – ОМ в площинах ST і SL; 4, 5 – перетини МШ в площинах ST і SL); б – після руйнування (6, 7 – зв'язані поверхні руйнування МШ; 8, 9 – перетини МШ в площині SL під зламами); в – схема фрагмента А з рис. 3, б; L – поздовжній напрям; T – поперечний напрям; S – напрям, перпендикулярний напрямкам L і T

Зразки, вирізані з МШ (рис. 6), руйнуються за механізмом утворення ямок (в'язке руйнування). Цьому сприяє текстура зсуву МШ типу $\{110\} \langle 001 \rangle$, який є основним. Це відображається на

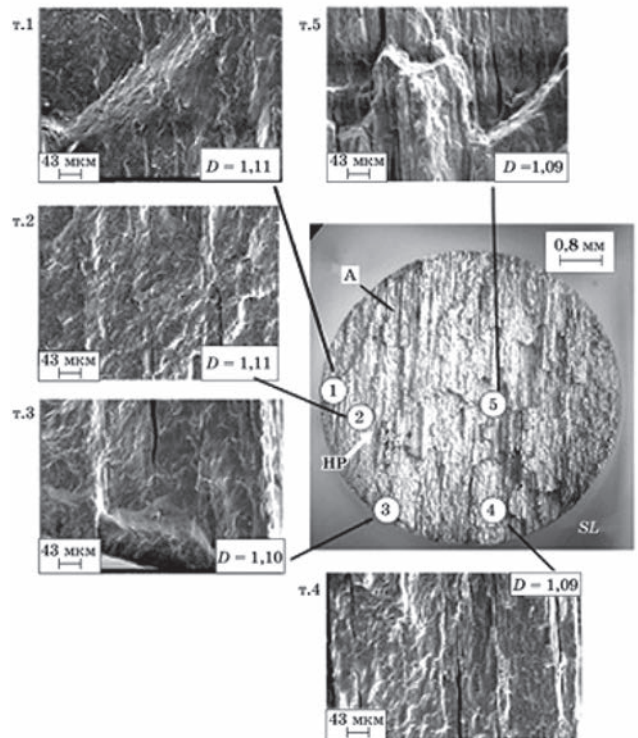


Рис. 5. Злам зразка з ОМ після випробувань на МЦУ: а, б – вид фрагмента зруйнованого зразка в площині (L-T) і (L-S) відповідно; в – злам з типовим макро- (А) та мікрорельєфом (т.т. 1–5) руйнування; HP – напрямок руйнування; D – фрактальна розмірність

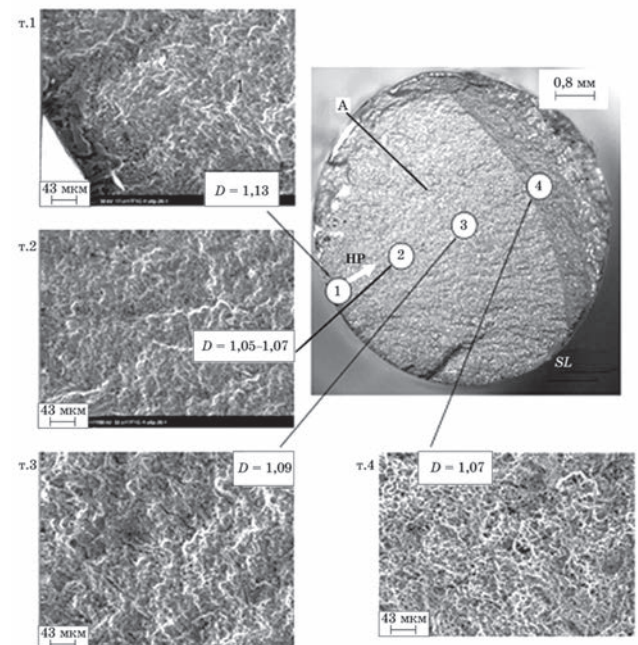


Рис. 6. Злам зразка з ділянки МШ після випробувань на МЦУ: а, б – вид фрагмента зруйнованого зразка в площині (L-T) та (L-S) відповідно; в – злам з типовим макро- (А) та мікрорельєфом (т.т. 1–4) руйнування; HP – напрямок руйнування; D – фрактальна розмірність

зменшенні величини ФР у порівнянні зі зломом ОМ (рис. 5).

Квазікрихке руйнування спостерігається для зразків ЗТВ, але меншою мірою у порівнянні з ОМ, оскільки формується кристалографічна текстура розтягу – стиску $\langle 001 \rangle - \langle 110 \rangle$, обумовлена деформуванням ковзанням по системах $\{110\} \langle 110 \rangle$ і $\{110\} \langle 111 \rangle$ [17]. Причому на мікрофрактограмах ЗТВ зустрічаються ділянки з борозенками. Величина ФР є близькою до її значень для зламу зразка з ОМ (рис. 5).

На рис. 5 видно, що фрактальна розмірність у різних ділянках зламу з ОМ змінюється від 1,09 до 1,11, середня величина фрактальної розмірності поверхні зламу основного металу складала $D_{cp} = 1,10 \pm 0,01$. Аналогічні результати показав аналіз фрактальної розмірності зламу зразка із металу ЗТВ. На рис. 7, в видно, що фрактальна розмірність у різних ділянках зламу ЗТВ змінюється від 1,07 до 1,15, так що середня величина фрактальної розмірності поверхні зламу зразка ЗТВ металу складала $D_{cp} = 1,11 \pm 0,01$.

Більш в'язкий характер руйнування зразка МШ впливає з аналізу рис. 5 та текстури. При цьому фрактальна розмірність на різних ділянках зламу зразка МШ змінюється від 1,05 до 1,13 (рис. 6, в), а середня величина фрактальної розмірності МШ складала $D_{cp} = 1,08 \pm 0,01$.

З ймовірністю 0,95 можна стверджувати, що середнє значення під час вибірки більшого обсягу не вийде за межі зазначених вище інтервалів.

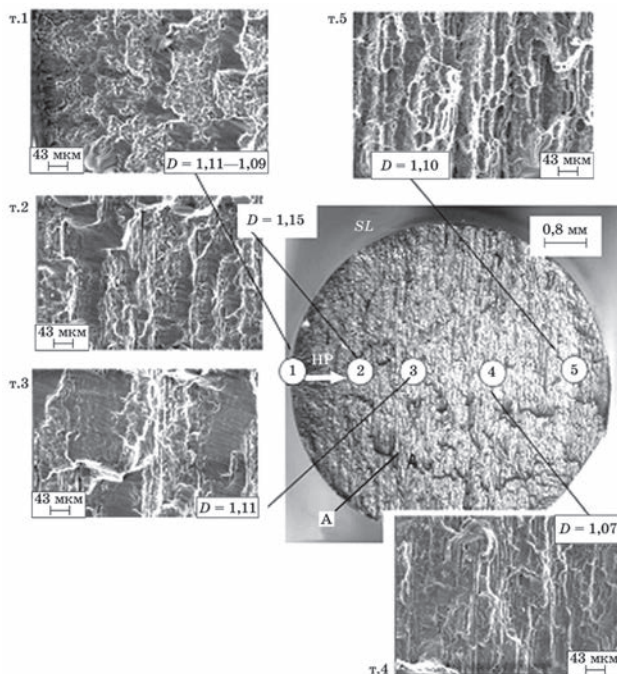


Рис. 7. Злам зразка з ділянки ЗТВ після випробувань на МЦУ: а, б – вид фрагмента зруйнованого зразка в площині (L-T) та (L-S) відповідно; в – злам з типовим макро- (А) та мікрорельєфом (т.т. 1–5) руйнування; HP – напрямок руйнування; D – фрактальна розмірність

Таким чином, простежується тенденція збільшення фрактальної розмірності при переході від в'язкого (МШ) до квазікрихкого характеру руйнування (ОМ та ЗТВ), що відповідає зниженню відповідних показників міцності та пластичності при статичних випробуваннях та зменшенню довговічності. Збільшення фрактальної розмірності при квазікрихкому руйнуванні може означати, що при квазів'язкому руйнуванні поверхня більше «розтягується» внаслідок наявності ширших і глибших мікропор. На мікроскопічному рівні поверхня стає гладкішою [18].

Збільшення фрактальної розмірності зламів досліджуваної нами сталі при переході від в'язкого до квазікрихкого руйнування узгоджується з результатами роботи [18] та іншими більш ранніми дослідженнями. У [18] наведено, що сталь показує зменшення фрактальної розмірності зі збільшенням в'язкості. Так, при дослідженні [18] 24-х серій зразків сталі AISI 4340 було показано, що фрактальна розмірність зламу зразка сталі з часткою поверхні з в'язким руйнуванням 36 % складала $D \approx 1,28$. При збільшенні частки в'язкої складової у злам до 50 % $D \approx 1,25$. При частці в'язкої складової у злам 77 % $D \approx 1,20$. При 100 % в'язкому злам $D \approx 1,10 \dots 1,09$.

Слід зазначити, що характеристика поверхонь руйнування за допомогою вищезгаданих середніх значень фрактальних розмірностей ЗМ, ЗТВ та МШ є спрощеною. Наявність різних значень фрактальних розмірностей у різних ділянках відповідних зламів вказує на те, що досліджувані поверхні є мультифракталами, які можна інтерпретувати як нерозривні суміші простих фракталів [17]. Кожен з них характеризується своєю фрактальною розмірністю, а весь відповідний злам описується нескінченною множиною фрагментів руйнування, пов'язаних з різною ймовірністю реалізації різних фрагментів множини. Ймовірність P_i реалізації кожного фрагмента визначається співвідношенням:

$$P_i = \ell_i^\alpha, \quad (9)$$

де α – скейлінговий параметр, $i = 1, 2, \dots, N_n$ – число фрагментів множини [17].

Для детальнішого опису таких поверхонь руйнування потрібно застосування мультифрактального підходу [17, 19, 20], що може бути темою майбутніх досліджень.

Анізотропія енергії руйнування при ударних випробуваннях і фрактальна розмірність. Визначали параметри ударної в'язкості та фрактальні розмірності кривих навантаження в залежності від часу випробувань та відповідних зламів при випробуваннях на ударний вигин зразків V-Шарпі, вирізаних у різних напрямках з листів сталі 20К в діапазоні температур від -50 до 50 °C [21]. Ударні

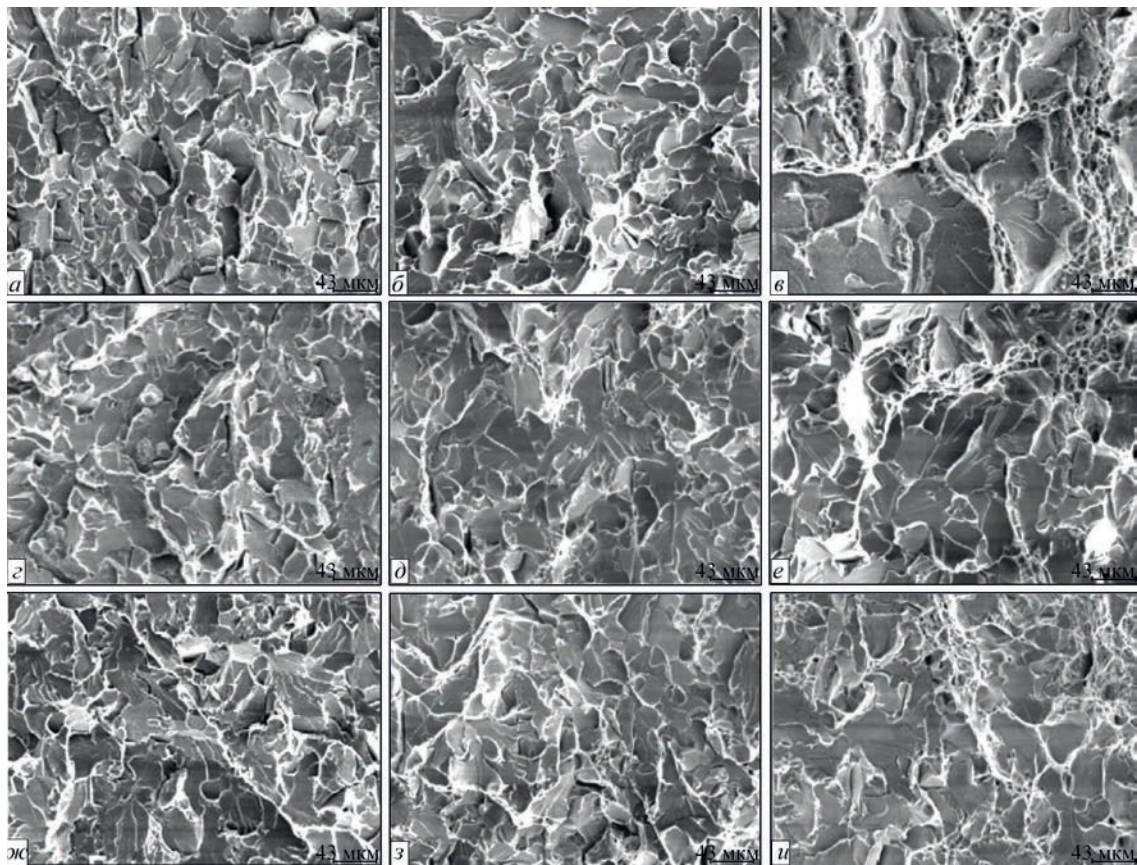


Рис. 8. РЕМ фотографії зламів після ударних випробувань зразків сталі марки 20К. Довжина масштабної лінійки 43 мкм

випробування були виконані на спеціалізованому вертикальному копрі, забезпеченому високошвидкісною системою реєстрації деформацій та зусиль [22]. Стандартні зразки з V-подібним надрізом були вирізані у трьох напрямках: поздовжньому, поперечному та під кутом 45° до поздовжнього напрямку. Випробування проводилися для трьох температур: -50 °С, 50 °С та кімнатної по три зразки кожного напрямку вирізки на кожну температуру. За результатами випробувань було отримано діаграми зміни зусилля від часу $P(t)$ та розраховано значення ударної в'язкості за методикою, наведеною в стандарті ISO 14556-2000 [23]. На рис. 8 представлено мікрофрактограми зламів, отриманих на електронному растровому мікроскопі РЕМ-200. Результати визначення фрактальної розмірності D_f відповідних зламів представлено в табл. 2. На рис. 9 показано діаграми $P(t)$ зміни зусилля з часом випробування зразків на ударний вигін. Результати визначення фрактальної розмірності D_c відповідних діаграм представлено в табл. 3.

Як видно з табл. 2, 3, поведінки фрактальних розмірностей D_f і D_c є подібними. Обидві ФР мають

максимальні значення у діагональному напрямку. Мінімальні значення спостерігаються при підвищеній температурі випробувань +50 °С (табл. 2, 3).

У той же час ударна в'язкість при температурі випробування + 50 °С максимальна (табл. 4).

Це свідчить про в'язкий характер руйнування при 50 °С. Максимальні значення фрактальних розмірностей мають місце при низькій температурі випробування -50 °С (табл. 2, 3). За тієї ж температури має місце мінімальне значення ударної в'язкості (табл. 1), яке відповідає крихкому характеру руйнування досліджуваних зразків при -50 °С.

Максимальні значення фрактальних розмірностей спостерігаються для зразків, вирізаних у діагональному напрямі (ДН), тобто, має місце анізотропія ФР (табл. 2, 3). Ця анізотропія може бути викликана текстурою. Встановлено, що основним компонентом текстури досліджуваної сталі є $\{001\} \langle 110 \rangle$. Цей компонент є типовим компонентом текстури прокатки ОЦК-сталей [24]. В цьому випадку кристалографічні площини $\{001\}$, що є площинами крихкого відколу в ОЦК-металах

Таблиця 2. Фрактальна розмірність (D_f) зламів (рис. 8)

$T, ^\circ\text{C}$	НП	ПН	ДН	Середнє D_f
-50	$1,59 \pm 0,01$	$1,60 \pm 0,01$	$1,64 \pm 0,01$	$1,61 \pm 0,01$
20	$1,55 \pm 0,01$	$1,56 \pm 0,01$	$1,59 \pm 0,01$	$1,57 \pm 0,01$
50	$1,52 \pm 0,01$	$1,54 \pm 0,01$	$1,55 \pm 0,01$	$1,54 \pm 0,01$

Таблиця 3. Фрактальна розмірність (D_c) діаграм $P(t)$ (рис. 9)

$T, ^\circ\text{C}$	НП	ПН	ДН	Середнє D_c
-50	$1,27 \pm 0,01$	$1,23 \pm 0,01$	$1,31 \pm 0,01$	$1,27 \pm 0,01$
20	$1,23 \pm 0,01$	$1,17 \pm 0,01$	$1,26 \pm 0,01$	$1,22 \pm 0,01$
50	$1,12 \pm 0,01$	$1,13 \pm 0,01$	$1,16 \pm 0,01$	$1,14 \pm 0,01$

Таблиця 4. Питома енергія руйнування (Дж/м²) при ударних випробуваннях

Номер зразка	-50 °С	20 °С	50 °С
Повздовжній напрямок LD			
1	0,83	5,04	22,87
2	0,73	4,31	20,82
Середнє значення	0,78	4,67	21,84
Поперечний напрямок TD			
1	0,97	9,88	47,95
2	0,95	10,91	57,95
Середнє значення	0,96	10,39	52,95
Діагональний напрямок DD (LD +45°)			
1	0,85	13,33	47,24
2	0,91	17,70	54,65
Середнє значення	0,88	15,51	50,94

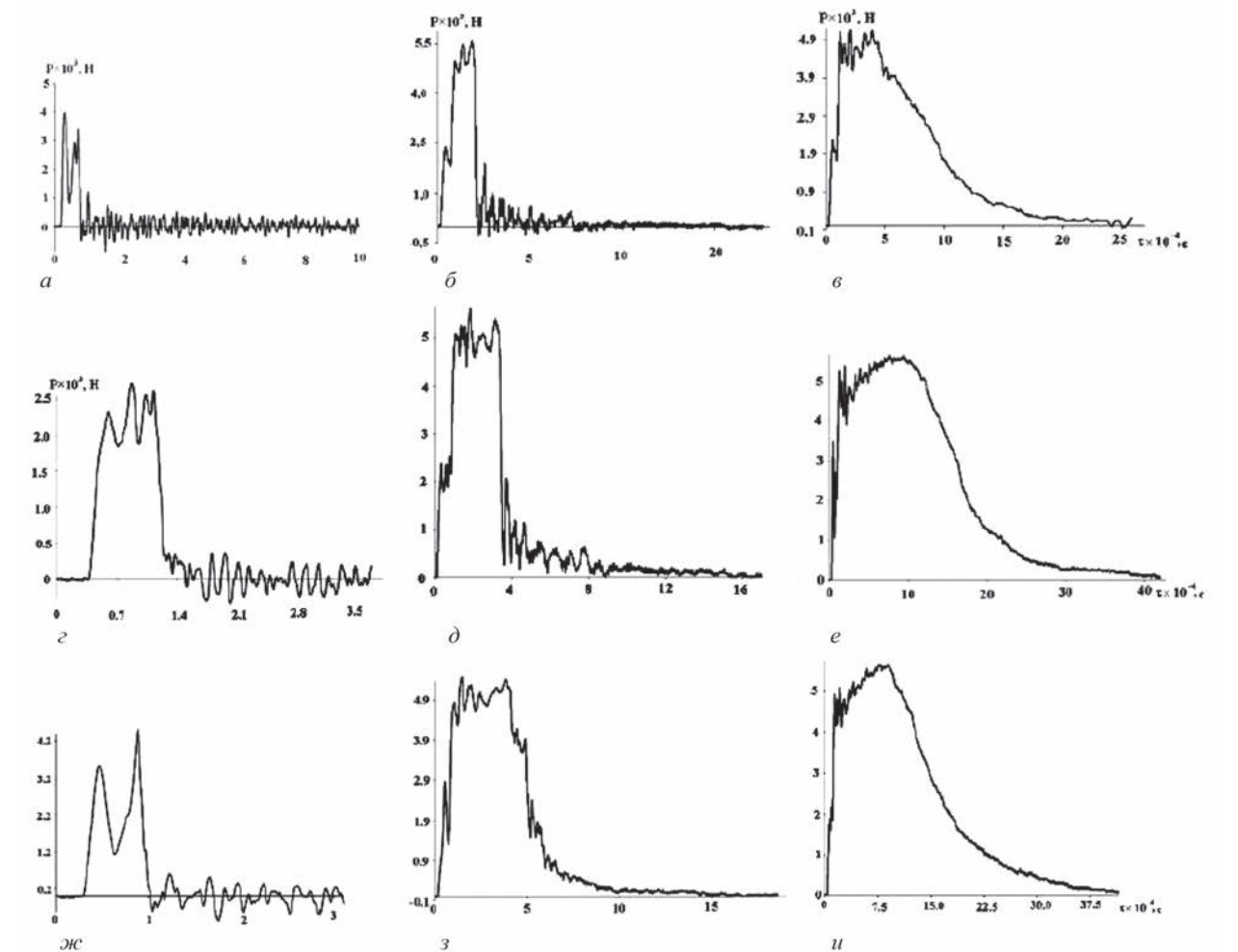


Рис. 9. Діаграми залежності прикладеного навантаження P від часу t при ударних випробуваннях на вигин

[25], розташовані перпендикулярно до діагонального напрямку. Відкол може відбуватися вздовж цих кристалографічних площин, що сприяє більш крихкому характеру руйнування діагональних зразків і проявляється у збільшенні фрактальної розмірності.

Висновки

1. Конфігурації крихких тріщин сталі контрольного вальцювання та алюмінію АД1 є фрактальними, а крихке руйнування має фрактальну природу. На підставі фрактальної моделі крихкої тріщини оцінено її критичні розміри R . Для дослідженої сталі $R \approx 4,5$ мкм, що відповідає середньому розмірові комірок її дислокаційної структури. Для алюмінію АД1 критичний розмір крихкої тріщини $R \approx 6,75$ мкм.

2. При гідровипробуваннях кисневих балонів зі сталі Дс мають місце тісні кореляційні зв'язки між фрактальною розмірністю меж зерен металу балонів з одного боку, ударною в'язкістю, руйнівним тиском при гідровипробуваннях та умов-

ною межею плинності з коефіцієнтами кореляції не нижче 0,80 з іншого боку. Низька фрактальна розмірність меж зерен відповідає більшому розміру зерен, низьким значенням ударної в'язкості та межі плинності, але високому руйнівному тиску при гідровипробуваннях. Зростання фрактальної розмірності меж зерен супроводжується зростанням ударної в'язкості, межі плинності та зниженням руйнівного тиску. Відповідні кореляційні залежності мають вигляд кривих, що досягають насичення із зростанням фрактальної розмірності кордонів. Зі зростанням фрактальної розмірності меж зерен відбувається перехід від крихкого транс-кристалітного відколу до квазивідколу та в'язко-крихкого характеру руйнування.

3. Збільшення частки пластичної деформації металу в зоні термічного впливу загальної амплітуди деформації при випробуваннях на малоциклову втому зразків характерних зон зварного з'єднання трубопроводу зі сталі 17Г1С-У після його тривалої експлуатації призводить до істотного зниження циклічної довговічності основного металу та металу шва. Існують істотні відмінності в механізмах руйнування: зразки з металу шва руйнуються за механізмом утворення ямок (в'язке руйнування) на відміну від квазікрихкого руйнування з утворенням вторинних тріщин розшарування, характерних для основного металу та, меншою мірою, для зони термічного впливу. Це супроводжується збільшенням середньої фрактальної розмірності від $1,08 \pm 0,01$ для в'язкого руйнування металу зварного шва до $1,10 \pm 0,01$ для основного металу та $1,11 \pm 0,01$ для зони термічного впливу при квазікрихкому характері руйнування. Простежується взаємозв'язок між фрактальною розмірністю зламів та довговічністю випробуваних зразків. Зі зменшенням довговічності збільшується значення фрактальної розмірності.

4. Фрактальні розмірності діаграми D_c випробувань $P(t)$, що відображають залежність прикладеного навантаження P від часу t , та фрактальні розмірності зламів D_f після ударних випробувань зразків зі сталі 20К у діапазоні температур від -50 до 50 °С мають аналогічний характер. Максимальні середні значення обох фрактальних розмірностей відповідають крихкому характеру руйнування та мінімальний ударний в'язкості. Мінімальні середні значення обох фрактальних розмірностей відповідають в'язкому характеру руйнування та максимальний ударний в'язкості. Найбільші значення фрактальної розмірності, знайдені для зразків, вирізаних під кутом 45° до поздовжнього напрямку, обумовлені впливом текстурного компонента $\{001\} <110>$, який є основним компонентом низьколегованої текстури

сталі з ОЦК-решіткою. Представлені результати можуть бути використані для оцінки схильності сталі до крихкого руйнування шляхом аналізу енергії руйнування та фрактальної розмірності діаграм залежності навантаження від часу при випробуваннях на ударну в'язкість.

