

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.)

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;

В.М. Учанін (заст. гол. ред.)

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

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

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар)

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.Л. Казакевич

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

О.М. Карпаш, П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

Й. Мірчев

Інститут механіки, Софія, Болгарія

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

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

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

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХПІ», м. Харків;

М.Г. Чаусов

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко, Міжнародна

Асоціація «Зварювання», м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/dnkn

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

МОН України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2024

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія/електронна версія: 1200 грн.

за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів

видавець журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

СОЛОМАХА Р.М., РИБАЧУК В.Г., УЧАНІН В.М.

Розподіл ефективної коерцитивної сили складених зразків при її вимірюванні приставними магнітними перетворювачами 3

МІЛЕНІН О.С., ГЛУХОВСЬКИЙ В.Ю., ВЕЛИКОІВАНЕНКО О.А.,

ЛИТВІНЕНКО В.А. Чисельно-інструментальний метод термографічного контролю стану великогабаритних конструкцій та споруд 10

ЛОБАНОВ Л.М., СТЕЛЬМАХ Д.І., САВИЦЬКИЙ В.В.,

ДЯДІН В.П., ШУТКЕВИЧ О.П., КОЗАЧЕК А.Г. Дистанційна оцінка пошкоджень Київської телевежі на основі застосування аерофотозіомки та методу фотограмметрії..... 16

ЮРЖЕНКО М.В., КОВАЛЬЧУК М.О., КОНДРАТЕНКО В.Ю.,

ДЕМЧЕНКО В.Л., ГУСАКОВА К.Г., ВЕРБОВСЬКИЙ В.С., ЖУК Г.В., КОСТОГРИЗ К.П., ГОЦИК І.А. Вплив газових сумішей водню з метаном на фізичну та хімічну структуру поліетиленових труб з ПЕ-80 21

НЕДОСЄКА С.А., НЕДОСЄКА А.Я., ЯРЕМЕНКО М.А.,

ОВСІЄНКО М.А., ГУР'ЯНОВ О.М. Використання методу акустичної емісії для оцінки змін властивостей сталі 17Г1С після тривалої експлуатації..... 26

QUINTANA M.J., JI Y., COLLINS P.C. Затребуваність і

перспективи поєднання матеріалознавства та неруйнівної оцінки матеріалів для адитивного виробництва металопродукції... 31

ІНФОРМАЦІЯ

13-а Європейська конференція з неруйнівного контролю..... 46

Державний політехнічний музей імені Бориса Патона 49

Міжнародний промисловий форум 52

Пам'яті В.В. Панасюка 54

Новини Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики 55

Видання журналу підтримують:

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

EDITORIAL BOARD

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

V.O. Troitskyi (Deputy Editor-in-Chief)

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

V.M. Uchanin (Deputy Editor-in-Chief),

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv;

Ie.O. Davydov, O.S. Milenin, 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 NTU of Oil and Gas, Ukraine;

Yordan Mirchev

Institute of Mechanics, Sofia, Bulgaria

L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk, V.R. Skalskyi,

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv;

V.S. Eremenko, Yu.V. Kuts, A.G. Protasov

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine;

Adriana Savin

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

V.O. Storozhenko

Kharkiv NU of Radio Electronics, Ukraine;

H.M. Suchkov

NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;

M.G. Chausov

NU of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv.

Executive Director – O.T. Zelnichenko, International

Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,

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

International Association «Welding» (Publisher)

Address

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

03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.

Tel./fax: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved

by the Ministry of Education and Science of Ukraine

for the publication of works of applicants for academic

degrees in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration

of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2024

Subscription index 74475.

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

\$128, subscriptions for the printed (hard copy) version,

air postage and packaging included.

\$104, subscriptions for the electronic version.

Publisher is not responsible for the content of the

promotional material.

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

SOLOMAKHA R.M., RYBACHUK V.G., UCHANIN V.M.