Список літератури/References

1. Usov V.V., Girenko V.S., Rabkina M. D. et al. (1993) Effect of the crystallographic texture on the anisotropy of fracture characteristics of control-rolled low-alloy steel. *Materials Science*, 29 (2) 146–150. <http://lib.gen.in/d55dae53541a8dc954b7f4d30d0a34cf.pdf>
2. Лякишев Н.П., Эгиз И.В., Шамрай В.М. (2000) Текстура и кристаллографические особенности разрушения материала труб из стали X70. *Металлы*, 2, 68–72. <http://www.imet.ac.ru/metally/nambers.htm>
Lyakishev, N.P., Egiz, I.V., Shamraj, V.M. (2000) Texture and crystallographic peculiarities of fracture of steel X70 pipe material. *Metally*, 2, 68–72 [in Russian]. <http://www.imet.ac.ru/metally/nambers.htm>
3. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксагоев А.А. (1994) *Синергетика и фракталы в материаловедении*, Москва, Наука. https://www.researchgate.net/publication/268999858_Sinergetika_i_fraktaly_v_materialovedenii
Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.Zh., Oksagoev, A.A. (1994) *Synergy and fractals in materials science*. Moscow, Nauka [in Russian]. https://www.researchgate.net/publication/268999858_Sinergetika_i_fraktaly_v_materialovedenii
4. Мандельброт Б. (2002) *Фрактальная геометрия природы*. Москва, Институт компьютерных исследований. <https://ruwapa.net/book/benua-mandelbrot-fraktalnaya-geometriya-prirody/>
Mandelbrot, B. (2002) *Fractal geometry of nature*. Moscow, Institute for Computer Research. <https://ruwapa.net/book/benua-mandelbrot-fraktalnaya-geometriya-prirody/>
5. Watanabe, T., Tsurekawa, S. (2004) Toughening of brittle materials by grain boundary engineering. *Mater. Sci. Engng. A.*, **387–389**, 447–455. https://www.researchgate.net/publication/222146139_Toughening_of_Brittle_Materials_by_Grain_Boundary_Engineering
6. Vitek, V., Chen, S.P., Voter, A.F. et al. (1989) Grain boundary structure and intergranular fracture in L12 ordered alloys. *Mater. Sci. Forum*, **46**, 237–252. <https://www.scientific.net/MSF.46.23>
7. Watanabe, T. (1993) Grain boundary design and control for high temperature materials. *Mater. Sci. Engng. A.*, **166**, 11–28. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/092150939390306Y>
8. Zhou, H.W., Xie, H. (2003) Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock. *Surface Review and Letters*, 10(5), 751–762. <https://paperzz.com/doc/9119828/direct-estimation-of-the-fractal-dimensions-of-a>
9. Lucas, M.A. (2012) *Foundations of Measurement Fractal Theory for the Fracture Mechanics Applied*. In *Fracture Mechanics*, Edited by Alexander Belov. <https://www.intechopen.com/chapters/41469>
10. Harfa: download. http://www.fch.vut.cz/lectures/imagesci/includes/harfa_download.inc.php
11. ACDSee Professional 2019. <https://www.acdsee.com/en/products/photo-studio-professional>
12. Usov, V.V., Shkatulyak, N.M. (2005) Fractal Nature of the Brittle Fracture Surfaces of Metal. *Materials Science*, 41(1), 62–66. https://www.researchgate.net/publication/226818869_Fractal_Nature_of_the_Brittle_Fracture_Surfaces_of_Metal
13. Мосолов А.Б. (1991) Фрактальная гриффитсова трещина. *Журн. техн. физ.*, 64(7), 57–60. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/24666>

- Mosolov, A.B. (1991) Fractal Griffith crack. *Zhurn. Tekh. Fiz.*, 64, (7), 57–60 [in Russian]. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/24666>
14. Хоникомб Р. (1962) *Пластическая деформация металлов*. Москва, ИЛ. <https://uallib.org/book/2433166/2721d7>
 15. Бернштейн М.Л., Займовский М.А. (1979) *Механические свойства металлов*. Москва, Металлургия. <https://uallib.org/book/2720875/410310>
 16. Usov, V.V., Rabkina, M.D., Shkatulyak, N.M., Cherneva, T.S. (2015) Fractal dimension of grain boundaries and mechanical properties of the metal of oxygen cylinder. *Material science*, 50(4), 612–620. https://www.researchgate.net/publication/276456141_Fractal_Dimension_of_Grain_Boundaries_and_Mechanical_Properties_of_the_Metal_of_Oxygen_Cylinders
 17. Usov, V.V., Gopkalo, E.E., Shkatulyak, N.M. et al. (2015) Texture, Microstructure, and Fractal Features of the Low Cycle Fatigue Failure of the Metal in Pipeline Welded Joints. *Russian Metallurgy (Metally)*, 9, 759–770. https://www.researchgate.net/publication/289569432_Texture_microstructure_and_fractal_features_of_the_low-cycle_fatigue_failure_of_the_metal_in_pipeline_welded_joints
 18. Carney, L.R., Mecholsky, J.J. (2013) Relationship between fracture toughness and fracture surface fractal dimension in AISI 4340 steel. *Mater. Sci. Applicat.*, 4(4), 258–267. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2013.44032>
 19. Glushkov, A., Khetselius, O., Brusentseva, S., Duborez, A. (2014) Modeling chaotic dynamics of complex systems with using chaos theory, geometric attractors, quantum neural networks. *Proc Int. Geom. Center*, 7(3), 87–94, [http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/2938/1/%D0%93%D0%BB%D1%83%D0%A5%D0%B5%D1%86%D0%91%D1%80%D1%83%D0%94%D1%83%D0%B1Pmgc_2014_7_3_13%20\(1\).pdf](http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/2938/1/%D0%93%D0%BB%D1%83%D0%A5%D0%B5%D1%86%D0%91%D1%80%D1%83%D0%94%D1%83%D0%B1Pmgc_2014_7_3_13%20(1).pdf)
 20. Glushkov, A.V., Buyadzi, V.V., Ternovsky, V.B. et al. (2018) A chaos-dynamical approach to analysis, processing and forecasting measurements data of the chaotic quantum and laser systems and sensors. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 15(4) 41–49, <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/4481/1/2018%20T15%20%234%20CEMST.pdf>
 21. Usov, V., Rabkina, M., Shkatulyak, N. et al. (2020) Anisotropy of Fractal Dimensions of Fractures and Loading Curves of Steel Samples During Impact Bending. *Material Science*, 17(4), 142–151. <http://ijmse.iust.ac.ir/article-1-1680-en.pdf>
 22. Kondryakov, E.A., Zhmaka, V.N., Kharchenko, V.V. et al. (2005) System of Strain and Load Measurement in Dynamic Testing of Materials. *Strength Mater*, 37, 331–335. <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0046-6>
 23. *Сталь. Испытание на ударную прочность по Шарпи образцов с V-образным надрезом. Инструментальный метод испытания*. <http://rossert.narod.ru/alldoc/info/2z77/g39315.html>
 24. Winston, R. (Editor) (2015) *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety*, Handbook. <https://www.worldcat.org/title/oil-and-gas-pipelines-integrity-and-safety-handbook/oclc/904715784>
 25. Pineau, A., Benzerga, A.A., Pardo, T. (2016) Failure of metals I: Brittle and ductile fracture. *Acta Materialia*, 107, 424–483. <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10019128Pineau>

APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS IN DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF METAL STRUCTURE ELEMENTS

V.V. Usov¹, M.D. Rabkina², N.M. Shkatulyak¹, N.I. Rybak¹, O.O. Stofel³

¹K.D. Ushinskii South-Ukraine National Pedagogical University. 26 Staroportofrankivska Str., 65020, Odessa, Ukraine. E-mail: valentinusov67@gmail.com

²E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: marjanara17@gmail.com

³National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine

It is shown that fractal analysis, as an additional tool of technical diagnostics and non-destructive testing, allows determination of the most important features of the state and behaviour of metal structure elements during their operation and failure. Examples of application of fractal dimension of the fractures are presented to assess the critical dimension of brittle cracks and to determine its effect on impact toughness, yield limit, ultimate strength, and destructive pressure at hydraulic testing, and to detect the interrelation of fractal dimension with fatigue life after low-cycle fatigue fracture of metal of pipeline welded joints. It is found that the nature of fractal dimensions of the fractures and diagrams of time dependence of the applied load at impact loading is due to the direction of cutting and temperature of testing the samples. It is shown that the main component of {001} <110> texture of low-alloyed steel promotes an increase of fractal dimension of the fractures and development of brittle fracture at impact testing. Ref. 25, Tabl. 4, Fig. 9.

Keywords: impact testing, fractal dimension, brittle crack, destruction

Надійшла до редакції 16.12.2021

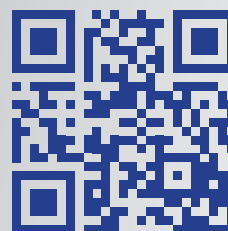
Materials, methods and technologies

24th International Conference

19-22 August, 2022

Burgas, Bulgaria

<http://bit.ly/2Aa6Jk3>



ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗМІНИ РОЗПОДІЛУ ПАРАМЕТРІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ МАТЕРІАЛІВ

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

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

Забезпечення безаварійної роботи конструкцій та споруд є вкрай важливою і актуальною задачею. Тому значна увага науковців приділяється розробці нових методів, обладнання та методичних матеріалів для їх реалізації у промисловості. Особлива увага приділяється стану матеріалу конструкцій та споруд для своєчасного прийняття рішень і недопущення аварійних або нештатних ситуацій. Проводиться дослідження змін параметрів акустичної емісії (АЕ) на різних етапах випробування зразків матеріалів. У роботі представлено розробку підходів до аналізу розподілу параметрів подій АЕ. На основі аналізу даних багаточисельних досліджень різних матеріалів попередньо визначені інформативні параметри, розподіл яких потребує дослідження. Розроблені алгоритми та визначені засоби налаштування аналізу розподілу параметрів подій АЕ впроваджені у робочій частині та візуальному інтерфейсі програми ЕМА-3.92. Встановлено, що зміни параметрів АЕ мають певні закономірності, що показано на результатах випробувань зразків зі сталі 17ГС, та можуть бути використані для оцінки стану матеріалів при проведенні АЕ контролю та моніторингу. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 11.

Ключові слова: акустична емісія, вид розподілу, зміна параметрів, зразки матеріалів, механічні випробування

Метод АЕ протягом останніх десятиліть успішно використовується для оцінки стану промислових конструкцій, особливо підвищеної небезпеки і тривалого експлуатування [1–6].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона також проводяться дослідження АЕ для удосконалення самого процесу контролю стану матеріалів і аналізу отриманих даних, а також розробляються методики та інша нормативна документація (НД) для застосування отриманих результатів [7–9]. Створені системи АЕ контролю та моніторингу дозволяють отримувати значні об'єми інформації з об'єктів контролю та оперативно її обробляти. Сучасний розвиток АЕ приладів та обчислювальної техніки, такі можливості, як взаємодія між програмами, багатозадачність та розвинений графічний інтерфейс дозволяють проводити більш глибокі та серйозні дослідження у цьому напрямку, зокрема безпосередньо у реальному часі, зіставивши характер змін окремих параметрів АЕ та стан матеріалів за даними АЕ. Це вимагає проведення випробувань зразків різних матеріалів та відповідних алгоритмів оцінки.

Розподіл певного інформативного АЕ параметра може нести принципово важливу інформацію щодо процесів, які відбуваються у матеріалі під час деформування та/або експлуатаційного напруження матеріалу. Основним чинником, що визначає корисність використання розподілу того чи іншого параметра, слугує наявність зміни цього розподілу при зміні стану матеріалу.

Мета досліджень – вивчення зміни параметрів АЕ у процесі навантаження зразків та встановлення характеристик їх розподілів, що дозволить удосконалити процедуру оцінки стану матеріалів конструкцій під час проведення АЕ контролю і моніторингу.

Обладнання для проведення досліджень. Для вивчення зміни параметрів АЕ на різних етапах навантаження зразків матеріалів при проведенні механічних випробувань використовували випробувальний стенд на базі розривної машини з гідравлічним приводом Р-20, тензометричну станцію для вимірювання параметрів навантаження, систему АЕ діагностики ЕМА-3 (рис. 1, а), зразки матеріалів спеціальної форми (рис. 1, б). Для отримання даних на поверхні зразків встановлювали лінійну антену з 4-х датчиків АЕ (рис. 1, в). Попередньо обладнання для проведення досліджень було перевірено, протестовано з використанням в якості імітаторів сигналів АЕ встановлених на зразках датчиків АЕ, налаштовані вихідні дані для програмного забезпечення системи [10–11].

Основні технічні характеристики системи АЕ діагностики ЕМА-3 наведені в таблиці.

Обладнання проходить щорічну метрологічну перевірку [12]. Чутливість кожного з задіяних каналів АЕ та відповідних датчиків, налаштування порогів дискримінації амплітуд є тотожними. Перед кожним наступним випробуванням підтверджували чутливість каналів (рис. 2) та точність визначення координат подій АЕ шляхом тестування від

Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Бойчук О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-5800-1549>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>

© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко, 2022

Основні технічні характеристики приладу ЕМА-3

Одноплатний промисловий комп'ютер PCA-6751	Процесор Intel Pentium MMX; ОЗП 64МБ Інтерфейс Ethernet 10/100 Mbps	
Контролер акустичної емісії АЕС402		
Кількість незалежних каналів АЕ	4	
Безперервний потік АЕ імпульсів, що обробляється	> 1000/с	
Частотний діапазон оброблюваного АЕ сигналу	25...1000 кГц	
Вимірювані первинні параметри АЕ		
Параметр АЕ	Одиниця виміру	Макс. значення
Час надходження (Elapse Time)	125 нс	7 років
Час наростання (Rise Time)	125 нс	100 мс
Тривалість (Duration)	125 нс	1,6 с
Число подій АЕ (Counts)	1	1 048 576
Пікова амплітуда (Peak), логарифмічний режим	0,5 дБ	123 дБ(мкВ)
Середнє значення (Average), логарифмічний режим	0,5 дБ	123 дБ(мкВ)

імітаторів сигналів АЕ, в якості яких використовували встановлені датчики АЕ.

Методика та результати дослідження. Методика дослідження передбачала статичне розтягнення зразків до моменту руйнування (рис. 1, в) з синхронним вимірюванням та записом стандартних АЕ характеристик досліджуваного матеріалу. Процес навантаження зразків та зміни параметрів АЕ відстежувались на робочому екрані системи як у цифровій, так і у графічній формі.

Параметри сигналів АЕ, що отримують під час випробувань, можна розділити на вимірювані та

похідні від них, а також на такі, що стосуються форми окремого сигналу, і такі, що характеризують розповсюдження хвиль АЕ у часі та просторі.

На підставі аналізу проведених випробувань зразків різних типів і розмірів та даних АЕ моніторингу та контролю промислових конструкцій були визначені п'ять параметрів для більш детального аналізу: амплітуда (A , дБ), час наростання амплітуди до максимуму або $Rise\ Time$ (R , мкс), тривалість (W , мкс), число осциляцій (C), частота (F , Гц). Вказані параметри є основними при отриманні первинної АЕ інформації [13].

Ці параметри безпосередньо вимірюються АЕ обладнанням і стосуються форми окремих дискретних сигналів, початком яких вважається перетин амплітудою безперервно вимірюваної АЕ встановленого порогу дискримінації, а завершенням – зниження амплітуди нижче цього порогу або програмно обмежена тривалість.

Після проведення випробувань було більш детально проаналізовано зміну визначених для досліджень п'яти параметрів АЕ протягом випробувань зразків. Це дозволило зробити певні висновки щодо повторюваності розподілів основних інфор-

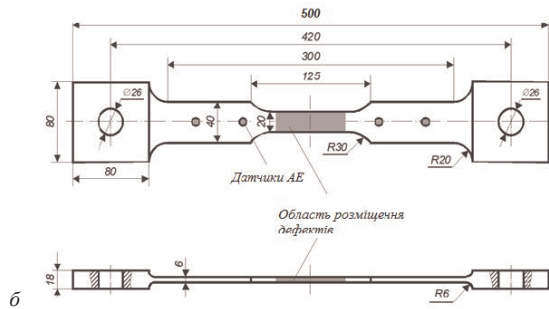


Рис. 1. Обладнання та зразок для проведення досліджень

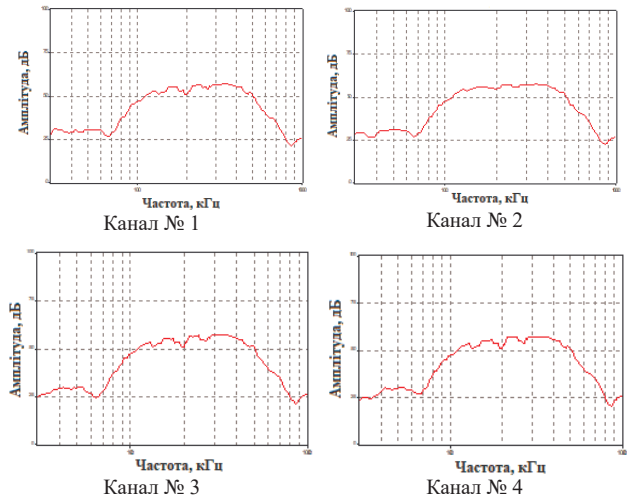


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики задіяних у випробуваннях каналів АЕ за результатами перевірки

мативних параметрів і стало подальшою основою проведених у даній роботі досліджень.

Для візуалізації та додаткової обробки даних використовували оновлену версію програми ЕМА-3.92 з можливістю аналізу розподілу значень параметрів сигналів АЕ по каналах. Розглянемо більш детально нові можливості програми.

Розроблений для аналізу параметрів АЕ екран (рис. 3) містить необхідні елементи для вибору, налаштування параметрів аналізу та порівняння розподілу даних по окремих АЕ каналах з переглядом результатів у графічному вигляді. У реальному часі можливе автооновлення поточного екрану з заданим інтервалом.

Вгорі екрану знаходяться елементи керування, які дозволяють задати кількість смуг розбиття параметрів, а також встановити діапазон даних, для якого виконується побудова графіків розподілу. Ширина смуг визначається шляхом розділення максимального значення відповідного параметра АЕ на їх кількість. Це дозволяє підвищувати інформативність та точність представлення даних.

На кожному графіку можуть бути представлені дані одного або двох каналів АЕ (використання на одному графіку даних з двох вибраних каналів спрощує їх порівняння). У ряду графіків для каналу представлені результати розподілу для п'яти вище визначених для детального аналізу параметрів розподілених по окремих каналах подій АЕ: амплітуда, Rise Time, тривалість, число осциляцій, частота.

Принцип побудови графіків наступний:

1. Канали АЕ (два або один) для кожної серії графіків горизонтального ряду можна вибрати в списку ліворуч.

2. Весь діапазон значень відображуваного параметра, зареєстрованих в процесі вимірювань, розбивається на смуги відповідно до значення текстового поля «число точок розбиття» у верхній частині екрану.

3. По осі абсцис відкладається початкове значення параметра в даній смузі, по осі ординат – кількість попадань параметра у смугу.

4. Передбачено можливість завдання інтервалу спрацювань датчиків, для якого будується розподіл параметрів. Це дозволяє порівнювати різні етапи навантаження об'єктів контролю на основі графіків розподілу.

5. Для графіків передбачений вибір типу графіка (стовпчастий або ступінчастий), відображення – приховування сітки. Для підвищення якості та чіткості відображення графіків передбачено можливість зміни розмірів робочої області завданням висоти та ширини.

6. Дані розподілу можна експортувати до таблиць Excel для більш детального аналізу.

На базі даних раніше проведених випробувань зразків зі сталі 17ГС наведемо види розподілів для визначених вище параметрів, які виявились

найбільш інформативними: амплітуда (A , дБ), час наростання амплітуди до максимуму або Rise Time (R , мкс), тривалість (W , мкс), число осциляцій (C), частота (F , Гц).

При проведенні аналізу даних було встановлено, що дані відповідають двом відомим типам розподілів – нормальному розподілу та гамма-розподілу [14, 15].

Покажемо на прикладі даних, отриманих під час випробувань 14-ти зразків зі сталі 17ГС на статичний розтяг до повного руйнування, як виглядають графіки розподілу параметрів АЕ на початковій та заключній стадіях деформування. Оскільки графіки досить масштабні, а представлена на них інформація є типовою для всіх зразків, покажемо лише деякі з них з метою охарактеризувати загальну картину, що спостерігалась.

Зразок (рис. 1, б) у розривній машині розташований вертикально (рис. 1, в). АЕ канали нумеруються послідовно з верхнього датчика (найближчого від рухомої траверси) до нижнього.

Перш ніж перейти до подання та аналізу графіків розподілу, покажемо на прикладі випробувань одного із зразків, що величини амплітуд та характер накопичення даних АЕ по різних каналах, незважаючи на тотожні налаштування чутливості, суттєво відрізняються.

Під час проведення випробувань для обробки АЕ інформації використовували антенний режим роботи датчиків, який дозволяє за результатами близького за часом спрацювання їх усіх формувати події АЕ і визначати їх координати. При обробці, наведеній нижче, антенний режим змінено на зонний, так що дані кожного каналу розглядаються окремо і кожне спрацювання датчика трактується як самостійна подія АЕ, віднесена до відповідного каналу. Це дозволило побудувати графіки накопичення подій АЕ у залежності від часу випробування (рис. 4), де лінійний графік червоного кольору показує навантаження P (кг), стовпчастий графік синього кольору – амплітуди A (дБ) подій АЕ по кожному з каналів, а крива фіолетового кольору – накопичення подій (N , безрозмірна) – позначена ін-



Рис. 3. Вікно аналізу даних з графіками розподілів даних АЕ по каналах у програмі ЕМА-3.92

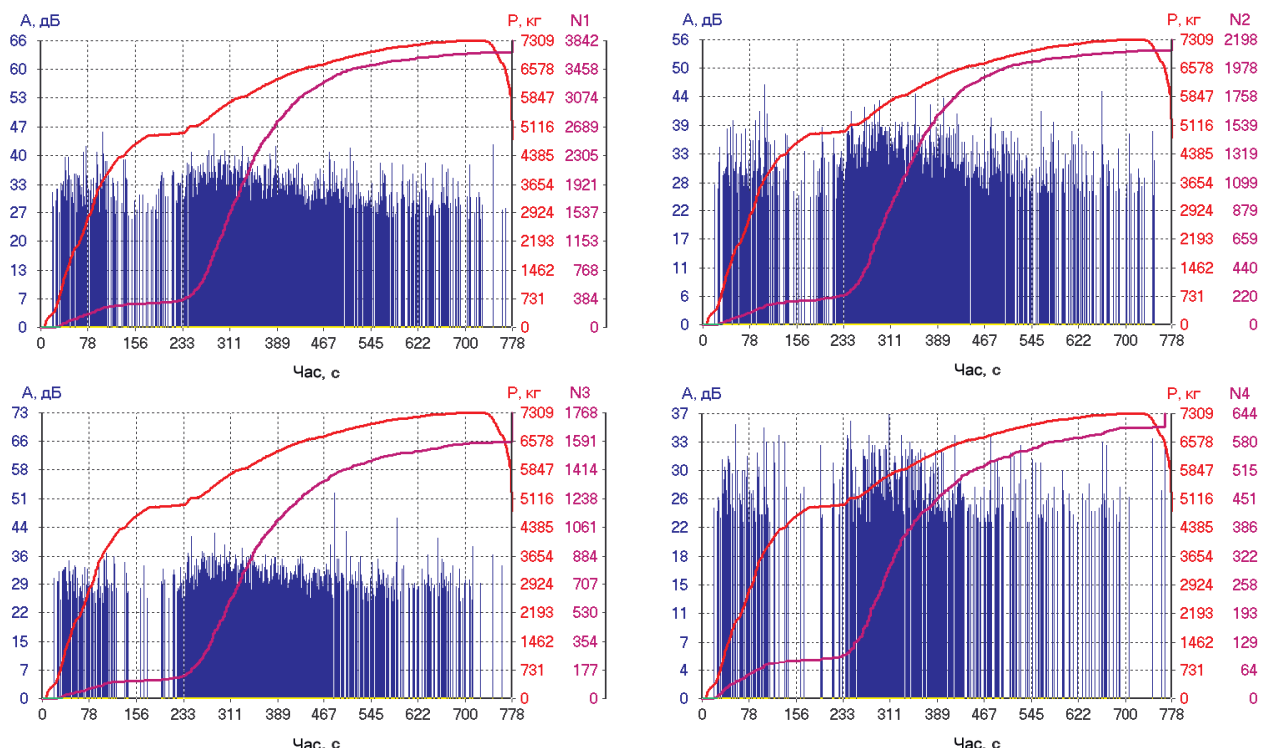


Рис. 4. Результати АЕ випробування одного із зразків для окремих каналів

дексами N від 1 до 4, які вказують, до якого саме каналу АЕ відноситься кожен з чотирьох графіків.

Слід зазначити, що графіки (рис. 4) також можна назвати графіками розподілу вибраних параметрів, але це не статистичний розподіл, а розподіл у часі. Він добре демонструє характер накопичення пошкоджень у міру навантаження та відповідну картину АЕ. Але особливість полягає у тому, що повну картину процесу випробувань можна спостерігати лише після їх завершення. Водночас з графіків видно, що було б корисним отримувати статистичний розподіл параметрів АЕ по окремих каналах на певних стадіях випробувань і порівнювати його на певному масиві даних від початку до кінця випробування. Важливість цього підтверджується тим, що дані, наведені на рис. 4, дають чітку картину різниці даних АЕ як по окремих каналах, так і у часі. Зокрема, амплітуди подій АЕ для АЕ каналів 2 та 3, за винятком моменту повного розриву зразка, є більшими, ніж для каналів 1 та 4. Це пояснюється тим, що послаблена область зразка знаходиться між датчиками 2 та 3 і розвиток руйнування починається біля них, а саме, руйнування для всіх випробуваних зразків відбулося або точно по центру зразка, або близько до нього, тобто посередині між датчиками 2 і 3.

Враховуючи, що для кожного випробуваного зразка було зареєстровано декілька тисяч спрацювань датчиків, для початкового аналізу було прийняте рішення порівнювати розподіл АЕ параметрів (амплітуда, Rise Time, тривалість, число осциляцій, частота) на базі однієї тисячі перших та такої ж кількості останніх спрацювань. Це цікаво

також тому, що на заключній стадії деформування кількість спрацювань датчиків є меншою, ніж на початкових, а основною метою аналізу розподілів було встановити наявність різниці між початковою та заключною стадіями деформування на графіках розподілів. Встановлення такої різниці дає основу для подальших досліджень, які б дозволили за кількісними даними розподілів розпізнавати, на якій стадії руйнування знаходиться матеріал.