Distribution of effective coercive force of composite samples

at its measurement by attachable magnetic transducers..... 3

MILENIN O.S., GLUKHOVSKIY V.Yu., VELYKOIVANENKO O.A.,

LYTVYVENKO V.A. Numerical-instrumental method of ther-

mographic control of the state of large-sized structures and

constructions 10

LOBANOV L.M., STELMAKH D.I., SAVYTSKYI V.V.,

DIADIN V.P., SHUTKEVYCH O.P., KOZACHEK A.G. Remote

assessment of damage to Kyiv TV tower based on the appli-

cation of aerial photography and photogrammetry method..... 16

IURZHENKO M.V., KOVALCHUK M.O., KONDRATENKO V.Yu.,

DEMCHENKO V.L., GUSAKOVA K.H., VERBOVSKIY V.S.,

ZHUK G.V., KOSTOHRYZ K.P., GOTSYK I.A. Influence of

gas mixtures of hydrogen with methane on the physical and

chemical structure of polyethylene pipes from PE-8..... 21

NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A.Ya., YAREMENKO M.A.,

OVSIIENKO M.A., HURIANOV O.M. Application of acoustic

emission method to evaluate the changes in the properties of

17G1S steel after long-term service 26

QUINTANA M.J., JI Y., COLLINS P.C. A perspective of the

needs and opportunities for coupling materials science and

nondestructive evaluation for metals-based additive manu-

facturing information 31

INFORMATION

13th European Conference on Non-Destructive Testing 46

Boris Paton State Polytechnic Museum..... 49

International Industrial Forum 2023 52

In memory of V.V. Panasiuk 54

News of the Ukrainian society for non-destructive testing 55

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,

Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78,

Association «OKO», LLC «Diagnostic devices»

РОЗПОДІЛ ЕФЕКТИВНОЇ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ СКЛАДЕНИХ ЗРАЗКІВ ПРИ ЇЇ ВИМІРЮВАННІ ПРИСТАВНИМИ МАГНІТНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Р.М. Соломаха^{1,2}, В.Г. Рибачук¹, В.М. Учанін¹

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

²НВФ «Спеціальні наукові розробки». 61121, м. Харків, вул. Світла, 10. E-mail: rsolomak@gmail.com

У статті представлено результати дослідження розподілу ефективної коерцитивної сили (КС) складених феромагнітних стандартних зразків, які складаються з двох однорідних зразків з різними значеннями КС, зістикованих один з одним. Для вимірювання ефективної КС у замкнутому магнітному колі використано два типи приставних П-подібних магнітних перетворювачів (МП), які підключали до магнітного аналізатора типу МА-5. Для вимірювання у розімкнутому магнітному колі використано МП типу приставного соленоїда, який працює за методом точкового полюса (МТП). Цей МП підключали до коерцитиметра-структуроскопа типу ІКС-104. Показано, що для всіх типів МП ефективна КС складених зразків (СЗ) залежить від їх положення відносно стику. З переміщенням МП відносно стику від однорідного зразка з меншою КС до однорідного зразка з більшою КС ефективна КС збільшується в діапазоні між значеннями КС цих зразків. Кількісно характер розподілу ефективної КС СЗ залежить від типу МП, його розмірів і способу їх орієнтації відносно стику для МП неосесиметричної конструкції. За паралельної орієнтації полюсів П-подібного МП відносно стику характер змін ефективної КС є плавнішим. Наявність зазору між частинами СЗ викликає зменшення ефективної КС та нестабільність її значень в області стику. Для МП одного типу зменшення їх розміру призводить до зменшення діапазону змін ефективної КС. Для МП близьких розмірів діапазон зміни ефективної КС СЗ, який вимірюється в розімкненому магнітному колі, є помітно більшим порівняно з вимірюваною у замкнутому магнітному контурі колі. Показано принципову можливість використання СЗ для метрологічного забезпечення магнітних структуроскопів, а також для моделювання двовимірної розподілу КС феромагнітних конструкцій, які характеризуються поверхневою неоднорідністю магнітних параметрів. Бібліогр.18, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: неруйнівний контроль, магнітна структуроскопія, коерцитивна сила, коерцитиметр, стандартний зразок, П-подібний магнітний перетворювач, приставний соленоїд