Графіки зміни параметрів АЕ для трьох зразків для 1000 перших та 1000 останніх спрацювань датчиків АЕ, що були зареєстровані під час проведення випробувань, тобто на різних етапах навантаження зразків, показано на рис. 5–10. Порівняємо для пар каналів (1 ряд – канали 1 і 2; 2 – 2 і 3; 3 – 3 і 4; 4 – 4 і 1) розподіли відповідних параметрів АЕ (амплітуда (A , дБ) – 1-й стовпчик графіків; Rise Time – (R , мкс) – 2-й стовпчик графіків; тривалість (W , мкс) – 3-й стовпчик графіків; число осциляцій (C) – 4-й стовпчик графіків; частота (F , Гц) – 5-й стовпчик графіків).

Відмінність кривих підтверджує принципову можливість розпізнавання стану матеріалу і перспективність подальших досліджень у даному напрямку. Графіки були вибрані з результатів обробки випробувань 14-ти зразків як найбільш типові. Наявна ж різниця з іншими результатами випробувань не є принциповою, тобто встановлені закономірності є стійкими, як мінімум, для досліджуваного матеріалу – сталі 17ГС. Відзначимо також, що кількість смуг розбиття складала 50. Максимальне значення аналізованого параметра розбивалося на дане число, після чого перевірялося попадання па-

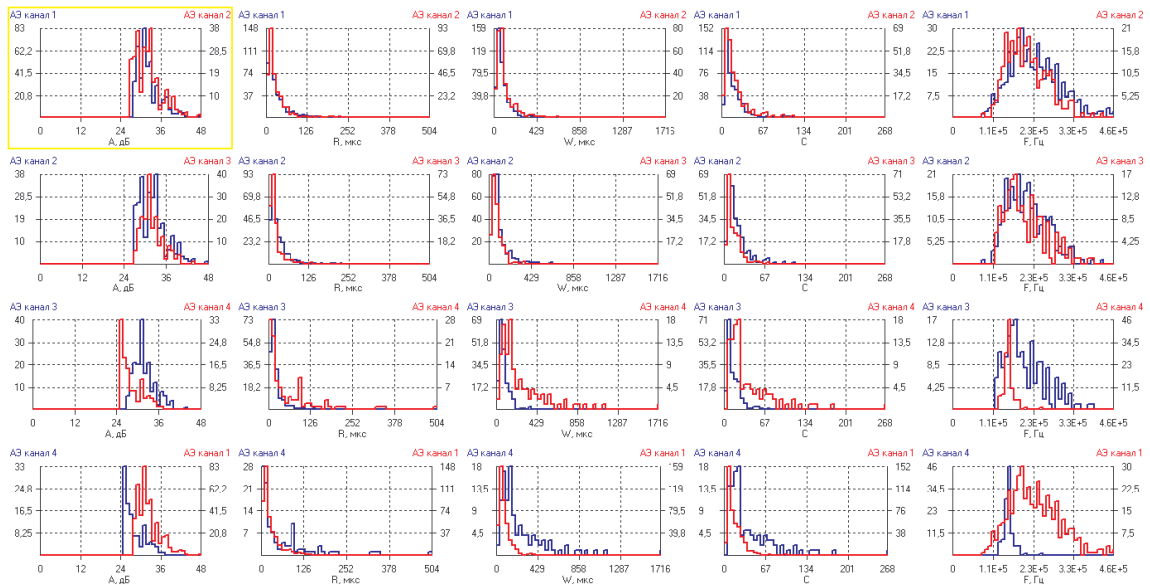


Рис. 5. Зразок № 1. Графіки розподілу параметрів АЕ для перших від початку випробування 1000 спрацювань датчиків

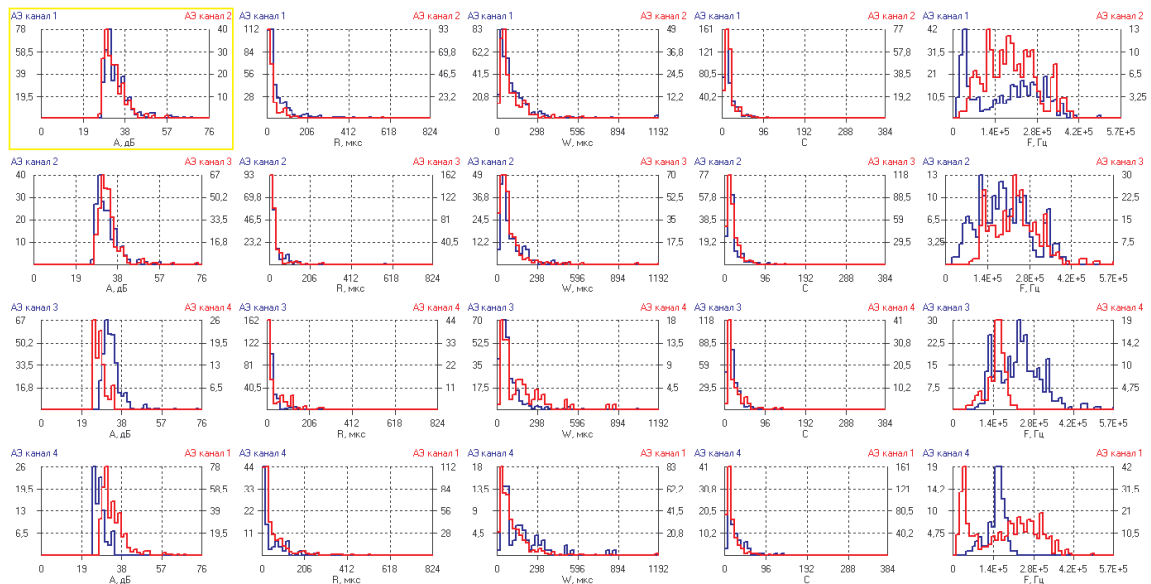


Рис. 6. Зразок № 1. Графіки розподілу параметрів АЕ для останніх перед завершенням випробування 1000 спрацювань датчиків

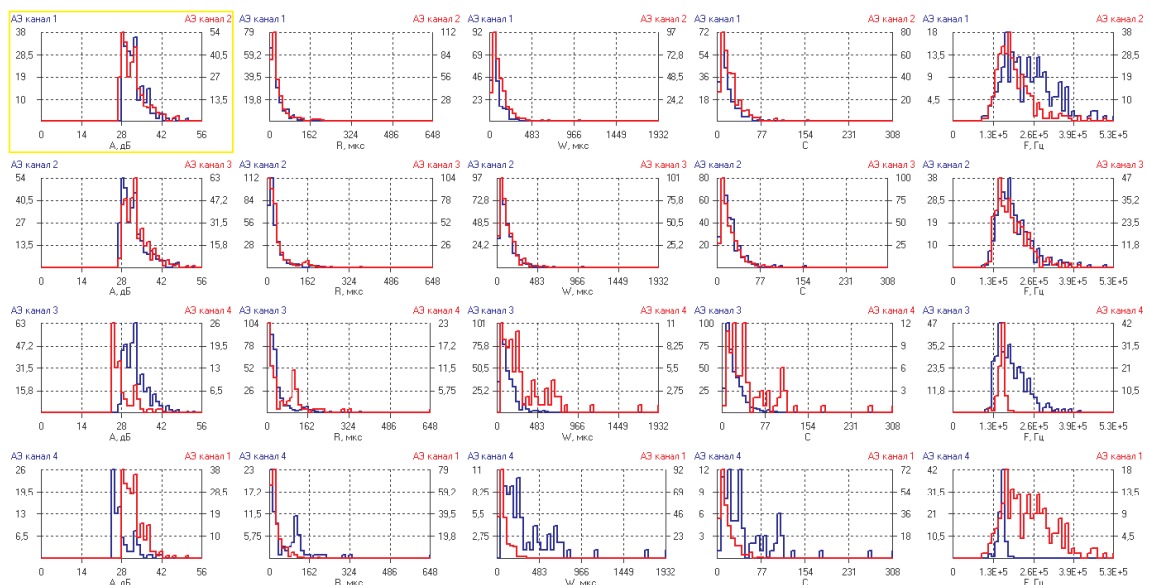


Рис. 7. Зразок № 2. Графіки розподілу параметрів АЕ для перших від початку випробування 1000 спрацювань датчиків

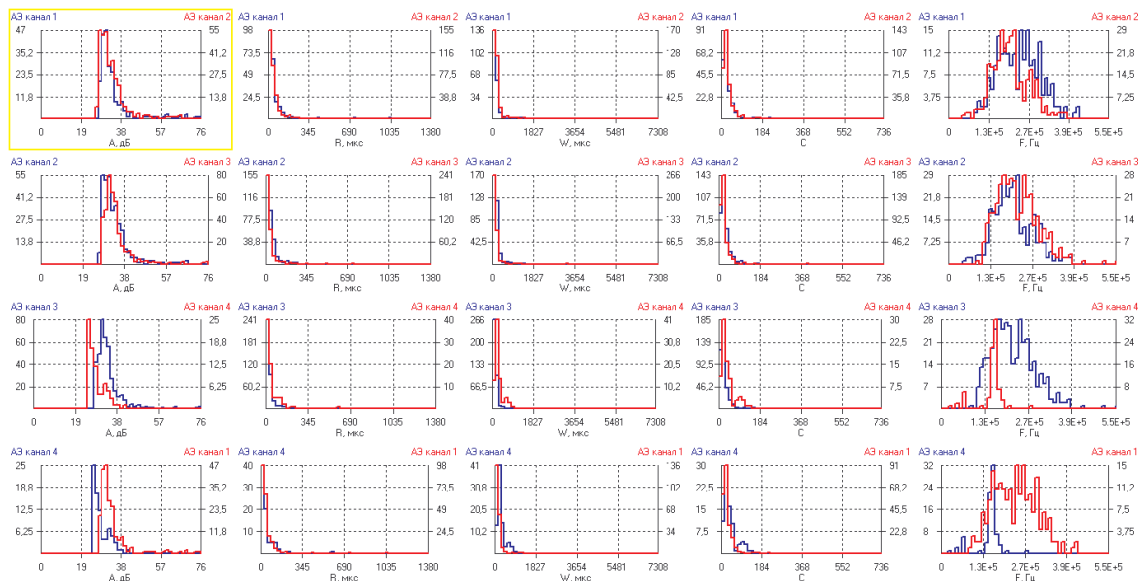


Рис. 8. Зразок № 2. Графіки розподілу параметрів АЕ для останніх перед завершенням випробування 1000 спрацювань датчиків

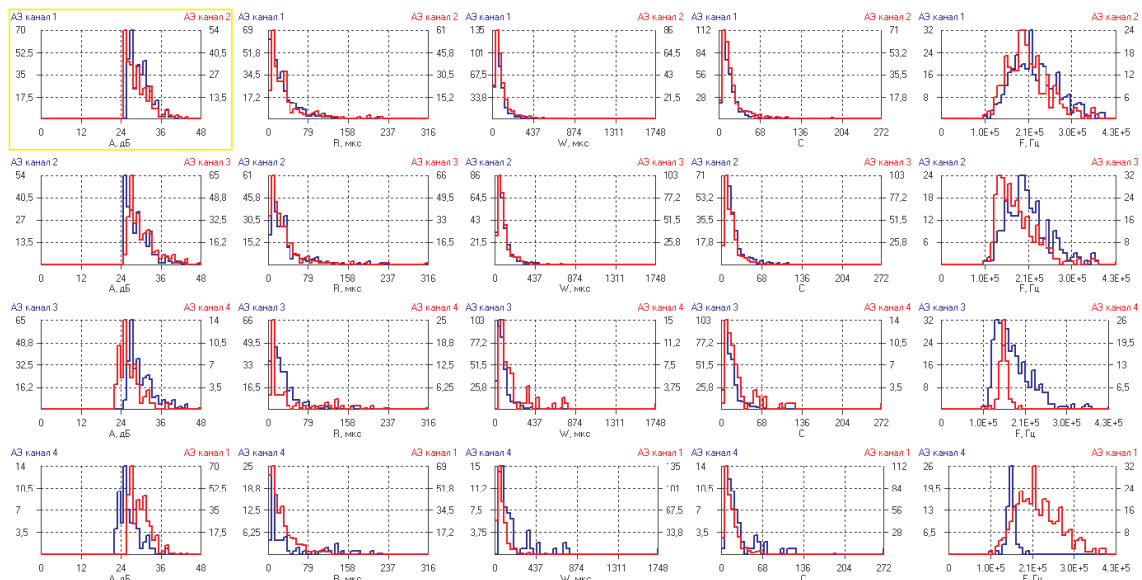


Рис. 9. Зразок № 3. Графіки розподілу параметрів АЕ для перших від початку випробування 1000 спрацювань датчиків

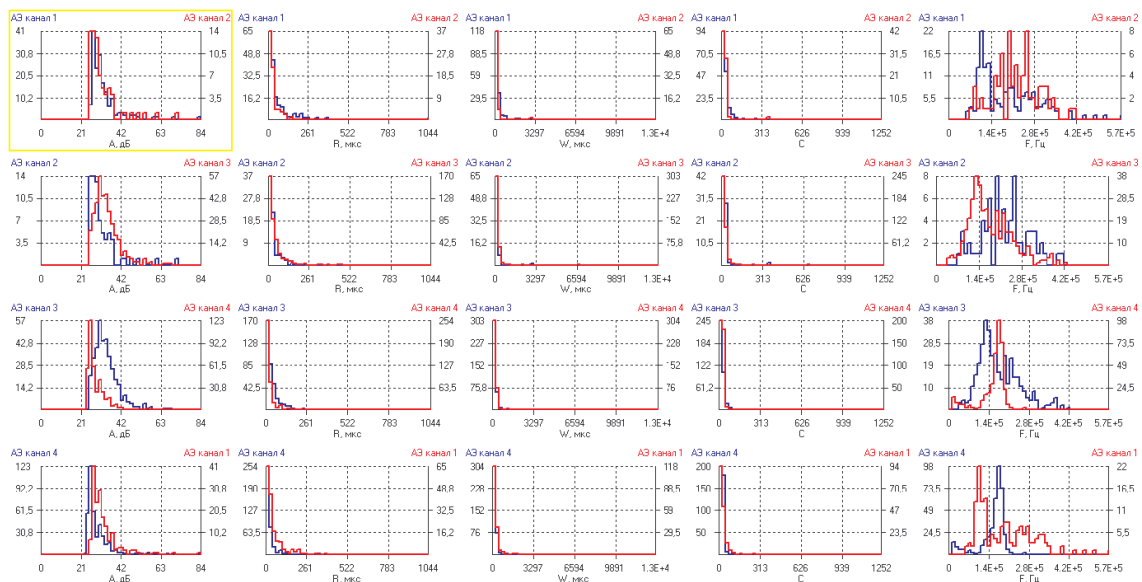


Рис. 10. Зразок № 3. Графіки розподілу параметрів АЕ для останніх перед завершенням випробування 1000 спрацювань датчиків

раметра в одну з 50-ти смуг. Деякі смуги не містять параметрів, відповідно на графіках це відображається лінією, що співпадає з віссю абсцис.

Відзначимо, що дані випробувань трьох зразків можна вважати достатньо інформативними і типовими, щоб не показувати інші. Нумерація зразків на рис. 5–10 не співпадає з реальним порядковим номером їх випробування, вони пронумеровані послідовно як 1, 2 і 3.

Як бачимо з наведених вище графіків випробувань, отримані розподіли мають певні стійкі закономірності, а саме:

1. Загальний вид розподілів кожного з аналізованих параметрів АЕ має в цілому однаковий вигляд для усіх 14-ти випробуваних зразків. Це свідчить про те, що такий вигляд розподілу не є випадковим, а вказує на певні властивості АЕ під час випробувань, які можна аналізувати та описувати кількісно.

2. Для амплітуди A та частоти F закономірність розподілу має, з певними похибками, вид нормального (гаусівського).

3. Для часу наростання сигналу R , кількості осциляцій C та тривалості сигналу W розподіл має вигляд, найбільш подібний до гамма-розподілу.

4. Розподіл кожного з аналізованих параметрів у кінці випробування відрізняється від того ж розподілу на початку випробування. Ці зміни мають стійкі закономірності, як кількісні, так і якісні, що дозволяє рекомендувати більш детальне дослідження таких розподілів для подальшого розпізнавання стану матеріалу.

До таких змін відносяться:

- збільшення максимуму амплітуди; при цьому інші параметри змінюються стабільно для кожного з датчиків, але у різних експериментах по-різному;
- відхилення розподілу амплітуди від нормального таким чином, що ліворуч від умовного центру спостерігається більша крутизна кривої розподілу, ніж праворуч;
- зміщення умовного центру розподілу амплітуд ліворуч при наближенні до руйнування (при цьому слід пам'ятати, що графіки зведено до однакового розміру, їх мінімуми та максимуми не співпадають, отже йдеться про відносне відхилення);
- розподіл частоти перед руйнуванням значно ближче за своєю формою до нормального, ніж на початку випробувань;

• графіки для датчиків 2 і 3 мають більш близьку між собою форму розподілів усіх параметрів, ніж інші. Це пояснюється наближеністю даних датчиків до зони накопичення пошкоджень і кінцевого джерела руйнування.

З метою перевірки відповідності отриманих даних вказаним вище видам розподілів дані експортували до MS Excel у вигляді таблиць, стовпці яких містять по 50 елементів, які відповідають кількості

попадань кожного параметра у смугу з відповідним номером від 1 до 50. Після цього для кожного стовпця таблиці розраховували функцію розподілу та будували її графік. Враховуючи дуже велику кількість таблиць та графіків, наведемо нижче два графіки для зразка № 1 для таких параметрів, отриманих АЕ каналом № 1, як частота F (рис. 11, а) та час наростання сигналу до максимуму R на початковій стадії деформування (рис. 11, б), які є достатньо показними і типовими для усіх отриманих даних.

По осі абсцис відкладемо номер смуги, по осі ординат – значення функції розподілу. Графік побудуємо стовпчастий і для більшої наочності нанесемо на нього умовну огинаючу, яка показує відповідність отриманої функції розподілу його типу.

Для нормального розподілу його параметри, математичне сподівання та дисперсія, отримані автоматично шляхом розрахунку. Для гамма-розподілу необхідний підбір найбільш оптимальних значень параметрів α та β , які у даному випадку обидва дорівнюють десяти. Відмінність даних параметрів для розподілів інших даних вказує на необхідність автоматизації їх підбору.

Як бачимо, на рис. 11, а спостерігається типова функція нормального розподілу; на рис. 11, б – гамма-розподілу. Таким чином, проведені розрахунки та побудовані на їх основі графіки підтверджують стійкість знайдених закономірностей для даної серії АЕ випробувань.

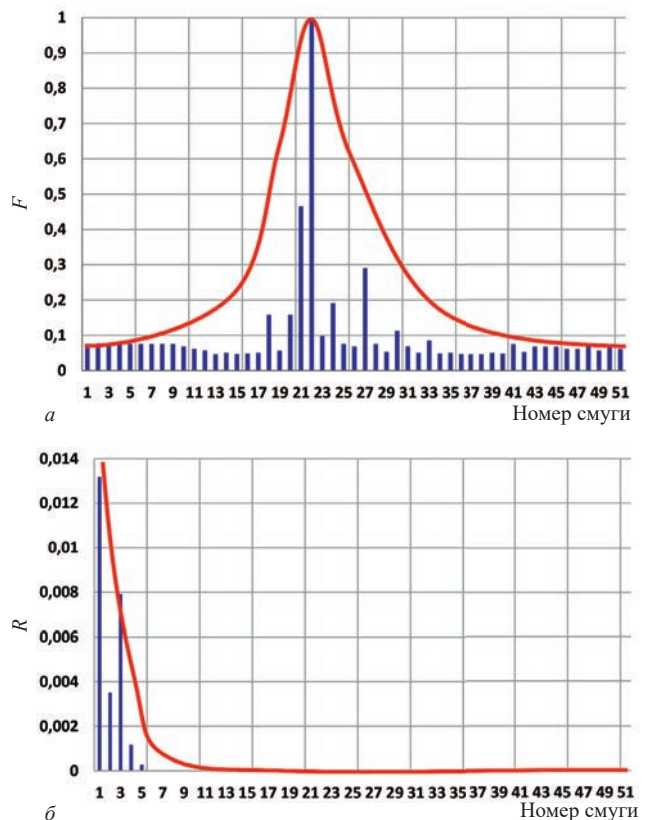


Рис. 11. Зразок № 1. Функція розподілу параметрів АЕ (канал № 1) для перших від початку випробування 1000 спрацювань датчиків: а – частота; б – час наростання до максимуму

Висновки

Проведений аналіз отриманих під час випробувань 14-ти зразків зі сталі 17ГС показав наявність стійких закономірностей у розподілах параметрів АЕ під час навантаження та руйнування зразків.

Попередня оцінка та аналіз отриманих розподілів показують, що частина з них близька до нормального типу, а частина – до гамма-розподілу.

Для визначення розподілів АЕ параметрів для зразків з інших матеріалів необхідно провести серію випробувань та порівняти отримані результати для різних матеріалів.

Для більш детального дослідження розподілів параметрів АЕ як при проведенні випробувань матеріалів, так і при проведенні АЕ контролю реальних об'єктів, необхідне подальше вдосконалення програми ЕМА, зокрема реалізація автоматизації зсуву вибірки аналізованих даних у міру їх накопичення, а також підбору коефіцієнтів розподілу.

Детальне вивчення кількісних та якісних закономірностей розподілів параметрів АЕ при проведенні АЕ контролю і моніторингу дозволить покращити якість оцінки стану пошкодженого матеріалу.

Список літератури/References

1. Ono, K. (2015) Review on Structural Health Evaluation with Acoustic Emission. *Appl. Sci.*, **8**, 958.
2. Gholizadeh, S., Leman, Z., Baharudin, B.T.H.T. (2015) A review of the application of acoustic emission technique in engineering. *Struct. Eng. Mech.*, **54**, 1075–1095.
3. Eaton, M., Pearson, M., Lee, W., Pullin, R. (2015) Accurate damage location in complex composite structures and industrial environments using acoustic emission. *Proc. J. Phys. Conf. Ser.*, **628**, 012105.
4. Nazarchuk, Z., Skalskyi, V., Serhiyenko, O. (2017) *Acoustic Emission: Methodology and Application*. Springer, Cham, Switzerland, ISBN 978-3-319-49350-3.
5. Журавльов С.В., Ободовський Б.М., Яременко М.А. та ін. (2021) Впровадження технології АЕ моніторингу на ОПЗ. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, **3**, 26–32. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.03.03>
6. Каськівський В.Р. (2016) Явище акустичної емісії в оцінюванні пошкодженості елементів конструкцій. *Вісник НАН України*, **2**, 59–66.

7. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А. та ін. (2021) Інтегрування методу АЕ в технологію ремонту і продовження ресурсу металоконструкцій. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, **1**, 11–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.02>
8. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А., Овсienko М.А. (2018) Применение технологии акустико-емиссионного контроля при оценке состояния сосудов химического производства. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 34–41.
9. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2018) Application of the technology of acoustic emission monitoring at evaluation of the condition of vessels in chemical production. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 34–41 [in Russian].
10. Патон, В.Е., Лобанов, Л.М., Недосека, А.Я., Недосека, С.А. (2018) On the application of AE technology in continuous monitoring of pipelines of power units operating at high temperatures. *International Journal of Condition Monitoring*, **Vol. 8**, 100–105.
11. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А. и др. (2019) Особенности АЭ диагностики. Технология, аппаратура и алгоритмы. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 3–12.
12. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. et al. (2019) Peculiarities of AE diagnostics. Technology, equipment and algorithms. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 3–12 [in Russian].
13. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9. *Там само*, **3**, 16–22.
14. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2013) Software of AE diagnostic system ЕМА-3.9. *Ibid.*, **3**, 16–22 [in Russian].
15. (2004) МПУ 002/10-22-2004. *Метрологія. АЕ діагностичний комплекс ЕМА (електронна частина). Методика повірки*. Київ, Укрметрестандарт.
16. (2004) МПУ 002/10-22-2004. *Metrology. AE diagnostic complex (electronic part). Verification procedure*. Kyiv, Ukrmetreststandart [in Ukrainian].
17. Stone, D.E., Dingwall, P.F. (1977) Acoustic Emission parameters and their interpretation. *NDT international*, **10**, 51–56.
18. Шенк Х. (1972) *Теория инженерного эксперимента*. Москва, Мир.
19. Shenk, H. (1972) *Theory of engineering experiment*. Moscow, Mir [in Russian].
20. Феллер В. (1984) *Введение в теорию вероятностей и ее приложения*. Москва, Мир.
21. Feller, V. (1984) *Introduction to probability theory and its application*. Moscow, Mir [in Russian].

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF APPLYING A CHANGE IN THE DISTRIBUTION OF ACOUSTIC EMISSION PARAMETER TO IMPROVE DETERMINATION OF MATERIAL STATE

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

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: inpat59@ukr.net

Ensuring trouble-free operation of structures and constructions is an extremely important and urgent task. That is why scientists pay a lot of attention to development of new methods, equipment and procedural materials for their implementation in industry. Particular attention is given to the state of material of the structures and constructions for timely decision taking and avoiding accidents or emergencies. Investigation of changes of acoustic emission (AE) parameters at different stages of testing material samples is conducted. Development of approaches to analysis of the distribution of AE event parameters is presented in the work. Informative parameters the distributions of which need to be studied, were tentatively determined, proceeding from analysis of the data of numerous investigations of different materials. Developed algorithms and determined means for setting up analysis of distribution of AE event parameters were introduced into the working part and visual interface of ЕМА-3.92 program. It is established that changes of AE parameters have certain regularities which is demonstrated by the results of testing samples from 17GS steel, and they can be used for assessment of the state of materials, when performing AE control and monitoring. Ref. 15, Tabl. 1, Fig. 11.