Вступ. Неруйнівні методи магнітної структуроскопії знаходять все ширше застосування для визначення структурно-чутливих магнітних і механічних характеристик феромагнітних сталей у металургії та машинобудуванні [1–7]. Не менш важливим є застосування цих методів для моніторингу технічного стану відповідальних сталевих конструкцій під час їх експлуатації. Сучасні методи магнітної структуроскопії феромагнітних матеріалів базуються на вимірюванні параметрів петлі магнітного гістерезису (ПМГ) під час циклічного перемагнічування [6, 8]. У якості структурочутливого параметра найчастіше використовують коерцитивну силу (КС) H_c , яка корелює з багатьма механічними параметрами матеріалу [1–3, 5, 7]. За допомогою вимірювання КС можна проводити контроль феромагнітних матеріалів з метою визначення механічних характеристик (твердість, границя міцності, границя текучості, ударна в'язкість, модуль пружності), структурних параметрів (розмір зерна, розмір включень, пористість), хімічний склад (зокрема, вміст легуючих елементів), якості термічної або хіміко-термічної обробки (глибина загартованого чи цементованого

шару, фазовий склад). Крім того, КС H_c корелює з параметрами напружено-деформованого стану, втомними структурними змінами, що дозволяє оцінювати пошкоджуваність, технічний стан і залишковий ресурс конструкцій [9, 10]. Це дозволяє проводити моніторинг відповідальних конструкцій під час їх експлуатації. Для магнітного контролю все частіше знаходять застосування й інші структурно-чутливі параметри ПМГ, у тому числі, залишкова індукція B_r , магнітна проникність μ , магнітна індукція насичення B_s та площа петлі гістерезису, яка характеризує втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування [6, 11, 12].

Стан проблеми. Магнітну структуроскопію можна проводити у відкритому (розімкненому) або замкнутому магнітних колах [2]. Магнітні структуроскопи вимірюють інтегральне значення КС тієї локальної частини об'єкта контролю (ОК), через яку замикається магнітний потік намагнічування. Для габаритних ОК для намагнічування локальної зони найчастіше використовують приставні П-подібні магнітні перетворювачі (МП) (рис. 1) [3–6, 13].

Рибачук В.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-4842-020X>, Учанін В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>
© Р.М. Соломаха, В.Г. Рибачук, В.М. Учанін, 2023

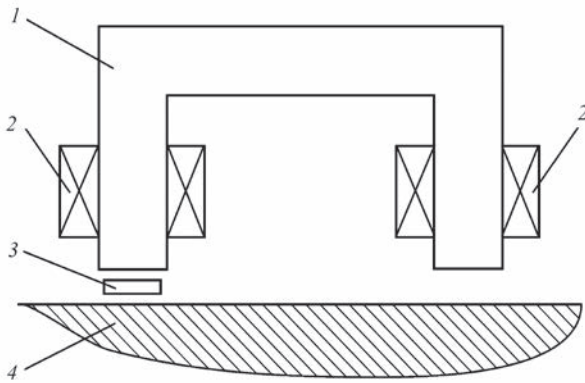


Рис. 1. Конструкція приставного П-подібного МП: 1 – П-подібне осердя; 2 – обмотки намагнічування; 3 – давач Холла для визначення магнітного потоку; 4 – ОК