Keywords: acoustic emission, distribution type, parameter change, material samples, mechanical testing

Надійшла до редакції 31.01.2022

AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE TESTING OF STEEL ALLOYS MICROSTRUCTURE BASED ON MULTIFREQUENCY EDDY CURRENT METHOD

АВТОМАТИЗОВАНИЙ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ МІКРОСТРУКТУРИ СТАЛЕВИХ СПЛАВІВ НА БАЗІ БАГАТОЧАСТОТНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО МЕТОДУ

Yu. O. Kalenychenko, V. G. Bazhenov, S.S. Ratsebarskiy, O.G. Kalenychenko
Ю.О. Калениченко, В.Г. Баженов, С.С. Рацбарський, О.Г. Калениченко

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

E-mail: yuriykalenychenko@gmail.com

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 57. E-mail:

yuriykalenychenko@gmail.com

The traditional and most common methods for controlling the results of heat treatment of steel alloys are determination of hardness by measuring the parameters of indentation and quantitative and stereometric metallography. These methods are time-consuming in terms of control operations, which are performed according to a special methodology consisting of a visual comparison of the study results with the standard scales, followed by statistical extrapolation to the entire batch or plane of the product. The quality of such operations largely depends on the qualifications of the operators performing them. Presented in this article is the application of an automated open-circuit system of program control of multifrequency eddy current non-destructive testing as an alternative to traditional methods of control of the results of steel alloys heat treatment. It is shown that at certain parameters of programming the measurement operations there is a correspondence between the phase characteristics of the response signal of the 5th harmonic and the type of heat treatment, hardness, and microstructure arrangement in grade 40X steel samples. 28 Ref., 1 Tabl. 1, 5 Fig.

Традиційними та найбільш поширеними методами контролю результатів термічної обробки сталевих сплавів є визначення твердості шляхом вимірювання параметрів відбитка після вдавлювання індентора та кількісна і стереометрична металографія. Ці методи потребують багато часу на здійснення операцій контролю, які виконуються за спеціальною методологією, за якою проводиться візуальне порівняння результатів дослідження зі стандартними шкалами з подальшою статистичною екстраполяцією на всю партію або площину виробу. При цьому якість виконання таких операцій в значній мірі залежить від кваліфікації персоналу, що їх виконує. Представлено застосування автоматизованої розімкненої системи програмного управління багаточастотного вихрострумowego неруйнівного контролю як альтернативи до традиційних методів контролю результатів термічної обробки сталевих сплавів. Показано, що при певних параметрах програмування операцій вимірювання спостерігається відповідність між фазовими характеристиками сигналу відгуку 5-ї гармоніки та типом термічної обробки, твердістю, будовою мікроструктури зразків зі сталі марки 40X. Бібліогр. 28, табл. 1, рис. 5.

Keywords: multifrequency eddy current non-destructive testing, automated open-circuit system, program control, microstructure, thermal treatment

Ключові слова: багаточастотний вихрострумований неруйнівний контроль, автоматизована розімкнена система, програмне управління, мікроструктура, термічна обробка

Introduction

Until recently, the development of non-destructive testing (NDT) systems has progressed in a self-sufficient way with the main focus on improving the signal-noise ratio performance, artifact control, compliance with a number of industry standards. Thanks to the use of digital signal processing technologies, NDT operations reach the level of application in automated enterprise management systems when NDT result data become the information objects of automated decision-making systems.

One of the new areas of research with regard to digitalization and automation of production processes is the use of NDT methods, primarily electromagnetic [1–4] and ultrasonic [5, 6], to determine the structurally sensitive physical properties of metals and alloys.

The aim of the present study is to analyze the possibility of using automated eddy current NDT to characterize the microstructure of 40X steel alloy after heat treatment. Using this method, it is planned to establish a correspondence between the amplitude-phase-amplitude characteristics (APAC) of the

Kalenychenko Yu.O. <https://orcid.org/0000-0001-5327-8530>, Bazhenov V.G. <https://orcid.org/0000-0002-8858-4412>
Ratsebarskiy S.S. <https://orcid.org/0000-0002-3491-2097>, Kalenychenko O.G. <https://orcid.org/0000-0003-3315-1764>
© Yu. O. Kalenychenko, V. G. Bazhenov, S.S. Ratsebarskiy, O.G. Kalenychenko, 2022

polyharmonic eddy current response signal and the type of heat treatment, microstructure, and hardness of a 40X steel sample.

Setting the task. The NDT eddy current method is one of the most widely used methods of non-destructive testing. The principle of its operation is based on tracking, determining and analyzing the interaction of an external source electromagnetic field, which is usually the inductor (one or more) of the eddy current converter (ECC) with the electromagnetic field of eddy currents arising in the object under control (CO) as the result of impact of ECC electromagnetic field on it. Information on the CO is obtained from the distribution of eddy current densities and is determined by ECC design, geometric characteristics and parameters of electrical conductivity and magnetic permeability of the CO material, and spatial position of ECC relative to the CO [7, 8].

Considered as critical for eddy current NDT are such disadvantages as manifestation of eddy currents only in electrically conductive materials, which limits the application of the method for products made of metal alloys or with a carbon content (carbon composites); the lift-off effect of ECC from the surface of the CO, as a result of which artefacts are formed, and it significantly complicates the inspection of CO of complex geometric shape; insignificant depth of penetration of the ECC field into the CO material (surface effect) [7, 8]. The eddy current NDT advantages are the absence of contact of ECC with CO, simplicity of ECC design in certain models (with one or two inductors), lower in comparison with other NDT methods, such as acoustic or opto-acoustic, dependence of signals on temperature and humidity, readiness of the CO surface for testing, safety for humans and animals [7, 8].

Eddy current NDT, as a rule, is used for detection and parameterization of defects, first of all cracks, pores, various inclusions, etc. The set of disadvantages and advantages determines the scope of eddy current NDT. For example, due to its non-contact advantage, the method is used in automated NDT systems, including robotic scanners, which provide high-speed continuous control of products of simple geometric shapes, and the lift-off effect, for example, is the basis for dielectric coating thickness measurement.

Improving the sensitivity of NDT eddy current systems and automating digital processing of response signals have opened a new direction of its application – determining the conformity of the CO structure to the reference or establishing structural heterogeneity of CO material, for example, assessing the quality of mechanical and heat treatment [9–18]. The detection of structurally sensitive parameters of ECC signals and the search for optimal conditions for the excitation process of CO according to the criteria

of sensitivity to the level of heat treatment, type of microstructure and hardness of 40X steel samples are presented in this article.

The detection of structurally sensitive parameters of ECC signals and the search for optimal conditions for the excitation process of CO according to the criteria of sensitivity to the level of heat treatment, type of microstructure and hardness of 40X steel samples are presented in this article.

Mechanical, dynamic, and fatigue tests, macro- and microanalysis, chemical methods of phase analysis of steel, electron microscopy and electrography, X-ray microscopy and X-ray diffraction analysis, quantitative and stereometric metallography (statistical methods) for studying the structure of metal alloys have a low level of productivity, require significant funds for the maintenance of expensive and complex equipment, and for some methods require special safety measures, which leads to significant time and financial losses of production processes. Due to the described advantages and progress of eddy current NDT, it becomes an effective alternative to these traditional methods under the condition of correlation between ECC signals and chemical and physical properties of CO material, which is manifested through its electrical conductivity and magnetic permeability.

Main part. Heat treatment of iron-carbon alloys is one of the most common technological operations to change their microstructure [19, 20]. The opera-

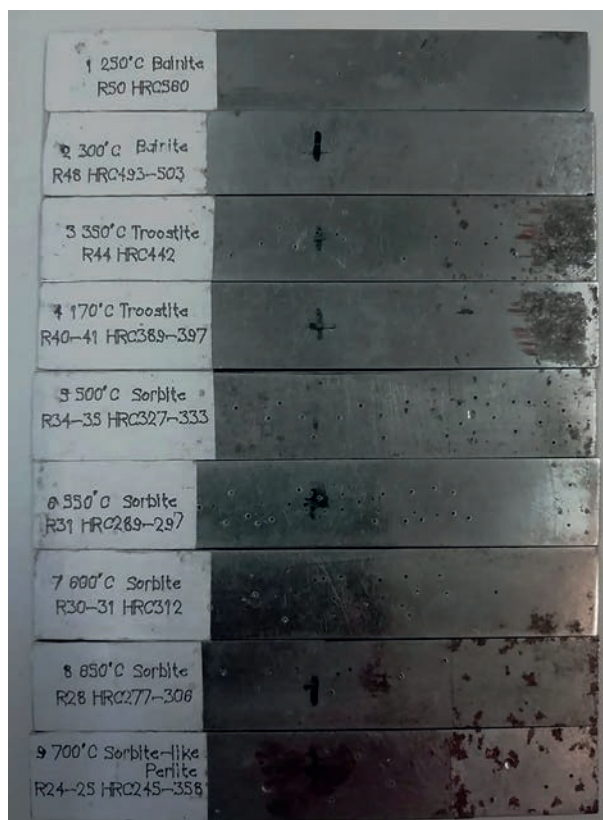


Fig. 1. Samples of 40X steel
Рис. 1. Зразки зі сталі 40X

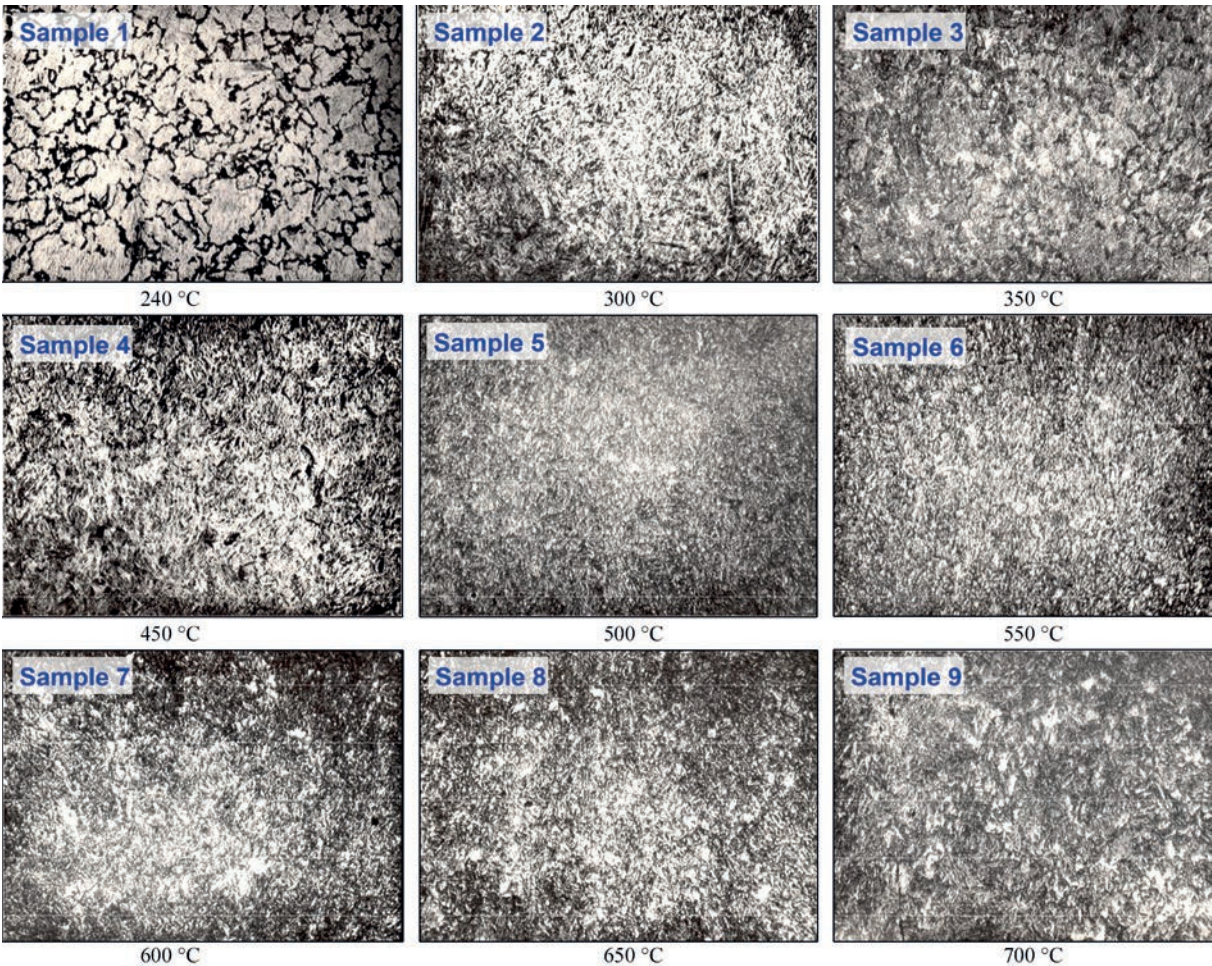


Fig. 2. Pictures of the samples microstructure at different tempering temperatures
Рис. 2. Зображення мікроструктури зразків, відповідне до температури відпуску

tional properties of the products depend on the exact observance of the heat treatment technology.

In our study we used 9 samples (Fig. 1) of steel grade 40X, which were subjected to heat treatment: first, the samples were hardened in one cooler (oil) at 850°C, followed by tempering with different temperatures to change their microstructure (see table). The results of heat treatment were determined by two methods: measuring the hardness of the Rockwell test on the *HRC* scale (see table) [21, 22] and the method of quantitative metallography (table, Fig. 2) [23].

Tendency in hardness and microstructure changes in correlation with tempering temperature is given in the table here below.

Results of identified properties of the iron-carbon alloy at different tempering temperature
Результати виявлених властивостей сплаву залізо-вуглець при різній температурі відпуску

Sample №	Tempering temperature, °C	Rockwell Hardness, HRC	Identified microstructure
1	240	50	Troostomartensite
2	300	48	Troostomartensite
3	350	44	Troostite
4	450	40...41	Troostite
5	500	34...35	Sorbite
6	550	31	Sorbite
7	600	30...31	Sorbite
8	650	28...29	Sorbite
9	700	24...25	Sorbitlike pearlite

The «Structurescope EG» system of non-destructive testing (NDT), developed and constructed by us, was used, in order to establish a relation between APAC of the eddy current NDT polyharmonic response signal and the type of heat treatment, arrangement of microstructure, and hardness [24]. By the nature of its control algorithm, it belongs to open-circuit systems, by the nature of its signal changes – to program control systems [25, 26]. The block diagram of the system is presented in Fig. 3. The proposed design includes a control unit (1), which controls the unit for digital synthesis and signal processing of eddy current NDT (2) and a robotic scanner (3), which positions ECC (4) relative to CO (5) along three axes with the accuracy of 100 µm. The ob-

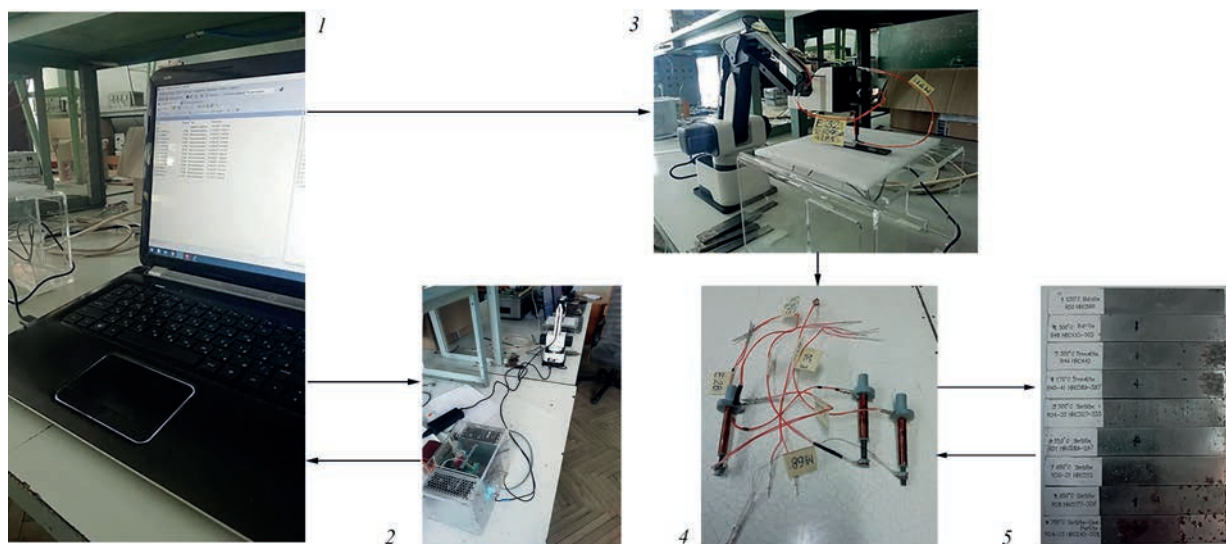


Fig. 3. System for automated analysis of measurements in alloy samples by the eddy current method: 1 – control unit (computer), 2 – unit for synthesis and processing of signals, 3 – robotic scanner, 4 – eddy current converters, 5 – samples under control

Рис. 3. Система для автоматизованого аналізу показників зразків сплавів вихрострумовим методом: 1 – блок управління (комп'ютер), 2 – блок синтезу та обробки сигналів, 3 – роботизований сканер, 4 – вихроструміві перетворювачі, 5 – об'єкти контролю

ject of control of the system is the process of synthesis of the excitation signal, the purpose of control is to change the ECC operation mode, that is a stepwise increase/decrease of the ECC electromagnetic field to a given value, to perform a set number of measurements, and also to change ECC coordinates in case of using a robotic scanner (3). The operator sets the initial operating conditions of the system such as frequency, initial amplitude and phase, the value of the amplitude change step, the number of steps to change the amplitude of the ECC excitation signal, and the number of measurements of the amplitude and phase of the polyharmonic ECC response signal. For the robotic scanner, the scanning coordinates and the trajectory for scanner to move according to these coordinates are set.

In our study, the system was programmed to perform 200 measurements with a change in the ECC operation

mode, that is a stepwise increase in its electromagnetic field in the range of 255...1390 A/m at the frequency of the excitation signal with the completion of measurement when the control signal reaches 0.43 V. According to the measurement results, we obtained APAC of the response signal, which are functional dependencies $A_k = f(H_E)$, $\alpha_k = f(H_E)$, where A_k is the voltage amplitude of the k^{th} harmonic, α_k is the initial phase of the k^{th} harmonic, H_E is the intensity of the excitation electromagnetic field. Fig. 4 presents APAC for all samples of the 5th harmonic, which is considered the most sensitive to the structure of carbon steels [27], dependence $A_5 = f(H_E)$ is marked with symbols A1-A8, vertical axis of values on the right, and the dependence $\alpha_5 = f(H_E)$ with symbols P1-P8, vertical axis of values on the left, respectively.

The samples on Fig. 4 are marked as St40X-N, where N is the number of the sample. Functional dependencies $A_5 = f(H_E)$ and

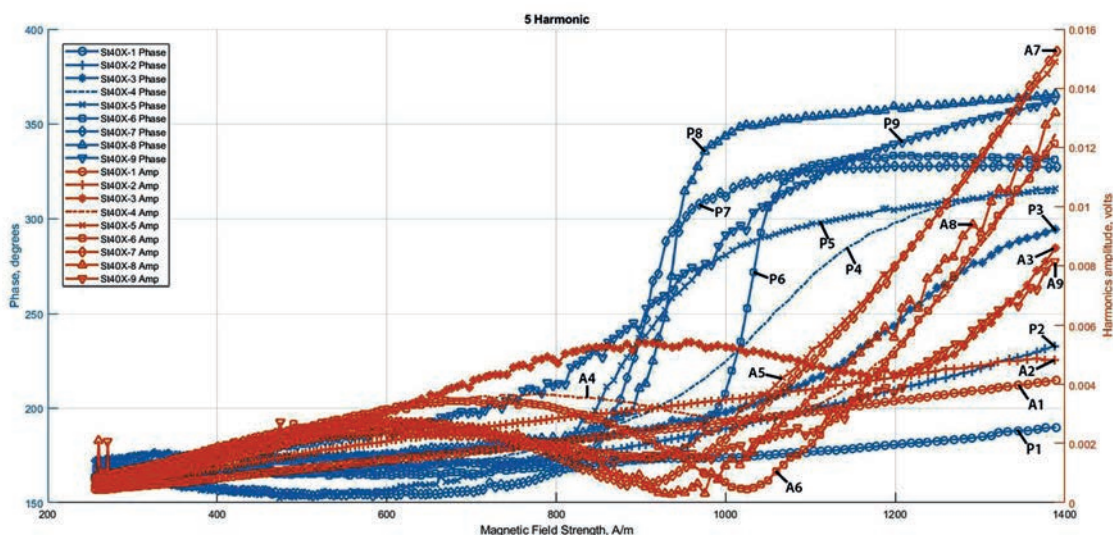


Fig. 4. APAC of the response signal of the 5th harmonic for steel samples №№ 1–9

Рис. 4. АФАХ 5-ї гармоніки сигналу відгуку для зразків зі сталі №№ 1–9

Correlation Tempering, Rockwell Hardness, Arc Length Initial Phase

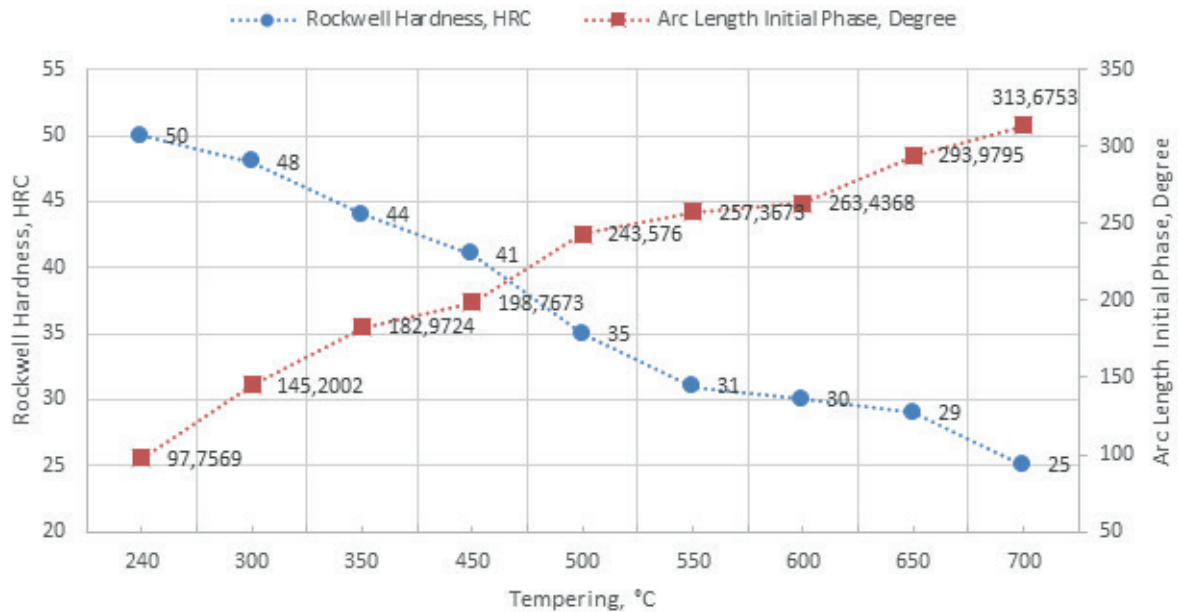


Fig. 5. Diagram of correspondence between the hardness of samples, types of microstructure and the curve length of the initial phase of the 5th harmonic and the tempering temperature of the samples

Рис. 5. Діаграма відповідності твердості зразків, типу мікроструктури і довжини кривої початкової фази 5-ї гармоніки температури відпуску зразків

$\alpha_5 = f(H_E)$ have the domain of determination as

$D_{H_E}(f): [256, 1; 1390, 0] \frac{A}{M}$, and range $A_5 = f(H_E)$ as

$E_{A_5}(f): [0, 095; 12, 765] \text{ MB}$ and dependencies $\alpha_5 = f(H_E)$ $E_{\alpha_5}(f): [152, 41; 365, 61] \text{ Degree}$.

As it can be seen from Fig. 4, the dependencies $A_5 = f(H_E)$ and $\alpha_5 = f(H_E)$ are non-linear, and they follow different paths. Taken the fact that the initial voltage phase of the harmonic, induced in the measuring coil of the ECC is sensitive to the microstructure of carbon alloys due to their magnetic properties [28], we have analyzed the dependence $\alpha_5 = f(H_E)$. For this purpose, the length of dependence curve $\alpha_5 = f(H_E)$ was calculated for each sample by summarizing straight line segments of the polygonal curve built up by points defined by vectors of excitation signal voltage values u_E and initial phase of the 5th harmonic response signal voltage α_5 according to the formula

$$L_{\alpha_5} = \sum_{i=2}^n \sqrt{(u_E(i) - u_E(i-1))^2 + (\alpha_5(i) - \alpha_5(i-1))^2},$$

where i is the index of the vector element ($i = 2, 3, 4, \dots, n$), n is the number of elements of the vector values.

Based on the results of calculations, a diagram of the relation between the hardness of samples and the length of the 5th harmonic initial phase curve and the tempering temperature of samples was built (Fig. 5), which also indicates types of microstructure and numbers of samples according to the table. On

this diagram the horizontal axis is graduated in values of the tempering temperature of samples, the left vertical axis is graduated in the values of their hardness (points in the form of circles on the diagram), the right vertical axis is graduated in the values of the calculated length of the curve of the initial phase (points in the form of squares on the diagram). The diagram shows that the nature of the change in hardness values of the samples coincides with the nature of the change in the values of the initial phase curve length, given that as the tempering temperature increases, the hardness decreases and the length of the initial phase curve increases. This indicates the presence of signs of correspondence between dependence $\alpha_5 = f(H_E)$, which is part of the APAC of the ECC polyharmonic response signal, and the type of heat treatment, microstructure and hardness of the 40X steel sample.