Для визначення КС також використовують приставні МП, працюючі за методом точкового полюсу (МТП), який полягає у вимірювання залишкового магнітного поля деталей після короткочасного контакту одного з полюсів елемента намагнічування з поверхнею ОК [14, 15]. Принцип роботи за МТП з постійним магнітом в якості джерела поля намагнічування ілюструє МП, який подано як приклад на рис. 2. Цей МП запропонував Ф. Ферстер ще у 50-х роках минулого сторіччя [16]. У подальших розробках для побудови МП в якості елементів намагнічування найчастіше використовують приставні соленоїди. Загальним у МП, які працюють за МТП, є розташування елемента намагнічування перпендикулярно до поверхні ОК. Метод можна використовувати для

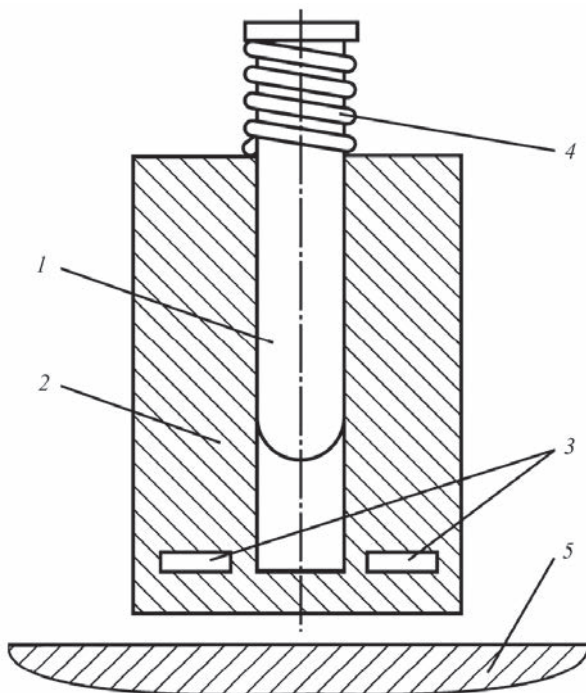


Рис. 2. Конструкція приставного МП з постійним магнітом Ф. Ферстера, який працює за МТП: 1 – постійний магніт; 2 – корпус; 3 – ферозонд-градієнтметр; 4 – пружина; 5 – ОК

контролю деталей з великим коефіцієнтом розмагнічування N , залишкове магнітне поле яких після попереднього намагнічування до стану технічного насичення пропорційне КС H_c .

Для метрологічного забезпечення магнітних аналізаторів і коерцитиметрів з приставними МП використовують стандартні зразки або міри відповідного магнітного параметра з плоскою поверхнею і заданими геометричними розмірами. Магнітні характеристики стандартних зразків зазвичай визначають за допомогою балістичних установок, у яких ці зразки складають частину замкнутого магнітного кола [17]. Метрологічне оцінювання таких стандартних зразків потребує вартісного обладнання та відповідно акредитованої лабораторії. Крім того, не завжди є можливість підібрати стабільні феромагнітні сплави із заданими параметрами ПМГ. Це спонукає до розробки простіших робочих стандартних зразків для магнітних аналізаторів з приставними МП. Один з можливих підходів пов'язаний зі створенням складених стандартних зразків, які утворюються за рахунок об'єднання в єдиній конструкції частин з різними магнітними характеристиками. Зокрема, нами раніше запропоновано стандартний зразок, який складається з клиноподібних частин (Рибачук В.Г., Учанин В.М. та ін. Стандартний зразок для настроювання та метрологічної атестації структуроскопів. України пат. 51834, 2010, Бюл. № 15). Недоліком такого стандартного зразка є необхідність прецизійного фрезування клиноподібних частин для їх точнішого прилягання без зазорів, що виявилось непростюю задачею. Аналізувалась також можливість створення шаруватих зразків КС [18]. У даній роботі для аналізу неоднорідних ОК запропоновано використати концепцію ефективного середовища, яка дозволяє для таких неоднорідних об'єктів ввести поняття ефективною КС.

У цій роботі досліджується розподіл ефективною КС складених зразків (СЗ) з метою аналізу можливості створення багатозначного СЗ у вигляді стику двох пластин із різними магнітними характеристиками.