Conclusions

Presented are the results of studying the heat treatment of nine samples from 40X steel by such traditional methods as measuring hardness and qualitative stereometric metallography, as well as by the proposed by us multifrequency eddy current NDT method which was implemented in the developed by us automated open-circuit system of program control over the APAC measurements of polyharmonic response signals. It is established that programming the parameters in the series of measurements according to certain algorithms results in the appearance of the correspondence between the tempering temperature values of heat treatment of the sample defined by the micro-

structure of the sample, its hardness and phase characteristics of the response signal of the 5th harmonic. This correspondence appears due to manifestation of the connection between the phase characteristics of the 5th harmonic response signal and the magnetic properties of the CO material as a result of the change in ECC operation mode, which is achieved by program control according to certain algorithms.

This indicates that the system developed by us can be used as an alternative to the traditional methods of testing and research in metallurgy, mechanical engineering, and operation of infrastructure at testing products from steel alloys with pronounced magnetic properties. The application of algorithms for automatic control of the mode of eddy current ECC allows optimization of measurement operations and searching for a more robust correlation of APAC polyharmonic response signals with physical, chemical, and mechanical properties of magnetic materials, which will be presented in our next publications.

The system developed by us is realized on digital components of synthesis and processing of signals that allows programming algorithms of ECC operation mode of any complexity which makes it easy to adapt to the conditions of solving various problems of quality control of products. The obtained values of amplitudes and initial phases of higher harmonics of the response signal under the condition of correlation with different material properties are «digital duplicates» of these properties and can be used as data in automated decision making systems, including self-regulating Industry 4.0 systems.

References

- Jialong Shen, Lei Zhou, Will Jacobs, Peter Hunt, Claire Davis (2019) Real-time in-line steel microstructure control through magnetic properties using an EM sensor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **490**, 165504. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165504>
- Javier Garcia-Martin, Ruth González-Fernández, Beatriz Calleja-Saenz, Diego Ferreño-Blanco (2020) Measurement of hardness increase for shot-peened austenitic TX304HB stainless steel tubes with electromagnetic Non-Destructive testing. *Measurement*, **149**. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106925>
- Tomohisa Kanazawa, Masao Hayakawa, Danilo Beltran, Mitsuhiro Yoshimoto, Koya Saito, Youichi Maruyama, Munchisa Uchiyama, Toshihiko Sasaki (2021) Nondestructive Testing of Friction-Fatigued Carburized Martensitic Steel. *Materials Transactions*, **62**(1), 135–138. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2020296>
- Fricke, L.V., Barton, S., Maier, H.J. et al. (2021) Control of Heat Treatment of Case-Hardening Steel 18CrNiMo7–6 by Determining the Penetration Depth of Eddy Currents. *Met Sci Heat Treat*, **62**, 716–722. <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00627-3>
- Yongfeng Song, Xuhui Zi, Yingdong Fu, Xiongbing Li, Chao Chen, Kechao Zhou (2018) Nondestructive testing of additively manufactured material based on ultrasonic scattering measurement. *Measurement*, **118**, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.020>
- Che-Hua Yang, N. Jeyaprasak, Yu-Wei Hsu (2021) Applicability of non-destructive laser ultrasound and non-linear ultrasonic technique for evaluation of thermally aged CF8 duplex stainless steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **193**, 104451. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104451>
- Boogaard J., G.M. van Dijk (1989) *Non-Destructive Testing*, North Holland.
- Prakash R. (2009) *Nondestructive Testing Techniques*, New Age Science.
- Belén Riveiro, Mercedes Solla (2016) *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure*, CRC Press.
- Stephen W.B. (2014) *Non-Destructive Testing – Theory, Practice and Industrial Applications by Wong B Stephen*, Lambert Academic Publishing.
- Dwivedi, S., Vishwakarma, M., Soni, P., Dwivedi, S., Vishwakarma, M. (2018) Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *Materials Today: Proceedings*, **5**, 3690–3698. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620>
- Aquil Ahmad, Leonard J. Bond (2018) *ASM Handbook, Volume 17: Nondestructive Evaluation of Materials*, ASM International.
- Mohammadi J. (2004) *NDT Methods Applied to Fatigue Reliability Assessment of Structures*, American Society of Civil Engineers.
- Kaiyu Li, Lei Li, Ping Wang, Jiaqi Liu, Yu Shi, Yang Zhen, Shiyun Dong (2020) A fast and non-destructive method to evaluate yield strength of cold-rolled steel via incremental permeability. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **498**, 166087. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166087>
- Itsaso Artetxe, Fernando Arizti, Ane Martínez-de-Guerenu (2021) Analysis of the voltage drop across the excitation coil for magnetic characterization of skin passed steel samples. *Measurement*, **17**, 109000. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109000>
- Uchanin, V., Ostash, O. (2019) Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment, *Procedia Structural Integrity*, **16**, 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.040>
- Zhang, S., Ducharme, B., Uchimoto, T., Kita, A., Tene Deffo, Y.A. (2020) Simulation tool for the Eddy current magnetic signature (EC-MS) non-destructive method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **513**, 167221. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167221>
- Dobmann, G., König, C., Hofmann, U., Schneibel, G. (2017) «Development and qualification of the Eddy-Current testing techniques «EC» and «EC+» in combination with Leeb-Hardness-Measurements for detection and verification of hardness spots on heavy steel plates, *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, **3**, 24–31. <https://doi.org/10.26357/Bnid.2017.006>
- Herring D. (2016) *Vacuum Heat Treatment Volume II: Applications – Equipment – Operation*, BNP Media.
- Dossett J.L. (2020) *Practical Heat Treating: Basic Principles*, ASM International.
- (2016) ISO 6508-1:2016 *Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 1: Test method* [Online], Available: <https://www.iso.org/standard/70460.html>.
- (2020) ASTM E18-20 *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials* [Online], Available: <https://www.astm.org/e0018-20.html>.
- (2020) ISO 4499-2:2020 *Hardmetals – Metallographic determination of microstructure – Part 2: Measurement of WC grain size*, Available: <https://www.iso.org/ru/standard/74884.html>.
- Kalenychenko, Y., Bazhenov, V., Kalenychenko, A., Kovalev, V., Ratsebarskiy, S. (2019) Determination of Mechanical Properties of Paramagnetic Materials by Multi-frequency Method. *International Journal «NDT Days»*, **II**(4).
- Kondratenko, Y.P., Kuntsevich, V.M., Chikrii, A.A., Gubarev, V.F. (2021) *Advanced Control Systems – Theory and Applications*, River Publishers, i-xxxi.
- Voronov, A.A. (1985) *Basic principles of automatic control theory: Special linear and nonlinear systems*, Mir Publishers.
- Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic testing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian]
- Kalenychenko O.G., Kalenychenko Yu.O., Rembach O.O. (2018) *System for determining the structure of the electromagnetic field and the object material and method for determining the structure of the electromagnetic field and the object material*. Patent UA 117542 C2; IPC (2018.01), G01N 27/90 (2006.01), G01N 27/72 (2006.01), G01R 33/00, 10.08.2018.

Надійшла до редакції 20.12.2021

ЗАСТОСУВАННЯ ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ ВИХРОСТРУМОВІЙ ДЕФЕКТОКОПІЇ

М.О. Редька¹, Ю.В. Куц¹, Є.В. Шаповалов², В.М. Учанін³, Ю.Ю. Лисенко¹, О.Д. Близнюк⁴

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: y.kuts@ukr.net

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича 11. E-mail: gera2000@ukr.net

³Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: vuchanin@gmail.com

⁴Науково-дослідна лабораторія технічної діагностики та неруйнівного контролю авіаційної техніки НАУ. 03058, м. Київ, просп. Гузара Любомира, 1. E-mail: nau_409@ukr.net

У статті проведено модельні та експериментальні дослідження фазових методів виявлення сигналів вихрострумової дефектоскопії, які спостерігаються на фоні шумів. Розглянуто та проведено тестування двох методів виявлення сигналів. Перший ґрунтується на визначенні кількості нулів аналізованого сигналу в ковзному режимі і має низьку обчислювальну ресурсомісткість та просту схематичну реалізацію. Другий метод базується на аналізі результуючої довжини вектора (г-статистики), отриманої з фазової характеристики аналізованого сигналу за її мультिवіконного ковзного опрацювання, який відрізняється високою достовірністю виявлення сигналу. Проведено перевірку ефективності цих методів в системі автоматизованої вихрострумової дефектоскопії. Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: вихрострумове дефектоскопія, автоматизований вихрострумований контроль, виявлення сигналів, фазовий метод

Вступ. В основу вихрострумової дефектоскопії (ВСД) покладено взаємодію змінного електромагнітного поля з електропровідним об'єктом контролю (ОК) [1, 2]. Особливістю ВСД є відсутність механічного контакту між ОК та вихрострумним перетворювачем (ВСП), що дає змогу реалізовувати ВСД в автоматичному режимі за умови руху ВСП відносно поверхні ОК зі значною швидкістю. Прагнення щодо скорочення часу контролю, виявлення в автоматичному режимі дефектів малих розмірів на значній глибині під поверхнею ОК, тобто за малих рівнів сигналів, потребує подальшого удосконалення методів виявлення та аналізу сигналів ВСД.

У більшості сучасних вихрострумових дефектоскопів (ВД) універсального типу вихідний сигнал ВСП, за його збудження синусоїдним струмом, модулюється на робочій (несучій) частоті під час сканування зони дефекту додатковим сигналом, амплітуда і фаза якого визначаються параметрами дефекту – його розмірами, глибиною залягання тощо. У процесі наступної процедури демодуляції виділяють сигнал від дефекту, який, зазвичай, спостерігають і аналізують у комплексній площині на екрані дефектоскопа. Спектр пов'язаного з дефектом сигналу суттєво залежить від швидкості сканування ОК і, в меншій мірі, – від параметрів дефекту та напрямку сканування.

Перед скануванням поверхні ОК зазвичай реалізують процедуру компенсації небалансу ВСП шляхом встановлення його на бездефектну частину зразка, електрофізичні параметри якого відповідають параметрам ОК, або використовують бездефектну частину ОК. Незбалансовану частину вихідного сигналу ВСП можна також заглушити використанням фільтра високих частот, що також реалізовано у більшості стандартних ВД. Параметри такого фільтра вибирають таким чином, щоб постійна або повільно змінювана складова сигналу була повністю заглушена, а сигнал від дефекту після процедури демодуляції формувався без спотворень. Електронні шуми частково заглушують за допомогою фільтра низьких частот. Частота зрізу фільтрів суттєво залежить від швидкості сканування поверхні ОК [3]. Суттєвим недоліком стандартної процедури обробки сигналів ВСП є низька швидкість її реалізації, що обмежує можливість використання універсальних ВД у системах автоматизованої ВСД великогабаритних ОК високої продуктивності.

У цілому можна констатувати, що отримання та дослідження сигналів від дефектів відбувається за дії значних завад і шумів. У роботі [3] зазначено, що неінформативні складові сигналу у ВСД обумовлені такими факторами: 1 – особливостями ОК; 2 – режимом контролю; 3 – шумами, що су-

Куц Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>, Учанін В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>,

Лисенко Ю.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-9110-6684>

© М.О. Редька, Ю.В. Куц, Є.В. Шаповалов, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Д. Близнюк, 2022

проводжують роботу електронних схем та виникають під впливом зовнішніх електромагнітних полів. Дія завад перших двох груп компенсується за рахунок удосконалення конструкцій ВСП, способів перетворення параметрів ОК у параметри сигналів ВСП та методик контролю. Вплив факторів третьої групи призводить до зменшення відношення сигнал/шум (с/ш), яке варіюється у значному діапазоні в залежності від розмірів дефектів, їх заглиблення у підповерхневий шар матеріалу ОК та орієнтації відносно ВСП.

Електричні шуми не можуть бути заглушені диференціальним включенням котушок ВСП чи іншими способами, ефективними для зменшення впливу дії завад перших двох груп. Тому виявлення сигналів ВСП від дефектів за низького відношення с/ш потребує застосування спеціальних методів обробки сигналів, які розроблялись раніше для використання в радіотехнічних системах різного призначення [4, 5].

Виявлення сигналів ВСП на фоні шуму може проводитись з використанням одного або декількох відомих методів: оптимальної фільтрації сигналів [6], узгодженої фільтрації сигналів [7], застосування сигналів з різними видами модуляції і маніпуляції [8, 9], кореляційного прийому сигналів [6, 7], методу вейвлет-аналізу [10] тощо. Більшість цих методів характеризується значною обчислювальною ресурсомісткістю та необхідністю знання копії корисного сигналу. Відмінність реальних сигналів ВСП від їх теоретичних моделей суттєво зменшує ефективність цих методів щодо виявлення сигналів ВСП за низького відношення с/ш.

Перелічені вище методи виявлення сигналів базуються на аналізі амплітудних характеристик досліджуваних сигналів. Існує інша можливість виявлення сигналів від дефектів, яка ґрунтується на використанні особливостей фазової характеристики сигналу (ФХС). У цілому фаза сигналу i , відповідно, фазовий та фазово-амплітудний методи широко використовуються у вихрострумовому контролі, зокрема для вимірювання електропровідності металів та сплавів [1, 2], реалізації селективної ВСП [11] та ін. Але інформаційний ресурс фази сигналу може бути використаний і для розв'язання завдань виявлення сигналів ВСП на фоні шуму.

У загальному випадку сигнали ВСП розглядаються як адитивна суміш одиночних радіоімпульсів – обмежених в часі синусоїдних сигналів з модульованою амплітудою та фазою, та шуму. Такі сигнали на фінітних інтервалах часу спостереження мають кінцеве число екстремумів та число нулів (перетинів нульового рівня) з відповідними статистичними характеристиками [12]. У роботі

[13] розглянуто метод виявлення сигналів від дефектів для ВСП, в основу якого покладено вплив відношення с/ш на статистичні характеристики числа нулів сигналу (далі «метод нулів»). У роботі [14] запропоновано фазовий метод виявлення сигналів, що передбачає аналіз кругової статистики – результуючої довжини вектора (або скорочено r -статистики, далі «метод r -статистики»). В основу методу покладено залежність r -статистики від дисперсії значень ФХС на кінцевих інтервалах часу. Метод запропонований для ультразвукової товщинометрії, але може бути використаний і в аналізі сигналів автоматизованої ВСП, яка в свою чергу залежить від відношення с/ш.

Метою дослідження є перевірка ефективності та порівняльний аналіз фазових методів виявлення сигналів ВСП, які виключають процедуру демодуляції вихідного сигналу ВСП та придатні для використання у високопродуктивних автоматизованих системах ВСП.

Постановка задачі. У системі ВСП використовується трансформаторний ВСП диференціального типу. Узагальнена схема його підключення до генератора гармонічних коливань (Γ) частотою f та блоку опрацювання сигналів (БОС) разом з блоком прийняття рішення (БПР) наведено на рис. 1.

Під час дослідження ВСП рухається по поверхні ОК Q зі швидкістю v . Просторове положення ВСП визначається в декартовій системі координат автоматизованого засобу ВСП вектором координат точок поверхні виробу $r = (x, y, z) \in Q$. ВСП формує сигнал $u_d(t, p, r)$ як функцію аргументів: часу t , вектору координат r контрольованої точки поверхні та вектору p параметрів дефекту (до прикладу глибина та розкриття тріщини, її довжина тощо) та параметрів системи «ВСП – ОК» (відстань між ВСП та ОК, орієнтація ВСП відносно дефекту, режим сканування тощо). За межами ділянки поверхні ОК з дефектом сигнал $u_d(t, p, r)$ дорівнює нулю, а в межах цієї ділянки – відмінний від нуля і уявляє собою модульований за амплітудою та фазою радіоімпульсний сигнал з частотою сигналу-носія f . Цей сигнал спостерігається на фоні адитивного шуму $u_{\text{ш}}(t)$, що утворюється внаслідок дії багатьох факторів – шумів електронних компонентів системи, електромагнітних наведень і т. і. За цих умов несуперечливою є гіпотеза про те, що $u_{\text{ш}}(t)$ є реалізацією гаусового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 . Рішення щодо наявності/відсутності дефекту формується в БПР. Необхідно провести модельні та експериментальні дослідження ефективності виявлення сигналів від дефектів за методом нулів та методом r -статистики в системі автоматизованої ВСП.

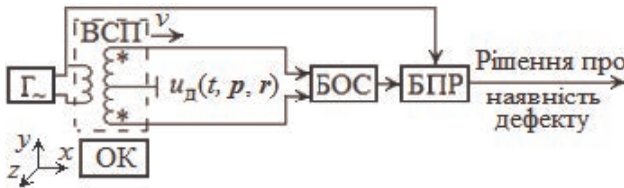


Рис. 1. Формування сигналу у вимірювальному каналі автоматизованої системи ВСД з трансформаторним ВСП диференціального типу

Розгляд поставленої задачі почнемо з аналізу моделі сигналу ВСД та змісту і особливостей реалізації методу нулів та методу r -статистики.

Модель сигналів ВСД. За умови повної компенсації вимірювальних обмоток диференціального ВСП модель сигналу ВСД під час сканування поверхні ОК має наступний загальний вид:

$$u(t, p, r) = u_d(t, p, r) + u_{\text{ш}}(t) = U_d(t, p, r) \cos(2\pi f t - \varphi_d(t, p, r)) I(t, r) + u_{\text{ш}}(t), t \in T_a, r \in Q, \quad (1)$$

де $U_d(t, p, r)$, $\varphi_d(t, p, r)$ – відповідно обвідна (амплітудно-часова характеристика сигналу, АХС) і початкова фаза; $\Phi_d(t, p, r) = 2\pi f t - \varphi_d(t, p, r)$ – фазо-часова або фазова характеристика сигналу (ФХС) трансформаторного диференціального ВСП; $u_{\text{ш}}(t)$ – шумова компонента сигналу; $T_a \gg f^{-1}$ – час аналізу; $I(t, r)$ – індикаторна функція:

$$I(t, r) = \begin{cases} 1, & t \in T_a, r \in Q_d, \\ 0, & t \notin T_a \text{ або } r \notin Q_d, \end{cases} \quad (2)$$

де Q_d – область поверхні ОК з дефектом, $Q_d \subset Q$.

Інформаційна складова $u_d(t, p, r)$ сигналу (1), за якою власне визначається факт наявності дефекту, належить до класу синусоїдних сигналів з локально зосередженими збуреннями інформативних параметрів – амплітуди та фази.

У випадку неповної компенсації диференціального ВСП в праву частину моделі (1) додається ще одна складова, когерентна сигналу збудження, але з амплітудою, набагато меншою за амплітудне значення $U_d(t, p, r)$.

У цілому у випадку $r \in Q_d$ сигнал (1) є нестационарним. Проте за відносно невеликої швидкості сканування v допустимим є наступне спрощення. Процес вимірювання параметрів сигналів ВСП у цифрових системах відбувається дискретно в часі на скінченній множині точок простору $g \in [1, G]$. На схемі рис. 1 дискретизація сигналу відбувається в БАС з періодом $T_d \ll f^{-1}$. Кожне окреме вимірювання виконується на інтервалі часу T_g , $f^{-1} < T_g \ll T_d$. Після перетворення в цифрову форму дискретний аналог сигналу (1) для фіксованого значення g представляється моделлю:

$$u[j, p_g, r_g] = u_a[j, p_g, r_g] + u_o[j], \quad g \in [1, G], \\ j \in [1, J], \quad J = [T_a / T_d]^+, \quad (3)$$

де $[\cdot]^+$ – позначення цілої частини числа.

На кожному інтервалі часу T_g значення компонент вектора p можна вважати незмінними, а сигнал (1) – локально стаціонарним, параметри якого (амплітуда і початкова фаза) лишаються незмінними впродовж T_g . Таке припущення суттєво спрощує аналіз сигналу ВСП.

Модель (3) є базовою для аналізу та опрацювання сигналів в автоматизованих системах ВСД. Для моделі (3) існує дискретне перетворення Гільберта з оператором H_d , що дає змогу отримати Гільберт-образ сигналу (3) – $\tilde{u}[j, p_g, r_g] = H_d(u[j, p_g, r_g])$, та його амплітудну та фазову характеристики. АХС визначається за формулою:

$$U[j] = \sqrt{u^2[j] + \tilde{u}^2[j]}. \quad (4)$$

У (4) і далі для спрощення запису аналітичних виразів аргументи p_g, r_g не наведені.

Значення ФХС (розгорнутої функції) визначається в такій послідовності: спочатку обчислюється частина ФХС за модулем 2π , тобто

$$\phi[j] = (\Phi[j]) \bmod 2\pi = \arctg \frac{\tilde{u}[j]}{u[j]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign } \tilde{u}[j](1 + \text{sign } u[j])\}, \quad (5)$$

де sign – знакова функція, а потім виконується розгортання ФХС в часі за виразом:

$$\Phi[j] = \phi[j] + 2\pi g(\phi[j]), \quad (6)$$

де $g(\phi[j])$ – ступінчаста функція, значення якої збільшується на одиницю щоразу, коли $\phi[j]$ змінюється від значення в околі 2π до значення в околі нуля.

Загальна характеристика методу виявлення сигналів від дефектів на основі підрахунку числа нулів сигналу (метод нулів). У статті [13] розглянуто метод виявлення сигналів ВСД, що ґрунтується на підрахунку кількості нулів процесу за певний час спостереження T_c у ковзному режимі. Було зазначено, що середня кількість нулів Z шумового процесу має певні статистичні характеристики, які змінюються у випадку аналізу адитивної суміші радіосигналу з гармонічним сигналом-носієм та шумом. Ця властивість покладена в основу методу виявлення сигналів ВСД на фоні шуму. Графічну інтерпретацію методу дає рис. 2, на якому позначено: a – реалізація аналізованого сигналу, b – ковзне вікно відбору даних апертурою M , v – графік отриманої функції $Z^*[j] = Z[j, M] / M$ – нормованої за апертурою M кількості нулів $Z[j, M]$.

Важливо зазначити, що моменти появи нулів процесу відповідають моментам зміни фази (6) на величину π , тому поточне значення середньої

кількості нулів аналітично можна представити в такий спосіб:

$$Z[j] = \left[\frac{\Phi[j+k] - \Phi[j]}{\pi} \right]^+, \quad j = \overline{1, J-M}, \quad (7)$$

$$M = \left[\frac{T_c}{T_d} \right]^+.$$

Рішення про наявність дефекту приймається у випадку зменшення значення $Z[j]$ нижче певного порогу Π , тобто якщо $Z[j] < \Pi$. Питання вибору рівня Π ґрунтується на додатковому аналізі помилок контролю першого і другого роду.

Враховуючи вище наведене, спосіб нулів можна віднести до класу фазових методів виявлення сигналів на фоні шуму. У випадку підрахунку нулів тільки за додатної похідної (тобто підрахунку числа цілих фазових циклів сигналу) у формулі (7) в знаменнику додається коефіцієнт 2.

Звичайно, цей метод не може конкурувати з більшістю відомих методів виявлення сигналів на фоні шумів, але він може виявитись конкурентоспроможним у багатоканальних системах (декілька десятків/сотень ВСП) систем ВСД, оскільки процедура визначення $Z^*[j]$ просто реалізується засобами цифрової техніки і потребує використання лише компараторів сигналів та лічильників імпульсів, тобто можлива за мінімальних апаратурних витрат.

Загальна характеристика методу г-статистики. Теоретичні питання змісту та отримання статистики «результуючої довжини вектора» в експериментах з випадковими кутами на площині наведені у роботах [15, 16], а прикладні аспекти отримання r -статистики за фазовою характеристикою сигналів ВСК – в [17].

Цей метод ґрунтується на аналізі r -статистики, отриманої з різниці фазових характеристик сигналів ВСП та сигналу-носія: $\phi[j] = (\Phi[j] - 2\pi f T_d) \bmod 2\pi$. Ця статистика обрана з огляду на те, що вона, по-перше, є інваріантною до початкової фази сигналу, по-друге, областю її значень є інтервал $(0, 1]$, що зручно для її аналізу.

Метод реалізується наступним чином. За результатами оброблення сигналів (3) отримують вибірку $\Psi = \{\phi[j], j = \overline{1, J}, \phi[j] \in [0, 2\pi)\}$ різ-

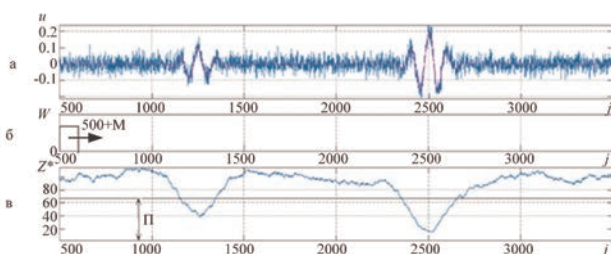


Рис. 2. Графічне представлення процесу виявлення сигналів ВСД на фоні шуму за методом нулів

ниць фазових характеристик сигналів. Поточні значення r -статистики обчислюються в ковзному режимі, під час руху прямокутного вікна з апертурою M відносно вибірки Ψ . На кожному кроці аналізу визначається поточне значення r -статистики згідно виразу:

$$r[j, M] = \frac{1}{M} \sqrt{\left(\sum_{k=j-M/2}^{j+M/2} \cos \phi[k] \right)^2 + \left(\sum_{k=j-M/2}^{j+M/2} \sin \phi[k] \right)^2}, \quad (8)$$

$$j \in \left[\frac{M}{2}, J - \frac{M}{2} + 1 \right],$$

У формулі (8) вважається, що M – парне число.