Методика дослідження. Для досліджень використано два зразки, складені з двох однорідних зразків КР-1 (№6331) і КР-2 (№6332) з номінальними значеннями КС відповідно $H_c^{КР-1} = 370$ і $H_c^{КР-2} = 3550$ А/м. Розміри зразків КР-1 і КР-2 – $58 \times 35 \times 8$ мм. Для утворення СЗ № 1 КР-1 і КР-2 стикували між собою їх короткими (35 мм) сторонами, а для утворення СЗ № 2 – довгими (58 мм).

Для вимірювання ефективною КС цих СЗ у замкнутому магнітному колі використовували два приставні П-подібні МП, умовно позначені як 1 і 2 (рис. 3), які мали однакову конструктивну схему

(рис. 1) і відрізнялися тільки за розмірами. Їх геометричні параметри наведено у таблиці. У якості вимірювального засобу, до якого підключали ці перетворювачі, використовували магнітний аналізатор (МА) типу МА-5 (рис. 4, а). Він являє собою програмно-апаратний комплекс для вимірювання параметрів ПМГ зразків і виробів із феромагнітних матеріалів. Для проведення вимірювань МА підключали до персонального комп'ютера (ПК), на якому попередньо було встановлено та запущено спеціальну програму. За її допомогою здійснювали керування процесом вимірювань. Результати вимірювань відображалися у вікні програми у графічній формі (основна крива намагнічування, петля гістерезису і залежність магнітної проник-

ності від напруженості магнітного поля) та у вигляді чисельних результатів. Для подальшого аналізу їх зберігали у пам'яті ПК у вигляді текстового або графічного файлів. Наявна версія керуючої програми передбачає можливість вимірювання КС тільки за допомогою П-подібного МП 1. Тому при підключенні до цього приладу П-подібного МП 2 отримували чисельні значення параметрів ПМГ не відповідають їх дійсним значенням, а є відносною кількісною оцінкою в умовних одиницях.

З метою узагальнення проводили також вимірювання ефективної КС зразків № 1 і № 2 у розімкненому магнітному колі за МТП. Для цього використовували МП у вигляді приставного соленоїда з зовнішнім діаметром 35 мм (рис. 3, поз. 3), який підключали до коерцитиметра-структуроскопа ИКС-104 (рис. 4, б). Цей прилад є спеціалізованим засобом вимірювання КС магнітом'яких феромагнітних матеріалів. Оскільки його конструкція не передбачає регулювання чутливості користувачем, то результати вимірювань КС, отримані за його допомогою, виражені не у А/м, а в умовних одиницях.

Зміст досліджень полягав в отриманні розподілу ефективної КС H_c^{ef} СЗ №1 і №2 залежно від

Геометричні параметри П-подібних МП 1, 2

Назва параметра	Значення параметра, мм	
	МП 1	МП 2
Ширина полюсів П-подібного осердя, <i>a</i>	16	11
Довжина полюсів П-подібного осердя, <i>b</i>	32	20
Відстань між внутрішніми краями полюсів, <i>c</i>	32	20
Відстань між зовнішніми краями полюсів, <i>d</i>	64	42



Рис. 3. Приставні МП для локального вимірювання КС: 1 і 2 – П-подібні відповідно 1 і 2 для роботи з МА; 3 – МП приладу типу ИКС-104, який працює за МТП

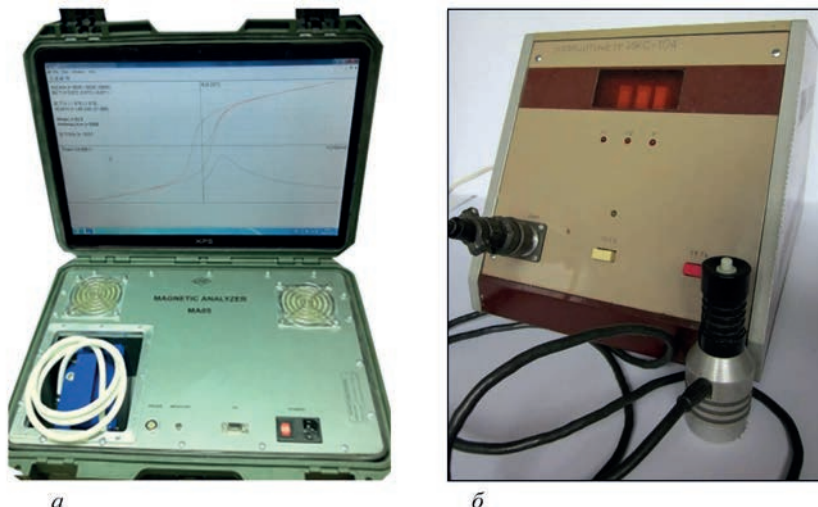


Рис. 4. Засоби вимірювання КС: а – магнітний аналізатор МА-5; б – коерцитиметр-структуроскоп ИКС-104

зміщення l між центром міжполюсного простору (надалі просто центром) П-подібних МП (рис. 5, а, б, точка O) або центром соленоїдального МП та стиком однорідних зразків КР-1 і КР-2. За початок відліку було прийнято лінію стику. Зміщення в сторону зразка КР-1 позначали знаком «-», а в сторону зразка КР-2 – «+». Схеми розміщення полюсів П-подібних МП на поверхні досліджуваних складених СЗ під час вимірювання їх ефективної КС наведено на рис. 5. Принципова відмінність між цими двома варіантами складених СЗ полягає у тому, що у випадку СЗ № 1 полюса П-подібного МП перетинають лінію стику по черговому, а у випадку СЗ № 2 – одночасно. Для МП типу приставного соленоїда (на рис. 5 не показано) внаслідок осесиметричності його конструкції обидва варіанти є ідентичними.

На результати вимірювання ефективної КС СЗ може впливати щільність прилягання однорідних зразків КР-1 і КР-2 один до одного. Тому для дослідження цього впливу між ними вводили штучний немагнітний зазор у вигляді діелектричних

прокладок різної товщини h (рис. 5, а) і досліджували ступінь впливу їх товщини h на розподіл H_c^{ef} .

За результатами проведених вимірювань ефективної КС СЗ № 1 і № 2 отримано залежності їх ефективної КС H_c^{ef} від зміщення l центру МП відносно стику, які характеризують розподіл ефективної КС досліджених СЗ.

Аналіз результатів. Характер залежностей $H_c^{ef} = f(l) \Big|_{h=const}$ для СЗ № 1, отриманих із використанням П-подібних МП 1 і 2, свідчить про суттєвий вплив зміщення центру МП відносно стику на отриману ефективну КС (рис. 6, а, б). Для МП 1 повний діапазон зміни H_c^{ef} знаходиться в межах значень зміщення l від -20 до $+30$ мм. У ньому можна виділити п'ять чітко виражених ділянок залежно від змін H_c^{ef} при переміщенні МП. Для першої ($l = -20 \dots -10$ мм) і п'ятої ($l = +10 \dots +30$ мм) характерними є незначні зміни ефективної КС. Другій ($l = -10 \dots -5$ мм) і четвертій ($l = +2 \dots +10$ мм) відповідають помірні зміни H_c^{ef} .