Вид функції $r[j, M]$ для зображеного на рис. 2, а сигналу ВСД наведено на рис. 3.

Рішення про наявність дефекту приймається за виконання умови $r[j] > \Pi$. Удосконалення цього методу з метою підвищення достовірності виявлення сигналів ВСД виконано за рахунок мультивіконного опрацювання фазових характеристик сигналів ВСД з подальшим формуванням статистики виду:

$$R[j] = \prod_{s=1}^S r[j, M_s], \quad (9)$$

де $r[j, M_s]$ – r -статистика, отримана з використанням віконної функції апертурою M_s , S – кількість вікон.

Обчислювальна складність цього методу обумовлена необхідністю реалізації алгоритмів дискретного перетворення Гільберта (ДПГ), обчислення ФХС та тригонометричних функцій. Крім того, у випадку неповної компенсації неінформативних складових сигналу ВСП можливе отримання некоректних результатів.

З метою перевірки можливості застосування запропонованих методів виявлення сигналів ВСД було виконано як модельні експерименти, так і їх дослідження на реальних сигналах ВСП, отриманих в роботизованій системі ВСД [18].

Моделювання та порівняльний аналіз методів виявлення сигналів ВСД. Для перевірки можливостей виявлення сигналів ВСД на фоні шуму розглянутими вище методами та порівняння їх ефективності було запропоновано коефіцієнти ефективності $K_{\text{еф}}$. Для методу r -статистики $K_{\text{еф}} = r_A / \bar{r}_{\text{ш}}$, де r_A – амплітудне значення r -статистики на ділянках з корисною складовою сигналу, $\bar{r}_{\text{ш}}$ – середнє значення r -статистики шуму. Для методу нулів процесу – $K_{\text{еф}} = Z^*_{\text{ш}} / Z^*_c$, де Z^*_c – максимальне нормоване значення вектору нулів процесу на ділянках з корисною складовою сигналу, $Z^*_{\text{ш}}$ – середнє нормоване значення векто-

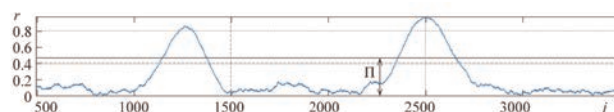


Рис. 3. Графік функції $r[j, M]$ визначеної для сигналу на рис. 2, а

ру нулів процесу на ділянках з шумом. Для базового амплітудного методу виявлення сигналів – $K_{\text{еф}} = U_C / U_{\text{ш}}$, де U_C – амплітудне значення напруги сигналу ВСП на дефектних ділянках ОК, $U_{\text{ш}}$ – середній рівень напруги шуму на виході ВСП на бездефектних ділянках ОК.

Суттєву перешкоду для безпомилкового виявлення дефектів ОК становить наявність в аналізованому сигналі некомпенсованої складової від сигналу збудження, тому значну увагу приділено питанню заглушення цієї складової.

Модельний експеримент складався з наступних етапів:

1. Розрахунок реалізації сигналу ВСП з неповною компенсацією ВСП та наявністю шумової компоненти.

2. Виконання ДПГ суміші сигналу з шумом.

3. Розрахунок ФХС моделі та сигналу-носія та визначення їх різниці.

4. Створення сигналу компенсації з використанням отриманих ФХС та додаткова компенсація неінформативних складових досліджуваного сигналу.

5. Визначення обвідної сигналу для виконання порівняльного аналізу фазових та амплітудного методів виявлення сигналів ВСП на фоні шуму.

6. Ковзне віконне опрацювання різниці ФХС вікнами різної аперттури та отримання векторів r -статистики.

7. Ковзне опрацювання сигналу ВСП та визначення кількості нулів процесу для віконних функцій з різними аперттурами.

8. Реалізація мультівіконного опрацювання векторів r -статистики.

9. Оцінювання ефективності розглянутих методів виявлення сигналів ВСП.

У проведеному експерименті було задано наступні параметри моделі: $f = 10$ кГц; відношення $c/\text{ш} = 2$; $F_d = 128$ кГц; обсяг вибірки $J = 25600$; аперттура віконної функції $M = 256$; обвідна радіоімпульсів – гаусова; кількість радіоімпульсів – 2. Усі експерименти проводились на персональному комп'ютері з наступними характеристиками: тактова частота процесору – 3,9 ГГц, кількість ядер/потоків процесору – 6/12, обсяг оперативної пам'яті – 16 Гб, частота роботи оперативної пам'яті – 3,2 ГГц.

На рис. 4, 5 зображено результати модельного експерименту з виявлення сигналів ВСП відповідно від неповністю та повністю скомпенсованого ВСП, де: *a* – досліджуваний сигнал; *б* – розрахована обвідна досліджуваного сигналу; *в* – вектор r -статистики у випадку $M = 150$; *г* – вектор r -статистики, отриманий з використанням мультівіконного опрацювання; *д* – вектор нулів процесу, отриманий віконною функцією з апертурою 150; *е* – вектор нулів процесу у випадку $M = 150$.

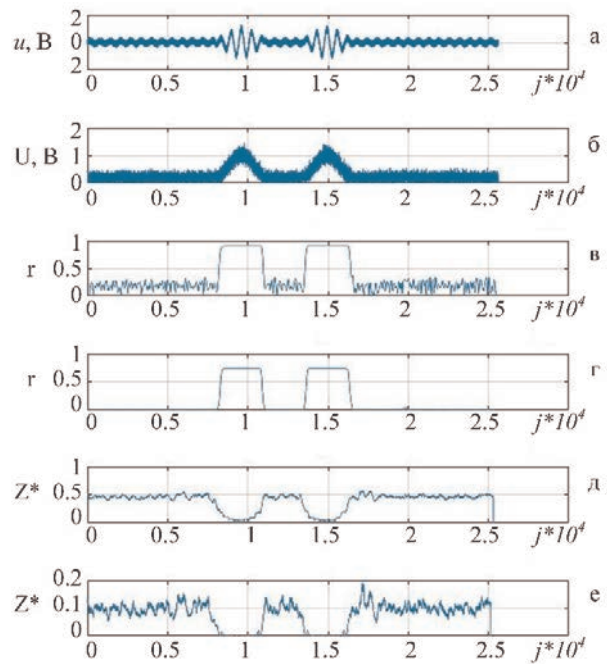


Рис. 4. Результати модельного експерименту з виявлення сигналів ВСП за неповної компенсації ВСП

За виконаною серією модельних експериментів обсягом 200 встановлено, що удосконалення методу r -статистик дало змогу підвищити достовірність виявлення сигналів ВСП за відношення $c/\text{ш} = 1$ на $\sim 15\%$.

Одним із завдань дослідження було оцінювання та порівняння запропонованих методів за ефективністю та ресурсомісткістю, яка оцінювалась за сумарним часом програмної реалізації кожного із запропонованих методів. У табл. 1 наведено зна-

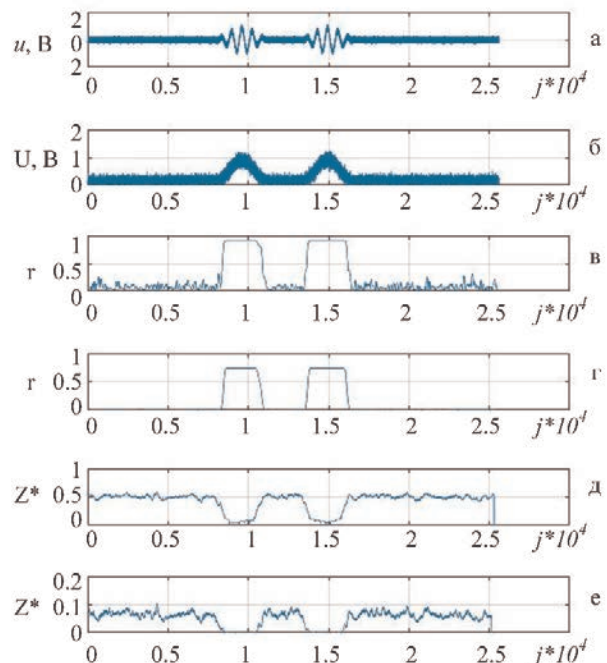


Рис. 5. Результати модельного експерименту з виявлення сигналів ВСП за повної компенсації ВСП

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів ефективності та часових витрат

Назва методу	Апертура вікна	$K_{\text{эф}}$	Час програмної реалізації методу, с
Амплітудний метод без компенсації ВСП	-	2,6	0,002
Амплітудний метод з компенсацією ВСП	-	3	0,017
Метод r -статистики без компенсації ВСП	150	3	0,228
Метод r -статистики з компенсацією ВСП	150	6	0,243
Метод нулів процесу без компенсації ВСП	150	4,5	0,045
Метод нулів процесу з компенсацією ВСП	150	6,2	0,06
Метод r -статистики без компенсації ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	55	1,586
Метод r -статистики з компенсацією ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	70	1,601
Метод нулів процесу без компенсації ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	16	0.2554
Метод нулів процесу з компенсацією ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	60	0.2704

чення коефіцієнтів ефективності та часових витрат на реалізацію кожного з методів.

Отримані дані дають підстави зробити наступні висновки:

- Компенсація ВСП дає змогу збільшити ефективність фазових методів виявлення сигналів, в той час як ефективність базового методу змінюється не значно.
- Компенсація не має значного впливу на загальну ресурсомісткість запропонованих методів.
- Мультивіконне опрацювання сигналів дає змогу значно збільшити ефективність запропонованих методів.
- Мультивіконне опрацювання сигналів значно збільшує загальну ресурсомісткість запропонованих методів.

Збільшення ресурсомісткості методів виявлення сигналів ВСП за використання мультивіконного опрацювання обумовлене багатократною реалізацією методів виявлення сигналів за різних значень апертури віконної функції. Збільшення апертури віконної функції прямо пропорційно збільшує час реалізації методу.

Виявлення сигналів ВСП в автоматизованій системі ВСП. У роботі [18] розглянуто структуру роботизованої системи вихрострумowego контролю, на якій виконувались експериментальні дослідження тестових зразків. Структуру вимірювального каналу системи показано на рис. 6, а, загальний вигляд роботизованої частини системи з лазерно-телевізійним сенсором (ЛТС) під час визначення координат точок поверхні плунжера – на рис. 6, б.

Дана система реалізує режим контролю, який складається з двох етапів:

1. Ідентифікація геометричної моделі (визначення координат точок поверхні) ОК за допомогою ЛТС.
2. Реалізація ВСК тестового зразка в автоматичному режимі, в ході якого з ВСП зчитувались значення напруги та передавались на ПК по кана-

лу інтерфейсу Ethernet; оброблення сигналів ВСП та візуалізація результатів контролю у ПК.

Під час експериментальних досліджень використано ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1502 [3] на робочій частоті 2 кГц. Сканування проводили шляхом зигзагоподібного руху ВСП вздовж дефекту. Дослідницький зразок – пластина сплаву алюмінію марки Д16АТВ завтовшки 20 мм, відстань між ВСП та ОК – 1,5 мм зі штучним дефектом типу підповерхневої тріщини завширшки 1,5 мм та заглибленої на 2,2 мм. Характеристики руху ВСП: швидкість руху – 52 мм/с; число проходів ВСП над дефектом – 6. Графік отриманого сигналу наведено на рис. 7.

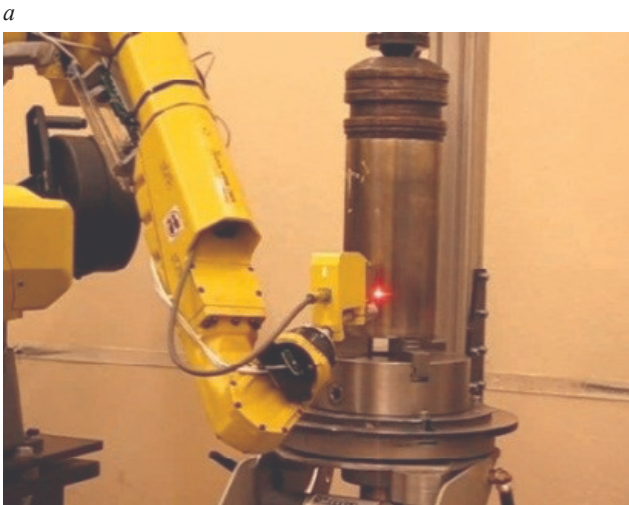
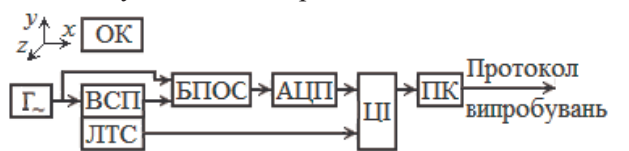


Рис. 6. Роботизована система вихрострумowego контролю: а – структурна схема вимірювального каналу роботизованої системи ВСК, б – загальний вигляд промислового робота з ЛТС під час сканування поверхні ОК, Г – генератор; БПОС – блок попереднього опрацювання сигналів; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; ЦІ – цифровий інтерфейс; ПК – персональний комп’ютер

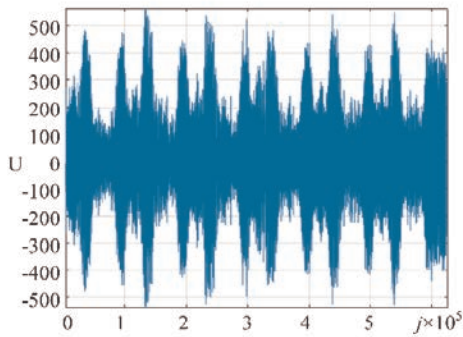


Рис. 7. Вихідний сигнал ВСП на робочій (несучій) частоті за шестикратного проходження зони дефекту

За результатами експерименту отримано вибірку значень сигналу обсягом $J = 624000$. Нижче в якості прикладу наведено результати опрацювання частини реалізації в межах точок $j_1 = 3,7 \times 10^5$ та $j_2 = 4,7 \times 10^5$.

У ході досліджень було обрано наступні параметри опрацювання: амплітуда сигналу компенсації (в умовних одиницях) $U_k = 130$, рівень шумової складової $U_{\text{ш}} = 170$, апертура віконної функції визначення вектору нулів процесу – 150, апертури віконних функцій визначення векторів r -статистик $M = 300, 400, 600$, апертури віконних функцій визначення кількості нулів процесу $M = 150, 300, 450$. Результати експерименту з виявлення сигналів ВСД запропонованими методами зображено на рис. 8, 9, де: a – сигнал ВСП; b – обвідна сигналу ВСП; v – вектор r -статистики, отриманий віконною функцією з $M = 150$; z – вектор r -статистики, отриманий з використанням мультівіконного опрацювання ФХС; d – вектор нулів процесу, отриманий віконною функцією з $M = 150$; e – вектор нулів процесу, отриманий використанням мультівіконного опрацювання ФХС.

На рис. 8, a та 9, a виділено три ділянки: 1, 3 – ділянки, в межах яких знаходяться сигнали від дефекту, 2 – ділянка сигналу зі збільшеною амплітудою некомпенсованості складової сигналу ВСП, яка може бути ідентифікована як дефект. З рис. 8, v , z , та рис. 9, v , z видно, що за умови недостатньої компенсації спостерігається зниження ефективності методу r -статистики внаслідок збільшеної ймовірності виникнення помилки першого роду – прийняття гіпотези про наявність дефекту за його відсутності. Додаткова часткова компенсація сигналу дає змогу підвищити ефективність методу. Для методу нулів такої часткової компенсації недостатньо для підвищення його ефективності.

Результати порівняльного аналізу розглянутих методів виявлення сигналів ВСП від дефектів за коефіцієнтом ефективності та часом реалізації методів наведено в табл. 2.

Наведені в табл. 2 дані свідчать про наступне:

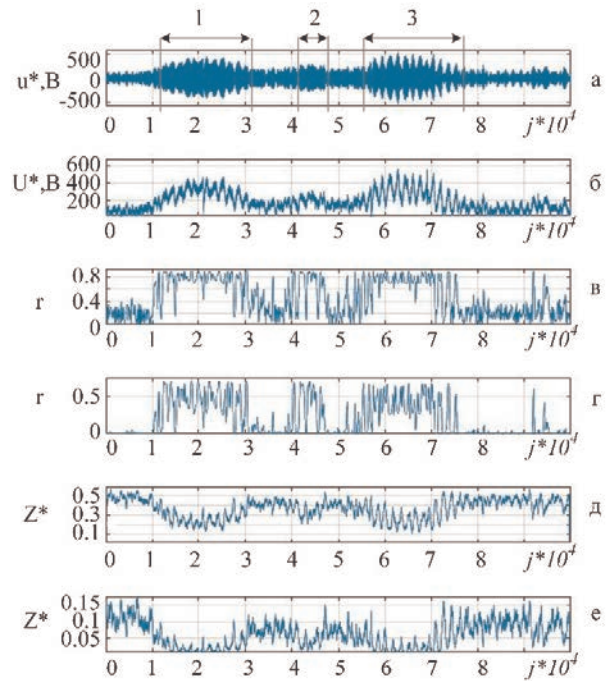


Рис. 8. Результати експерименту з виявлення сигналів ВСД запропонованими методами без компенсації ВСП

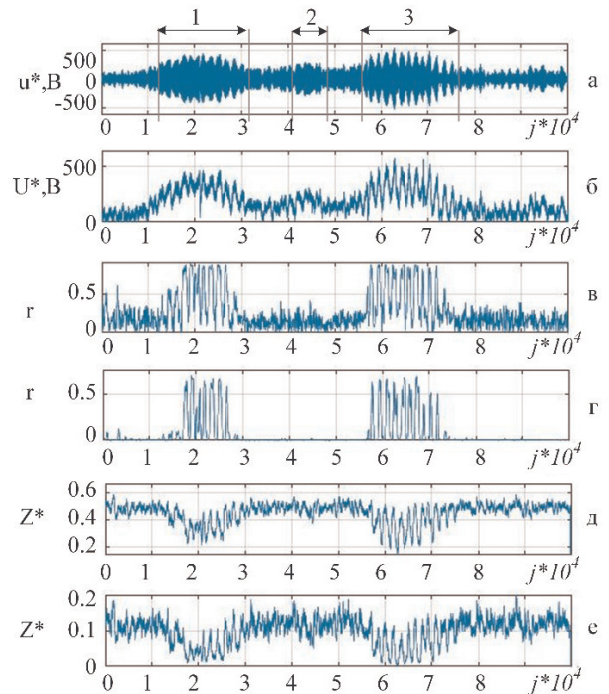


Рис. 9. Результати експерименту з виявлення сигналів ВСД запропонованими методами з компенсацією ВСП

- Метод r -статистик дає змогу забезпечити високу ефективність за умови часткової компенсації ВСП.

- Мультівіконне опрацювання значно збільшує ефективність методу r -статистик.

- Метод r -статистик має значно вищу ресурсомісткість порівняно з методом нулів.

- Метод нулів процесу має невисоку ефективність за умови неповної компенсації ВСП. Для до-

Таблиця 2. Порівняльний аналіз методів виявлення сигналів ВСП

Назва методу	Апертура вікна	$K_{\text{эф}}$	Час програмної реалізації методу, с
Амплітудний метод без компенсації ВСП	-	1,6	0,004
Амплітудний метод з компенсацією ВСП	-	1,67	0,024
Метод r -статистики без компенсації ВСП	300	1,6	2,01
Метод r -статистики з компенсацією ВСП	300	4	2,03
Метод нулів процесу без компенсації ВСП	150	1,6	0,125
Метод нулів процесу з компенсацією ВСП	150	1,67	0,145
Метод r -статистики без компенсації ВСП	Мультивіконне 300/400/600	2,27	4,4
Метод r -статистики з компенсацією ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 300/400/600	19	4,42
Метод нулів процесу без компенсації ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	2,67	0,706
Метод нулів процесу з компенсацією ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	3,25	0,726

сягнення високої ефективності методу необхідно забезпечити значну або повну компенсацію ВСП.

Дослідження виконувалось в рамках тристоронньої угоди між ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» та Фізико-механічним інститутом ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Висновки

Для розробки високопродуктивних автоматизованих систем вихрострумового контролю актуальним є створення ефективних методів виявлення сигналів від дефектів на фоні шуму. Збільшення продуктивності контролю вимагає, зокрема, дослідження нових підходів щодо обробки вихідних сигналів ВСП, які б не передбачали традиційної процедури його демодуляції.

Під час сканування об'єктів з дефектами ВСП диференціального типу виникають сигнали з частотою збудження та локально зосередженими модуляціями їх амплітуди і фази. Аргументами таких сигналів є час, просторові координати ВСП і фізико-механічні характеристики та параметри контрольованих матеріалів та виробів. Запропоновано модель сигналів ВСП, відмінністю якої є використання індикаторної функції з областю визначення в часі та просторі.

Досліджено методи виявлення сигналів ВСП на основі визначення середнього числа нулів сигналу та r -статистики в одновіконному та мультивіконному варіантах реалізації, наведено методики реалізації цих методів. Для порівняння ефективності цих методів запропоновано використовувати коефіцієнт ефективності як відношення значень кількості нулів сигналу, або r -статистики, або амплітуди сигналу на ділянках з сигналом від дефекту та на ділянках з шумовим сигналом.

Модельними експериментами підтверджено, що амплітудний метод виявлення сигналів ВСП має найнижчий коефіцієнт ефективності (2,6), проте потребує найменшого часу програмної ре-

алізації. Збільшення ефективності запропонованих методів порівняно з амплітудним від 2 до 27 разів відбувається за рахунок значного збільшення часу програмної реалізації – від 30 до 800 разів.

Запропоновано удосконалення методу r -статистики за рахунок мультивіконного опрацювання фазових характеристик сигналів ВСП, що дало змогу підвищити достовірність виявлення сигналів ВСП за відношення $c/\pi = 1$ на $\sim 15\%$.

Список літератури

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. (2005) *Не разрушающий контроль и диагностика*: справочник. Москва, Машиностроение.
2. Udpa, S., O'Moore, P. (2004) *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5: Electromagnetic Testing*. 3rd edn. USA, American Society for NDT.
3. Учанин В.М. (2013) *Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, СПОЛОМ.
4. Акимов П.С., Евстратов Ф.Ф., Захаров С.И., Колосков А.А. (1989) *Обнаружение сигналов*. Москва, Радио и связь.
5. Пестряков В.Б. (1968) *Фазовые радиотехнические системы (основы статистической теории)*. Москва, Советское радио.
6. Качанов В. К., Мозговой О.В., Питолин О.И. та ін. (1994) *Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів*. Навч. посібник. Бабак В.П. (ред.). Київ, ІС ДО.
7. Марченко Б.Г., Приймак М.В., Щербак Л.М. (2001) *Теоретичні основи аналізу стохастичних сигналів і шумів*. Навчальний посібник. Тернопіль, ТДТУ імені Івана Пулюя.
8. Качанов В.К., Соколов И.В. (2007) Особенности применения сложномодулированных сигналов в ультразвуковой дефектоскопии. *Дефектоскопия*, **12**, 18–42.
9. Карпаш О.М., Рибіцький І.В., Карпаш М.О. (2008) Обгрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 31–35.
10. Тютякин А.В. (2012) О применении вейвлет-преобразования в спектральном анализе информативных сигналов систем неразрушающего контроля и диагностики. *Контроль. Диагностика*, **8**, 11–16.
11. Тетерко А.Я., Назарчук З.Т. (2004) *Селективна вихрострумова дефектоскопія*. Львів, НАН України, ФМІ ім. Г.В. Карпенка.
12. Тихонов В.И. (1970) *Выбросы случайных процессов*. Москва, Наука. Главн. ред. физ.-мат. лит.

13. Редька М.О., Куц Ю.В., Левченко О.Е., Близнюк О.Д. (2020) Метод виявлення сигналів вихрострумової дефектоскопії малої обчислювальної ресурсоемності. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 22–25. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.02.03>
14. Куц Ю.В., Єременко В.С., Монченко О.В. та ін. (2006) Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів. Україна. Пат. № 35057 G01B 17/02.
15. Mardia, K.V., Jupp, P.E. (2000) *Directional Statistics*, England: John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
16. Fisher, N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge: Cambridge University Press.
17. Куц Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю. та ін. (2021) Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Ч.2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 11–18. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01>
18. Долиненко В.В., Шаповалов Є.В., Скуба Т.Г. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумового контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, 5-6, 60–67. <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
- the statistical processing of signals: Handbook. Ed.by V.P. Babak. Kyiv, IS DO [in Ukrainian].
7. Marchenko, B.G., Prymak, M.V., Shcherbak, L.M. (2001) *Theoretical fundamentals of analysis of stochastic signals and noises: Manual*. Ternopil, TDTU [in Ukrainian].
8. Kachanov, V.K., Sokolov, I.V. (2007) Peculiarities of application of complex modulated signals in ultrasonic flaw detection. *Defektoskopiya*, 12, 18–42 [in Russian].
9. Karpash, O.M., Rybitsky, I.V., Karpash, M.O. (2008) Substantiation of possibility for application of Barker codes in improvement of sensitivity contactless ultrasonic measurement of thickness. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 31–35 [in Russian].
10. Tyutyakin, A.V. (2012) On application of wavelet-transform in spectral analysis of informative signals of non-destructive testing and diagnostics systems. *Kontrol. Diagnostika*, 8, 11–16 [in Russian].
11. Teterko, A.Ya., Nazarchuk, Z.T. (2004) *Selective eddy current flaw detection*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
12. Tikhonov, V.I. (1970) *Random process outliers*. Moscow, Nauka [in Russian].
13. Redka, M.O., Kuts, Yu.V., Levchenko, O.E., Bliznyuk, O.D. (2020) Method to detect signals of eddy current flaw detection with small computer resource capacity. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 22–25 [in Russian]. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.02.03>
14. Kuts, Yu.V., Eremenko, V.S., Monchenko, O.V. et al. (2006) *Method of ultrasonic measurement of thickness of products*. Ukraine Pat. 35057 G01B 17/02 [in Ukrainian].
15. Mardia, K.V., Jupp, P.E. (2000) *Directional Directional Statistics*, England: John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
16. Fisher, N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge: Cambridge University Press.
17. Kuts, Yu.V., Uchanin, V.M., Lysenko, Yu.Yu. et al. (2021) Application of Hilbert transform for analysis of signals of automated eddy current inspection. Pt. 2: Deriving secondary diagnostic features and examples of realization. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 4, 11–18. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01> [in Ukrainian].
18. Dolinenko, V.V., Shapovalov, E.V., Skuba, T.G. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, 5-6, 60–77. <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>

References

APPLICATION OF PHASE CHARACTERISTICS OF THE SIGNAL IN AUTOMATED EDDY CURRENT FLAW DETECTION

M.O. Redka¹, Yu.V. Kutz¹, E.V. Shapovalov², V.M. Uchanin³, Yu.Yu. Lysenko¹, O.D. Bliznyuk⁴

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

E-mail: y.kuts@ukr.net

²E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: inpat59@ukr.net

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

⁴Research Laboratory of Technical Diagnostics and Nondestructive Testing of Aeronautical Engineering of NAU.

1 Guzar Lyubomyr Ave., 03058, Kyiv, Ukraine. E-mail: nau_409@ukr.net

The paper describes model and experimental studies of phase methods for detection of signals at eddy current flaw detection, observed against a noise background. Testing two methods for signal detection was considered and performed. The first is based on determination of the number of zeroes of the analyzed signal in the sliding mode, and has a low computational resource intensity and simple circuit design. The second method is based on analysis of the resultant vector length (r-statistics) derived from phase characteristic of analyzed signal at its multi-window sliding processing, which features a high reliability of the detected signal. The effectiveness of these methods was checked in the system of automated eddy current flaw detection. Ref. 18, Tabl. 2, Fig. 9.

Keywords: eddy current flaw detection, automated eddy current testing, signal detection, phase method

Надійшла до редакції 17.01.2022

AERIAL ROBOTS FOR CONTACT-BASED ULTRASONIC THICKNESS MEASUREMENTS FOR FIELD INSPECTIONS

ЛІТАЮЧІ РОБОТИЗОВАНІ КОНТАКТНІ УЛЬТРАЗВУКОВІ ТОВЩИНОМІРИ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ ОБСТЕЖЕНЬ В ПОЛЬОВИХ УМОВАХ

by Robert (Bob) Dahlstrom

Aerial robotic systems, also referred to as drones, enable the collection of data on a scale and scope heretofore unimaginable. Field inspections at industrial sites using an aerial robotic inspection system that makes physical contact with a structure or asset as part of a nondestructive testing (NDT) or nondestructive evaluation (NDE) routine is safer than placing humans at elevation and enables more data to be gathered in less time. These aerial robotic systems are highly extensible and agile enabling safer, faster, and better inspections. Robotic inspection systems are forecast to grow exponentially this decade and beyond, as asset owners and service providers realize their economic value creation, increased data collection, and safety contributions. One early use case of these aerial robotic systems measures wall thickness (in other words, the thickness of a substrate) with a hand-held electronic ultrasonic testing (UT) measurement device (see Figure 1). Selected and implemented properly, these systems positively impact safety, time, analytics, access, and cost. Companies looking to keep personnel out of danger at height or in potentially hazardous locations can adopt aerial robotic systems. What is measured is known and we can make predictions based on these measurements. These UT thickness measuring aerial robotic systems enable companies to improve the UT thickness measurement process and gather data that didn't exist before, thus adding to the body of knowledge. The systems can also bring massive efficiencies to the job, including a full auditable data record and information for digital implementation plans, allowing focus on the overall picture to plan and budget accordingly. Further, they help achieve substantial cost savings, particularly when they prevent an asset from being taken out of service or enabling an asset to be returned to service sooner. Finally, they are an elegant safety solution, moving workers from harm's way and potentially saving lives.

Літаючі роботизовані системи, також відомі як дрони, забезпечують можливість збору даних для кола застосувань і обсягів, які досі були неможливими. Виконання польових обстежень промислових об'єктів з використанням літаючої роботизованої системи контролю, здатної забезпечити фізичний контакт з конструкцією або об'єктом під час виконання процедур неруйнівного контролю (NDT) або обстежень технічного стану (NDT), є безпечнішим, ніж розміщення людей на висоті, і дозволяє зібрати більше даних за менший час. Ці повітряні роботизовані системи є універсальними, розширюваними та гнучкими, що дає змогу здійснювати безпечніші, швидші та якісніші вимірювання. У цьому десятиріччі і в подальшому очікується експоненціальне зростання роботизованих систем контролю, оскільки власники активів і постачальники послуг усвідомлюють їх економічну рентабельність, вкладу в розширення інформаційних ресурсів, а також у підвищення безпеки. Один з перших випадків використання цих повітряних робототехнічних систем дозволяв вимірювати товщину стінки (точніше, товщину підкладки) за допомогою портативного електронного ультразвукового вимірювального пристрою (UT). Вибрані та впроваджені належним чином, ці системи позитивно впливають на безпеку, час, аналітику, доступ та вартість. Вимірювання надають відомості, які є основою наших прогнозів. Ці повітряні роботизовані системи для вимірювання товщини UT дозволяють компаніям удосконалювати процес вимірювання товщини UT і збирати дані, яких раніше не існувало, таким чином доповнюючи знання. Системи також здатні підвищити ефективність роботи, включаючи повністю контрольовані протоколи та інформацію для цифровізації планів впровадження, дозволяючи зосередитися на загальній картині для планування та відповідного бюджету. Крім того, вони допомагають досягти значної економії витрат, особливо коли вони запобігають виведенню активу з експлуатації або сприяють скорішому поверненню активу в експлуатацію. Нарешті, вони є елегантним рішенням щодо безпеки, яке захищає працівників від небезпеки та потенційно рятує життя.

Introduction

For corrosion or other engineers to take UT thickness measurements at height they may need to utilize a lift, scaffolding, ladders, inspection trucks with elevated baskets, rope work, catwalks, or other solutions. Companies looking to keep personnel out of danger at height or in potentially hazardous locations can adopt aerial robotic systems. However, as with many things, choosing the right system for the job is essential for optimal results.

While NDT field inspection programs can dramatically increase the safety and integrity of assets, ac-

cess requirements in performing these inspections in elevated areas introduces risk. Working at height is dangerous, due to the possibility of falls, as well as being time-consuming due to access setup. In certain instances, it may also require taking an asset, such as a flare stack, offline so it can be accessed to take measurement readings. Utilizing an aerial robotic system for UT thickness measurements can mitigate these risks and potentially eliminate asset downtime.

Drones are commonly used for visual inspections, but it is rare to find them used for contact-based inspections. Researchers have investigated using drones

for contact-based NDT (Skaga 2017; Mattar 2018), yet these studies tend to be theoretical and conceptual. The contact-based UT thickness measurement drone system presented in this paper is in commercial use and differs from those in the literature in its computer-controlled precision flight while making contact with a structure (using no human pilot/operator), and in that it utilizes the same handheld UT electronic measurement devices that a corrosion or other engineer uses in the field integrated onboard the aircraft with the data streamed live to the engineer or observer on the ground.

Further, because these systems are «flying computer» and data-gathering machines, they collect a large amount of data for NDT/NDE. This data can feed NDE 4.0, which is a force multiplier for inspecting, testing, and evaluating industrial assets for their safety, operational effectiveness, and efficacy. NDE 4.0 uses the tools of Industry 4.0—machine learning, artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), big data, and so on—to expand and generate knowledge, insights, and understandings that turn data gathered from industrial field inspections, into actionable information to enhance and extend knowledge-based information-driven decision making. These aerial robotic systems help with both the increasing importance of digitalization of assets and data and the use of NDE 4.0 by making it easier to collect information.

Aerial Robotic Measurement Collection Methodology

Having a computer-controlled heavy-lift multirotor drone outfitted with various sensors and functions

to allow precisely controlled flight close to structures is critical in taking contact-based UT thickness measurements (see Figure 2). Manual control of such systems is unable to accomplish the precise flying and maneuvers required; thus, software-controlled flight is crucial. The aerial robotic system in this paper utilizes existing UT electronics and digital probes to gather measurements. The handheld electronic UT thickness measurement device onboard the aircraft streams all the data (not just what is displayed on the LED view screen) to the computer onboard the aircraft and the pilot and corrosion engineer on the ground.

The system works as follows:

The tethered (for power and data transfer) or untethered (battery power and wireless data) aerial robotic system is located close to the structure where UT thickness measurements are to be taken.

The corrosion engineer, using a computer tablet, opens the software interface to begin the test and enters the job information (operator, job name, upper and lower limits for measurements, etc.) and standardizes the handheld UT thickness measurement device that is mounted onboard the aircraft, as per the definition of standardization provided by ASTM 1316 (ASTM 2021).



Photo credit: DeFelsko Corp.

Figure 1. An example of a handheld electronic UT measurement device with a single-element 5 MHz contact transducer.

Рис. 1. Приклад портативного електронного вимірювального пристрою UT з одноелементним контактним перетворювачем 5 МГц



Photo credit: DeFelsko Corp.

a



Photo credit: ©2020 Apellix, Working Drones Inc.

b

Figure 2. Ultrasonic thickness measurement system in action: (a) on an in-service aboveground storage tank; (b) on an in-service active flare stack.

Рис. 2. Робота ультразвукової системи товщинометрії на діючому обладнанні: (а) наземний резервуар; (б) активна факельна труба

The pilot engages the aerial robotic system’s software and the system takes off vertically to approximately 2 m (6.5 ft) in height, hovers, and completes self-checks.

The pilot then uses a standard handheld radio frequency transmitter to manually fly the system close to the where the UT thickness measurement is to be taken (the «gate» or «window»). (The radio transmitter is the standard operations control for the aircraft. Its sole use in this case is for positioning the aircraft close to the area where the thickness measurements are to be taken. It is also on standby in case manual operational flight controls are needed; for example, in case of a failure of the software).

Once the aerial robotic system is within the «gate» (~2 m [6.5 ft] from the target part of the structure), the pilot selects «start» on the software interface.

The system then operates under full computer control (no manual input). It flies in (while dispensing couplant gel onto the probe), touches the surface, and takes a UT thickness measurement reading, typically taking 1 to 4 s. The aircraft then backs away, and the pilot repositions the system at the next location and repeats the process for additional measurements at different corrosion monitoring locations (CMLs).

The corrosion engineer sees the data on their computer tablet in real time.

After landing, the operator has the option to download the full data record which includes all the UT thickness readings, high-definition (HD) video, and additional information such as locational coordinates and weather and environmental data (see Figure 3). The data is also made available in a secure data repository accessible via the Internet. The system is agile and motile, enabling it to take a lot of readings in a short amount of time. Depending on the condition and geometric complexity of the asset being measured as well as environmental and weather conditions, the system can take measurements at up to a few hundred contact locations per hour.

Aerial Robotic System UT Thickness Measurement Technology

UT thickness measurements require the application of a couplant gel to the measurement probe tip prior to taking a reading. Thus, the end effector at the terminus of the robotic arm has a mechanism to dispense the couplant prior to each contact with a structure (see Figure 4). There is a reservoir of couplant gel on the aircraft with a pump and motor connected to a small-diameter tube that runs the length of the robotic arm and attaches to the end effector. The onboard computer, via the embedded software programming, signals the pump to push the couplant to the couplant injection point at a short time interval prior to making contact with a structure to take a UT thickness measurement.

Onboard the aircraft is also the handheld electronic UT thickness measurement device with a single-

or dual-element contact transducer capable of taking echo-to-echo ultrasonic thickness measurements. The device is plugged into the onboard computer for power and data transfer. The full data record is transmitted during its use, not just what is set to display

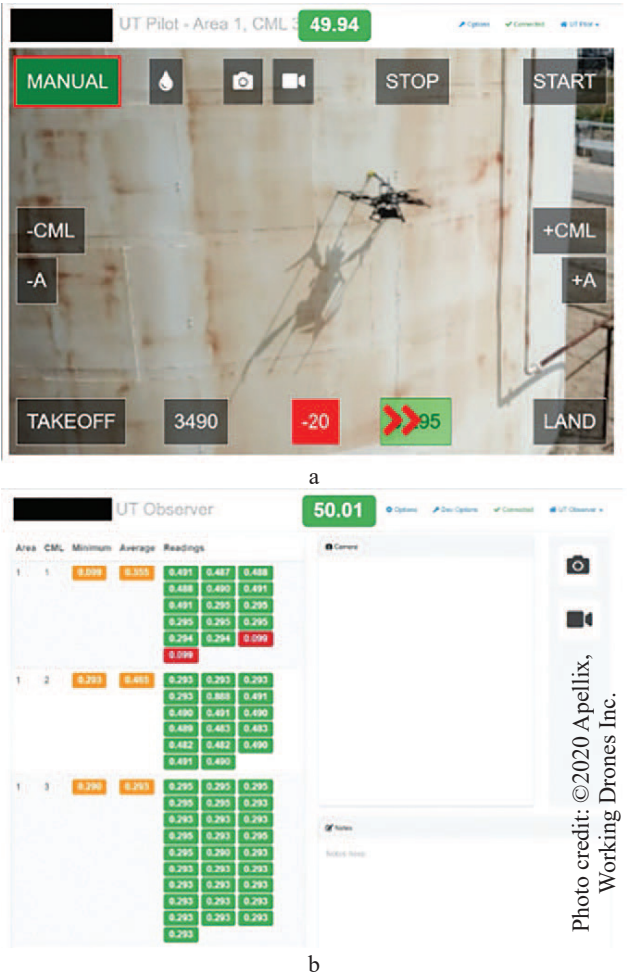


Figure 3. An example of the screen views that are streamed live to the computer tablets held by the pilot/system operator and observer (corrosion engineer or NDT technician): (a) live video stream; (b) data report.

Рис. 3. Приклад скріншотів з відео в реальному часі на комп’ютерних планшетах пілота/оператора системи та спостерігача (інженер-корозіоніст або технік НК): (а) відео в режимі онлайн; (б) протокол вимірювань

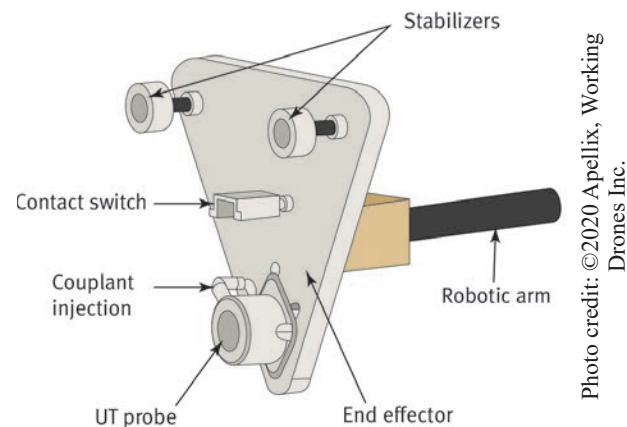


Figure 4. The robotic end effector that disperses the couplant gel.
Рис. 4. Кінцева насадка робота для подачі контактного гелю

on the device LED screen. The system uses a Wi-Fi router to connect with the onboard computer which, among other things, allows the aircraft to communicate with the pilot and the corrosion engineer on the ground, enabling it to display data in real time. The aircraft also has an onboard HD camera and may include a «gas sniffer», which records concentrations of various gas levels and notifies the system operators if certain thresholds of gas are detected. All the data from the onboard computer is saved to a memory card/USB flash drive. The data is also made available in a secure cloud-based repository with the ability to create charts, graphs, download data, and so on.

Example Use Case

Recently the aerial robotic system described in this paper was utilized at an in-service gas refinery in the southwestern United States. The NDT engineering company provided guidance as to the areas of concern where UT thickness measurements were required on behalf of the asset owner. These CMLs were pointed out to the aircraft system pilot by the NDT engineering company personnel. Representatives of the asset owner were onsite during the flights. The job was completed without tethered ground power to the aircraft. The total time from initial takeoff to final landing, including landings to change batteries, was under 90 min and multiple readings were obtained from more than 100 separate content monitoring locations. Weather on the date of testing was partly cloudy with winds ranging from 5 to 15 mph, generally from the east/northeast. The system is not recommended for use in winds over 20 mph (15 knots). The ambient temperature ranged from 80 to 90 °F (26 to 32 °C) over the course of the morning. The UT thickness measurements would have been postponed had there been weather conditions such as high winds or rain.

A total of 104 CMLs were successfully sampled from 112 attempts. In eight of the 112 instances, no valid data was obtained, typically because of a wind gust or other disruption to the flight. In almost all the successful locations, multiple measurements were obtained. From the total of 535 measurements at 104 locations, the minimum (lowest) recorded wall thickness measurement is reported for the individual location. Data is stored in the onboard computer and relayed in real time to the computer tablet of the engineers on the ground. A separate simplified data stream is presented to the aircraft pilot. Location data is tracked using cameras located on the ground and on the aircraft. During flight, an HD video was recorded for post-flight analysis and use. Referring to Figure 5 showing an annotated photo of one side of the flare stack, you will notice there is a cluster of readings in a section approximately two-thirds of the way up and to the left. This section was an area of concern to the asset owner and engineering NDT company. It was

theorized the metal thickness in this area might have been thinner than the other areas of the stack, indicating it was corroding more quickly than the asset in general. Multiple UT thickness readings were taken at this area. Due to privacy issues, the thickness readings cannot be shared or published. That said, thickness measurement data was consistent with previously obtained measurements taken by engineers using handheld electronic measurement devices utilizing lifts while the asset was out of service (Dahlstrom 2020).

The flare is approximately 68 ft (20.7 m) tall with a catwalk at about 55 ft (16.8 m). Sections from approximately 8 ft (2.4 m) above the ground to approximately 4 ft (1.2 m) below the catwalk were tested. A ladder obstructed the ability to take measurements on the southwest and west side of the stack, and a vertical pipe rack obstructed measurements on the northeast corner of the stack. During the course of the flights, the engineers had access to the user interface that streamed the UT thickness reading measurements in real time.

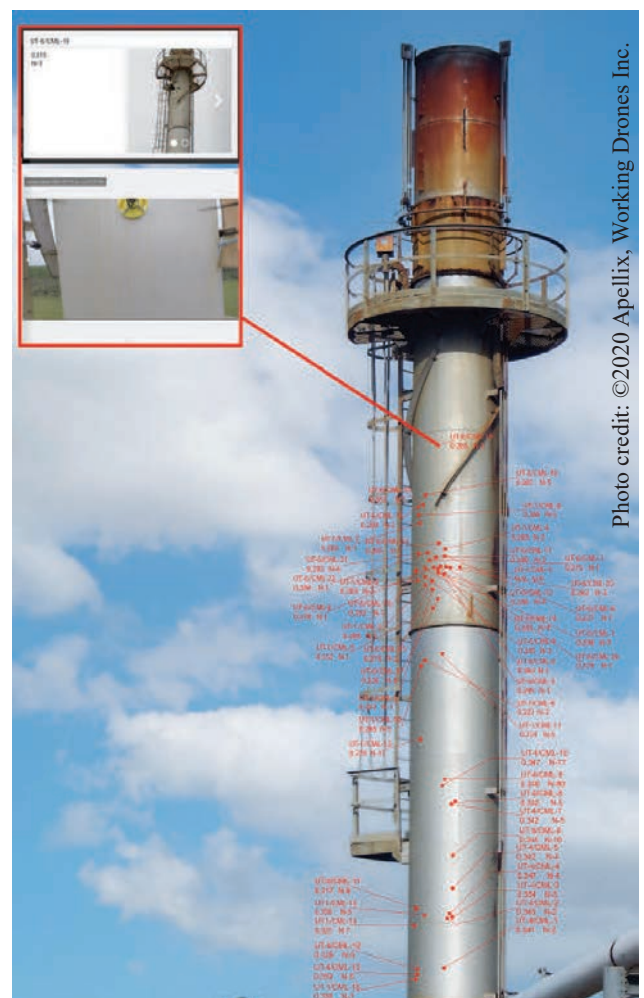


Figure 5. An example of the data obtained from a section of an in-service flare stack (note all numbers and values are illustrative).

Рис. 5. Приклад візуалізації даних, отриманих на секції діючої активної факельної труби (примітка: всі числа та значення є ілюстративними)

Additional Data

In addition to the UT thickness data collected during the flight of the aerial robotic UT system, HD video was recorded, as were still photos of the UT probe tip in contact with the flare stack as the UT thickness reading was being collected (see Figure 6).

In addition to the snapshot photos taken for each measurement location from onboard the aircraft and the snapshot of the aerial robotic system making contact with the flare stack from the camera on the ground, a full HD video from onboard the aircraft was recorded. This video is provided to the client for their use; for example, to review it for visual areas of corrosion or to look for surface areas of concern. Localization data is included; however, as GPS signals are not accurate, especially when flying close to structures, it is not precise enough for use to match CMLs on the physical geometry of the structure.

Data gathered from HD cameras can include visual, multispectral, and other imaging data. Further, additional information can be collected from sensors and devices placed in physical contact with surfaces. As NDE 4.0 is data driven, industrial inspection robotic systems are perfect for enabling it and affording its benefits.

Capabilities that these aerial robotic systems make available for NDE 4.0 include aerographic services that utilize 3D and other computer vision; various AI, machine vision, computational geometry, simultaneous localization and mapping (SLAM); live 3D point clouds; stereoscopic real-time video photogrammetry; and other technology innovations. This would include mature and emerging technologies such as the use of AI, machine learning, machine vision, deep learning, big data and smart data processing and visualization, cloud computing, augmented/virtual/mixed reality, blockchains, 5G, quantum computers, special data formats and data storage, and more (Vrana 2020).

These aerial robotic systems excel at gathering the data needed to unlock the potential of NDE 4.0.

Visual inspection can also enable a look at the air density and detect gas leakage using optical gas imagery camera-based systems. Similar «bolt on» technologies to robotic systems can enhance the data collection component of NDE 4.0, thereby augmenting the UT thickness data collected. Outfitting a drone with an array of multimodal sensory devices collecting a plethora of data and information will enable the best success and use of NDE 4.0 as these systems provide more and better data for analysis.

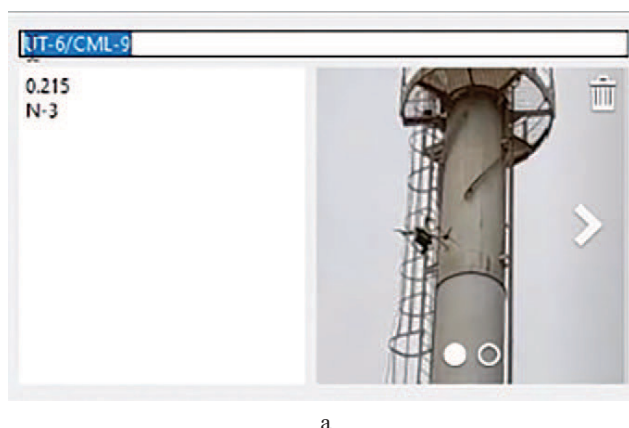
Drawbacks of Industrial Robotic UT Thickness Measurements and Inspections

The aerial robotic system described in this paper is not always the ideal solution. In many situations, the existing inspection regime and methods can be completed relatively inexpensively and safely. They provide the requisite data and information for good operations and knowledge of the current and projected future state of the asset. Aerial robots can require a relatively high upfront investment (Global Electronic Services 2021), although on a per-inspection cost basis, the robotic inspections may cost less.

These systems are aircraft with electronics onboard and are thus subject to limited operations due to weather. For example, you could not operate one in the rain unless it is specifically designed to be waterproof. Wind is also a limiting factor as gusts, the venturi effect, crosswinds, and low-velocity eddies on structures all can impact their flight and performance.

As these systems collect huge amounts of data, they provide a fantastic opportunity to add to or create a digital record of industrial field assets.

Additionally, robots do not respond well to many unexpected situations. Robots are not as versatile as people and while they may exceed at certain specif-



a



b

Figure 6. An example of flight details: (a) a sample UT thickness measurement reading (UT-6) at condition monitoring location 9 (CML-9) showing the lowest measurement reading out of three readings (N-3); (b) photo of the aerial robotic system making contact with the flare stack from the post-flight report (note all numbers and values are illustrative).

Рис. 6. Приклад фрагментів протоколу польоту: (а) результати УЗ товщинометрії (протокол UT-6) у точці 9 (CML-9) моніторингу технічного стану – мінімальне значення товщини за трьома вимірами (N-3); (б) скріншот протоколу польоту – етап встановлення контакту повітряної роботизованої системи з факельною трубою (примітка: всі числа та значення є ілюстративними)

ic tasks—especially repeated programmatic tasks—they might not be able to adapt in unexpected or unanticipated situations. Since the aerial robotic systems are not human inspectors, they may not discover some issues that an experienced human inspector might. Due to this limitation, companies supplement robotic-powered inspections and examinations with ones completed by people.

When properly selected and utilized, aerial robotic inspection systems can assist with creating safer workplaces, provide better data to manage assets, and unlock cost savings. While industrial robotic inspection systems can be highly effective when properly used, they do have limitations and, in some cases, they are the incorrect tool.

Organizational Benefits of Faster, Safer Robotic UT Thickness Measurements

Planned preventative maintenance has long been practiced as a strategy for keeping industrial field assets operating safely and efficiently. This has led to the development of standards to help asset owners maintain the integrity and fabric of their facilities and to ensure that they remain operationally safe and effective for their entire life cycle. Transformative technology such as aerial robotic UT thickness measurement and visual asset assessment systems, such as those discussed in this paper, allow customers to take a fresh look at the opportunity for conducting inspections and data-gathering operations that can help redefine a planned maintenance regime.

As these systems collect huge amounts of data, they provide a fantastic opportunity to add to or create a digital record of industrial field assets. Investment in a powerful data-collection system via an aerial robotic system is fairly simple and can be easily made purely on a financial footing. Utilizing these systems makes other visual or data inspections redundant, as the aerial robot collects UT thickness measurement data as well as HD video that can be used for visual inspection. The benefits have been clearly shown from the early adopters of this technology.

Conclusion

Given the enormous potential industrial aerial robotic field inspection systems enable, one can easily envision a future with robotic systems having more automation, functionality, and capability. This would enable more inspections as an increased number of inspection robots are placed in service and as functionality increases.

The systems presented in this paper improve efficiency due to reduced inspection times and increase efficacy by faster reporting and decision making, which adds value and creates even more value when coupled with NDE 4.0 processes. Further, they help achieve substantial cost savings, particularly when

they prevent an industrial asset from being taken out of service or enabling the asset to be returned to service faster. And, finally, they are an elegant safety solution moving workers out of harm's way and potentially saving lives.

As we move toward a more automated future with robotic inspection tools becoming more advanced, affordable, and utilized, we will continue to utilize automation tools that free human inspectors from the dirty, dull, and dangerous tasks of collecting inspection data. This will enable them to spend more time on the higher value components of industrial asset operation and maintenance.

Author

Robert (Bob) Dahlstrom: Apellix, Working Drones Inc., Jacksonville, FL; r.dahlstrom@apellix.com

References

1. ASTM, 2021, ASTM E1316 – *Standard Terminology for Nondestructive Examinations*, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://doi.org/10.1520/E1316-21>
2. Dahlstrom, R., 2020, «*The Efficacy of Aerial Robotic Systems (Drones) for Taking Dry Film Thickness (DFT) Measurements at Height Consistent with SSPC PA2 Standards*» available at https://www.academia.edu/35709547/the_efficiency_of_aerial_robotic_systems_drones_for_taking_dry_film_thickness_dft_measurements_at_height_consistent_with_sspc_pa2_standardS
3. Global Electronic Services, 2021, «*Guide to Inspection Robots Used in Industrial Sectors*», accessed 12 May 2021, <https://gesrepair.com/guide-inspection-robots-used-industrial-sectors/>
4. Mattar, R., 2018, «Development of a Wall Sticking Drone for Non-Destructive Ultrasonic and Corrosion Testing», *Inspection Engineering Journal*, Vol. 24, No. 2, <https://inspectionengineering.com/journal/2018-04-25/7567/development-of-a-wall-sticking-drone-for-non-destructive-ultrasonic>
5. Skaga, S.K., 2017, «*Feasibility Study of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Application for Ultrasonic Non-Destructive Testing (NDT) of Wind Turbine Rotor Blades. Preliminary Experiments of Handheld and UAV Ultrasonic Testing on Glass Fibre Laminate*», Master's Thesis, The Arctic University of Norway, available at <https://hdl.handle.net/10037/11350>
6. Vrana, J., 2020, «*NDE 4.0: The Fourth Revolution in Non-Destructive Evaluation: Digital Twin, Semantics, Interfaces, Networking, Feedback, New Markets and Integration into the Industrial Internet of Things*», <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17635.50720>

Prepermission to Reprint 04.02.2022:

The American Society for Nondestructive Testing, Inc.

CITATION

Materials Evaluation 79 (7): 687–694

<https://doi.org/10.32548/2021.me-04213>

©2021 American Society for Nondestructive Testing

З.Т. НАЗАРЧУКУ – 70



Редколегія та редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» щиро вітають члена редколегії журналу доктора фізико-математичних наук, професора, заслуженого діяча науки та техніки України, академіка НАН України, директора ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, члена Президії НАН України

Назарчука Зіновія Теодоровича з ювілеєм!

З.Т. Назарчук народився 12 квітня 1952 р. у Львові. У 1974 р. з відзнакою закінчив фізичний факультет Львівського державного університету ім. Івана Франка. Наукову діяльність розпочав старшим інженером у Фізико-механічному інституті АН УРСР. У 1982 р. захистив кандидатську, а в 1990 р. докторську дисертацію на тему «Чисельне розв'язання двовимірних задач дифракції методом сингулярних інтегральних рівнянь». З 1991 р. Зіновій Теодорович очолює відділ фізико-математичних основ неруйнівного контролю та діагностики ФМІ ім. Г.В. Карпенка і водночас стає першим заступником директора, а з 2015 р. – директором інституту.

З 1995 р. З.Т. Назарчук – чл.-кор. НАН України Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства, з 1998 р. – професор, з 2006 р. – академік НАН України.

Наукові праці З.Т. Назарчука присвячено теорії дифракції хвиль, фізичним основам дефектоскопії та міцності матеріалів, зокрема неруйнівному контролю. Він створив теорію взаємодії зондувальної хвилі із системою довільних тріщиноподібних макродефектів конструкційного матеріалу, розвинув методи аналізу тонкої структури та властивостей дифрагованих полів, поглибив і розширив фізичні основи дефектометрії та структуроскопії. Роботи З.Т. Назарчука виявилися особливо ефективними для створення методик контролю корозійних тріщин і ламаних тонких включень; дають змогу замінити дороге натурне випробування елементів сучасної дефектоскопічної апаратури їх комп'ютерним моделюванням, закладають реальну можливість паспортизації найважливіших параметрів відповідних вузлів; вирішують проблеми радіохвильового контролю нещільностей у багатопарових діелектричних композиціях та виявлення корозійних пошкоджень під покриттями; дають

можливості для розробки експериментальних методик визначення адгезії покриттів.

Створені на основі наукових напрацювань З.Т. Назарчука засоби та системи неруйнівного контролю відзначаються завадостійкістю, чутливістю і перевершують світові досягнення.

Науковий внесок та сумлінна праця З.Т. Назарчука відзначені державними нагородами – орденами «За заслуги» I, II та III ступенів, Державною премією України в галузі науки і техніки, він є лауреатом премій ім. О.І. Лейпунського, ім. Є.О. Патона, ім. К.Д. Синельникова, носить звання «Заслужений діяч науки і техніки України».

З.Т. Назарчук є членом Наукового товариства імені Шевченка, головою Західного наукового центру НАН України та МОН України, членом Президії НАН України, членом правління Українського міжнародного радіосоюзу (URSI) та Українського товариства з неруйнівного контролю і технічної діагностики (УТНКТД), членом Міжнародного інституту інженерів-радіофізиків (IEEE), Європейського товариства з цілісності конструкцій (ESIS), Національного комітету України з теоретичної і прикладної механіки та Українського товариства з механіки руйнування.

Зіновій Теодорович є автором більш як 150 наукових праць, зокрема трьох монографій. Його книга «Singular integral equations in diffraction theory» (Львів, 1994) відома фахівцям багатьох країн. Чимало уваги вчений приділяє підготовці наукових кадрів, він є членом Комісії по роботі з науковою молоддю НАН України. З 1991 р. Зіновій Теодорович очолив новий науковий напрям, який заклав основи наукової школи «Фізичні основи, методи та засоби діагностики матеріалів і середовищ».

З.Т. Назарчук є член редакційних колегій таких наукових журналів, як «Фізико-хімічна механіка матеріалів» (Львів), «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» (Київ), «Радіофізика і радіоастрономія» (Харків). З 1996 р. він очолює редколегію міжвідомчого збірника «Відбір і обробка інформації».

Зіновій Теодорович Назарчук все своє життя присвятив науковій діяльності, його праця – безцінний внесок у розвиток науки і техніки нашої країни!

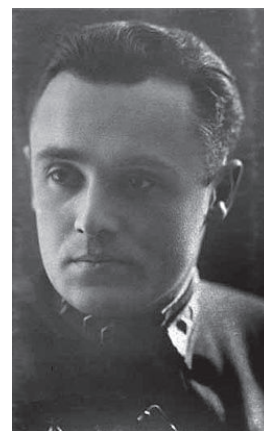
*Щиро бажаємо ювіляру міцного здоров'я,
успіхів і благополуччя!*

ДАТИ, ПОДІЇ, ФАКТИ З ІСТОРІЇ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

4 січня 2010 р. офіційно відкрито Бурдж Халіфа – найвищий хмарочос у світі, розміщений в м. Дубай, Об'єднані Арабські Емірати. На сьогодні він є найвищою спорудою планети. Хмарочос сягає висоти 828 м і складається зі 163 поверхів. Вартість спорудження – 1,5 млрд. доларів США. У хмарочосі 57 ліфтів найшвидшої у світі системи, кабінки рухаються зі швидкістю 18 м/с. Також тут є автономна система електропостачання – 60-метрова вітрова турбіна та величезні сонячні батареї. Хмарочос зводили шість років. Під час будівництва використані 31400 м³ бетону та 330000 т сталевих арматур, а фасад виготовлено з нержавіючої сталі, алюмінію та скла. Будівництво хмарочосу стало полігоном застосування сучасних технологій та засобів технічного контролю.



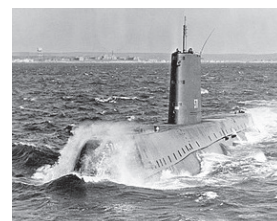
12 січня 1907 р. в м. Житомирі народився Сергій Павлович Корольов (1907–1966, родові прізвище Королів) – український радянський вчений в галузі ракетобудування та космонавтики, конструктор, основоположник практичної космонавтики. У кінці 1920-х р. Корольов захопився конструюванням планерів, а у 1930-х р. брав участь у створенні та випробуванні перших радянських ракет. У 1946 р. Корольова призначають головним конструктором балістичних ракет. Під його керівництвом послідовно створюються перші радянські балістичні ракети, причому Р-5М стала першою в світі ракетою-носієм ядерного боекомплекту. Найважливішим конструкторським досягненням Корольова була перша в світі міжконтинентальна балістична ракета Р-7, перший вдалий запуск якої відбувся 27 серпня 1957 р. Вона стала основою досягнень у галузі безпілотної та пілотованої космонавтики. 4 жовтня 1957 р. було виведено на орбіту першого в історії штучного супутника Землі. 12 квітня 1961 р. здійснено перший космічний політ на кораблі «Восток» Юрія Гагаріна. 12 жовтня 1964 р. виведено на орбіту перший багатомісний корабель серії «Восход» з екіпажем на борту.



21 січня 1934 р. введено в експлуатацію Харківський турбогенераторний завод. Будівництво заводу почалось у 1929 р. На сьогодні «Турбоатом» – провідне українське турбінобудівне підприємство, одне з найбільших у світі, яке спеціалізується на виробництві парових турбін для теплових і атомних електростанцій, гідралічних турбін для гідроелектростанцій та гідроакумуляючих електростанцій, газових турбін для теплових електростанцій, здійснює повний цикл виробництва: проектування, виготовлення, постачання, налагодження та фірмове обслуговування турбінного устаткування для всіх типів електростанцій. Центральна заводська лабораторія, до функцій якої входить технічний контроль, є однією з найбільших в Україні.



21 січня 1954 р. в США спущений на воду перший підводний човен з ядерним реактором «Наутілус». Його водотоннажність 3500 т, потужність ядерного реактора 15 000 к.с., довжина 98,7 м. Діаметр човна (8,5 м) забезпечував великий простір всередині, з трьома поверхами в більшій частині корпусу. У носі човна був торпедний відсік з шістьма торпедними апаратами і 26-ма торпедами. Тести човна показали переваги ядерних силових установок для підводних човнів – «Наутілус» міг дуже швидко зблизитися з супротивником або віддалитися від нього, маючи дуже хорошу маневровість. У 1958 р. цей човен вперше в світі виконав похід на Північний полюс. З березня 1980 р. «Наутілус» було виведено з флоту ВМФ і передано в музей.



21 січня 1976 р. стартували планові рейси літаків «Конкорд» авіакомпанії British Airways за маршрутами Лондон – Бахрейн та Париж – Ріо-де-Жанейро. Перший в світі надзвуковий пасажирський літак «Конкорд» був створений в результаті злиття в 1962 р. двох національних програм розробки надзвукового авіатранспорту Франції (Sud Aviation) та Великої Британії (BAC), двигуни літака – спільної розробки англійської Rolls-Royce та французької SNECMA. Всього було виготовлено 20 літаків. За 27 років регулярних і чартерних рейсів було перевезено більше 3 мільйонів пасажирів. Через надзвичайно великі витрати комерційна експлуатація «Конкордів» була в цілому збитковою, в результаті літаки були зняті з експлуатації у 2003 р.



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



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



1 лютого 1958 р. запущений перший американський штучний супутник Землі «Експлорер-1». Він розроблявся та створювався в Лабораторії реактивного руху Каліфорнійського технологічного інституту під керівництвом доктора Вільяма Пікерінга. Повна маса супутника становила 13,97 кг, з них 8,3 кг приладів. Супутник виявив радіаційні пояси навколо Землі (пояси Ван Аллена) – одне з важливих відкриттів міжнародного геофізичного року. Передача даних припинилась 23 травня 1958 р., коли закінчився заряд батарей. Після цього апарат перебував у космосі понад 12 років і зійшов з орбіти над Тихим океаном 31 березня 1970 р., здійснивши понад 58 тисяч обертів.



2 лютого 1845 р. в містечку Гримайлів Чорківського району народився Іван Павлович Пулюй (1845–1918) – український фізик та електротехнік, винахідник, організатор науки, публіцист, перекладач Біблії українською мовою, громадський діяч. Встановив фундаментальні властивості та природу катодних променів, один із першовідкривачів Х-променів за деякий час до В. Рентгена. Професор і ректор Німецької вищої технічної школи в Празі, державний радник з електротехніки Королівства Богемія і Маркграфства Моравія. Дійсний член Наукового товариства імені Шевченка, почесний член Віденського електротехнічного товариства.



6 лютого 1883 р. в Києві народився Дмитро Павлович Григорович (1883–1938) – український авіаконструктор, творець першого гідроплану. Навчався в Київському політехнічному інституті. Перший свій легкий біплан Г1 з двигуном «Анзані» потужністю 25 к. с. Григорович випробував 10 січня 1910 р. З 1912 р. Григорович – технічний директор заводу 1-го Російського товариства повітроплавання. У 1913 р. сконструював свій перший літальний човен М-1. За роки Першої світової війни конструкторське бюро Григоровича створило понад 10 типів гідролітаків. У 1922 р. Григоровича було призначено технічним директором і начальником КБ Державного авіаційного заводу №1 у Москві, за його участю спроєктовано перші радянські винишувачі І-1 та І-2. У 1928 р. Григорович був заарештований і кілька років був ув'язнений у системі ГУЛАГ.



7 лютого 1906 р. народився Олег Костянтинівич Антонов (1906–1984) – український радянський авіаконструктор, д.т.н., академік АН УРСР. У 1930-х роках О.К. Антонов будував планери, які зіграли видатну роль у становленні планеризму. Згодом він працював в ДКБ Яковлева, а з 1946 р. – головним конструктором авіаційного ДКБ в Новосибірську, яке в 1952 р. було переведено в Київ. Під керівництвом Антонова розроблено транспортні літаки Ан-8, Ан-12, Ан-22, Ан-26, Ан-32, Ан-72, Ан-124, пасажирські літаки Ан-10, Ан-24, суцільнометалеві планери, систему автоматизованого проектування літаків, запроваджено клеєзварні з'єднання та композиційні матеріали тощо.



10 лютого 1906 р. спущено на воду британський лінокор «Дреноут», родоначальник нового класу кораблів і революції у військово-морській справі. «Дредноут» став першим кораблем, при будівництві якого був реалізований так званий принцип «all-big-gun» («усі гармати великі»). Його водотоннажність 21 845 т, довжина 160,7 м, ширина 25 м, осадка 9,4 м. Потужність чотирьох парових турбін 24 700 к.с., швидкість 21 вузлів. Корпус корабля виготовлено з поверхнево зміцненої броні з хромонікелевої сталі товщиною до 200 мм. озброєння: десять 305-мм гармат Mark X, двадцять сім 76-мм гармат, 5 торпедних апаратів.



11 лютого 1847 р. народився Томас Едісон (1847–1931) – американський науковець і винахідник, автор винаходів, на які видано 1093 патенти США та 1239 патентів інших країн. Більшість своїх винаходів зробив у лабораторії в Менло-Парк у штаті Нью-Джерсі, протягом 1876–1887 рр., включаючи створення лампи розжарювання. У 1879 р. створив систему розподілу електроенергії споживачам, телефон, фонограф, вугільний мікрофон тощо. У 1878 р. Едісон заснував компанію «Edison Electric Light», що згодом перетворилась в промислового гіганта – General Electric. Один з напрямків її діяльності сьогодні – розробки в галузі неруйнівного контролю.

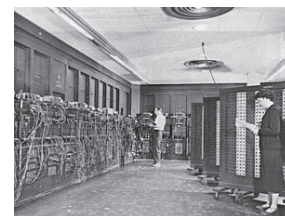
12 лютого 1933 р. народився Лев Іванович Бударін (1933–1995) – учений-хімік, чл-кор. НАН України. Освіту він одержав у Ташкентському університеті (1956 р.), а з 1963 р. працював в Україні, в Інституті загальної та неорганічної хімії та з 1970 р. – в Інституті фізичної хімії. Серед фахівців неруйнівного контролю він став відомим за розробку та теоретичне обґрунтування нового методу контролю – хімічного каталіметричного методу контролю герметичності, суть якого полягає у використанні для локалізації течії хімічних каталітичних реакцій, перебіг яких супроводжується утворенням забарвлених продуктів. Л. Бударін та його відділ брали участь в проєкті ІЕЗ ім. Є.О. Патона «Багатошарові труби великого діаметру».



12 лютого 1960 р. у київському Інституті фізики запущено перший український ядерний реактор ВВР-М. Пізніше, в 1970 р., на його базі було створено Інститут ядерних досліджень. ВВР-М – водно-водяний модернізований реактор басейного типу. У 1954 р. з ініціативи І.В. Курчатова Уряд прийняв постанову про створення ядерних центрів у ряді міст і будівництво в них дослідницьких ядерних реакторів. Реактор ВВР-М потужністю 10 мегават, призначається для виробництва ізотопів високої активності, проведення експериментів у галузі фізики нейтронів і досліджень процесів опромінення матеріалів. Реактор пройшов модернізацію і продовжує працювати.



15 лютого 1946 р. офіційно введений до ладу перший у світі програмований комп'ютер ENIAC (англ. Electronic Numerical Integrator and Computer). Комп'ютер розміщувався в Інституті електроніки Пенсильванського університету і займав площу 167 м². Його маса складала 30 т, а споживання електроенергії – 150 кВт. ENIAC став першим електронним цифровим комп'ютером, який можна було перепрограмувати для вирішення різних завдань. Побудований на замовлення армії США для обрахунку балістичних таблиць, виробництва ядерної зброї, прогнозування погоди, проектування аеродинамічних труб, досліджень космічного випромінювання тощо.



26 лютого 1934 р. відкрито перший завод з випуску «народного» автомобіля «Фольксваген». Першим випускався відомий автомобіль VW «Жук». Це наймасовіший автомобіль в історії, що вироблявся без перегляду базової конструкції. Всього було виготовлено 21529464 автомобілів. Розробкою займався Фердинанд Порше (в подальшому творець одного з варіантів танка «Тигр» та автомобілів «Порше»), який підтримував зв'язок з Фордом і активно впровадив нові технології на заводі. Зварювання забезпечувало швидку збірку автомобіля на конвеєрі, а великий об'єм контрольних операцій – його надійність.



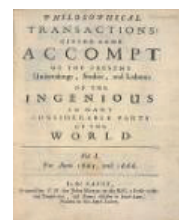
27 лютого 1965 р. здійснив перший політ літак Ан-22 «Антей» – український радянський турбогвинтовий широкофюзеляжний транспортний літак, створений в Києві Авіаційним науково-технічним комплексом ім. О.К. Антонова. Перша публічна демонстрація літака відбулася 15 червня 1965 р. на авіасалоні в Ле Бурже. Літак встановив 41 світовий авіаційний рекорд. Виробництво літака тривало до січня 1976 р. і було випущено 66 «Антейів».



4 березня 1904 р. в Одесі народився Георгій Гамов (1904–1968) – український радянський та американський фізик-теоретик, космолог. Розробив теорію альфа-розпаду через тунелювання, працював у галузі радіоактивного розпаду атомних ядер, ядерного синтезу в надрах зірок, теорією Великого вибуху, походження елементів, проблем генетики. Залишив СРСР у 1934 р. Світове визнання отримав за розробку теорії Великого вибуху, тобто походження Всесвіту, розрахунок генетичного коду, відкриття способів передачі спадкової інформації. Як фізик вивів формулу, що започаткувала теоретичне обґрунтування альфа-розпаду атомного ядра. Г. Гамов є автором теорії утворення хімічних елементів, згідно з якою вся речовина первісно складалася з нейтронів.



6 березня 1665 р. почав видаватися в Лондоні найстаріший англomовний науковий журнал світу — Philosophical Transactions of the Royal Society (укр. Філософські праці Королівського товариства). З 1887 р. поділений на два журнали: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Physical, Mathematical and Engineering Sciences публікує статті з фізичних, математичних та інженерних наук. Термін «Philosophical» треба розуміти як «натурфілософський».





7 березня 1957 р. здійснив перший політ середньомагістральний пасажирський літак Ан-10, створений під безпосереднім керівництвом О.К. Антонова. Розробка нового чотирьохдвигунного пасажирського літака «У» («Україна»), призначеного для експлуатації на авіалініях довжиною від 500 до 2000 км, почалася в АНТК ім. О.К. Антонова наприкінці 1955 р. Завданням передбачалося застосування двигунів НК-4 або ТВ-20. У травні 1956 р. відбувся захист ескізного проєкту. Уже через п'ять місяців був затверджений макет літака. Літак вироблявся з 1957 по 1960 рр. (вироблено 108 лайнерів). У 1973 р. ухвалено рішення про припинення експлуатації на лініях Аерофлоту усього парку літаків Ан-10.



8 березня 1979 р. фірма Philips продемонструвала прототип оптичного цифрового диску для збереження інформації (даних) у цифровому вигляді. Цей формат було спочатку розроблено для записування та відтворення лише звукозаписів, але пізніше його було пристосовано для зберігання різноманітних даних. Аудіодиски та аудіопрогравачі компакт-дисків стали комерційно доступними починаючи з жовтня 1982 р. Подальшим розвитком компакт-дисків стали DVD і Blu-ray. В Україні виробництво компакт-дисків почало розгортатися у середині 1990-х р. компаніями, які входили до складу АК «Росток». Підкладкою лівової частки усіх сучасних носіїв інформації слугує полікарбонат. Це пластмаса з температурою плавлення, що трохи перевищує 200 °C і має термін зберігання до 15 років.



12 березня 1863 р. народився Володимир Іванович Вернадський (1863–1945) – український та російський вчений, засновник геохімії, біогеохімії, радіогеології, творець вчення про біосферу, один із засновників Української академії наук та її перший голова-президент з 1 січня 1919 р. до 31 грудня 1921 р. Засновник Національної бібліотеки Української держави в Києві (нині – Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського). Організатор та директор Радієвого інституту (1922–1939), Біохімічної лабораторії (з 1929 р.; зараз Інститут геохімії й аналітичної хімії імені В.І. Вернадського РАН).



13 березня 1892 р. Товариство ім. Шевченка у Львові реорганізоване у Наукове товариство ім. Шевченка – всесвітню українську академічну організацію, багатопрофільну академію наук українського народу, рушійну силу формування та розвитку української науки кінця XIX – першої половини XX ст. Утворене 23 грудня 1873 р. у Львові за фінансування меценатів з Наддніпрянщини як Літературне товариство імені Т. Шевченка. Особливого розквіту досягло в період головування Михайла Грушевського (1897–1916). У 1939 р. ліквідоване радянською владою, відновлене у 1947 р. в Західній Європі та США. З 1989 р. організація знову діє на території України.



15 березня 1927 р. почалося будівництво Дніпрогесу в Запоріжжі. Перший гідроагрегат ввели в експлуатацію 10 жовтня 1932 р., а вже 1939 р. стали до ладу всі 9 гідроагрегатів станції загальною потужністю 560 тис. кВт. Турбіни було поставлено американською компанією «Ньюпорт Ньюс». Генератори було поставлено американською компанією «General Electric» та заводом «Електросила». Технічний нагляд за веденням будівництва здійснював полковник Г'ю Лінкольн Купер інженерного корпусу США. Він був головним інженером-консультантом проєкту на запрошення уряду.



19 березня 1935 р. Ігор Сікорський (1889–1972), видатний авіаконструктор українського походження, отримав у США патент на «літальний апарат прямого підйому». Протягом 1908–1912 рр. Ігор Сікорський побудував у Києві 6 моделей літаків та 2 моделі вертольотів. У 1918 р. він емігрував до США, де в 1923 р. заснував компанію Sikorsky Aircraft. 14 вересня 1939 р. у США Ігор Сікорський підняв у повітря власний перший гелікоптер VS-300, придатний для практичних польотів.



23 березня 1908 р. на Богуславщині в Київській обл. народився Архип Михайлович Люлька (1908–1984), академік, конструктор авіаційних двигунів. У 1931 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Працюючи в Харківському авіаційному Інституті, розробив конструкцію першого в світі двоконтурного турбореактивного двигуна (1939 – 1941 рр.). Був піонером розробки турбореактивних двигунів для надзвукової авіації, зробивши перші кроки у цьому напрямі ще в далекі 1930-і роки. Під його керівництвом створено спеціальне КБ, нині НВО «Сатурн», яке носить його ім'я. Його двигуни типу АЛ різних модифікацій встановлені на багатьох літаках, розроблених в КБ Сухого, Іллюшина та інших.