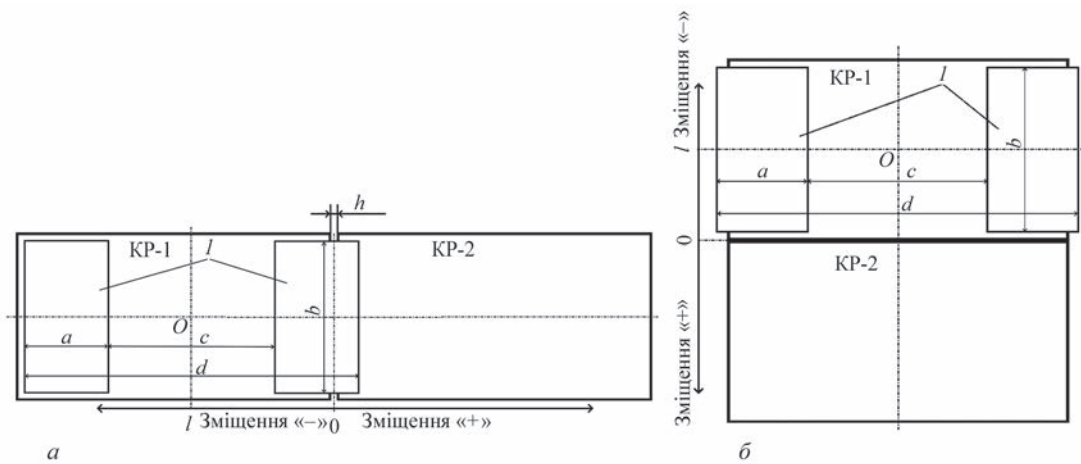


Рис. 5. Схеми вимірювання ефективної КС складених СЗ № 1 (а) та № 2 (б) з П-подібними МП 1 і 2; O – центр П-подібних МП; a, b, c і d – геометричні параметри полюсів П-подібних МП; h – товщина зазору між однорідними СЗ КР-1 і КР-2; l – зміщення МП відносно стику

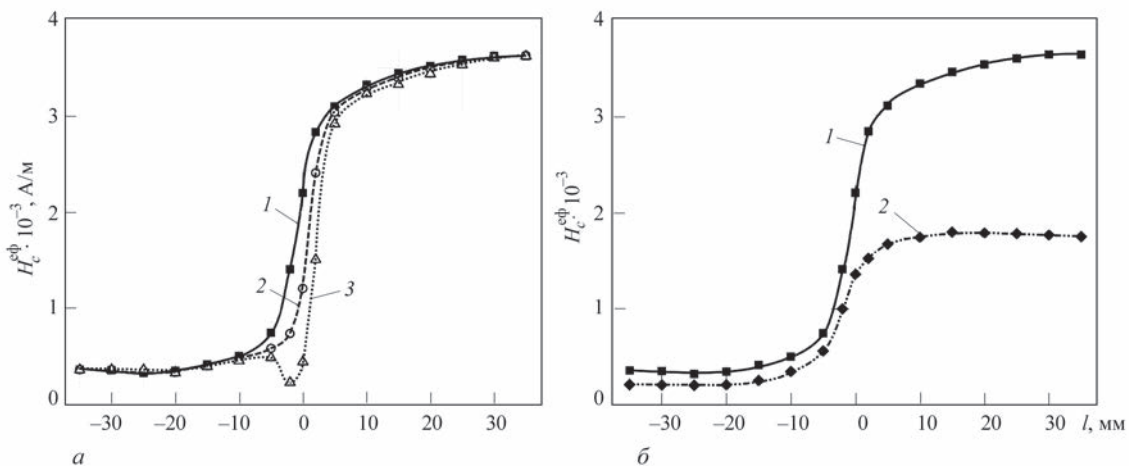


Рис. 6. Залежності ефективної КС СЗ №1 від положення П-подібних МП відносно стику: а – МП 1 за різних значень зазору між зразками КР-1 і КР-2 ($l - h = 0, 2 - h = 0,1$ мм, $3 - h = 0,3$ мм); б – МП 1 і МП 2 за відсутності зазору (l – МП 1 в А/м, 2 – МП 2 в ум. од.)

І нарешті третя ділянка ($l = -5...+2$ мм) відповідає суттєвим змінам H_c^{ef} .

Незначний немагнітний зазор ($h = 0,1$ мм) між зразками КР-1 і КР-2, які утворюють СЗ № 1, якісно не змінює характер розподілу ефективної КС, але призводить до істотних кількісних змін ефективної КС в області стику ($l = -10...+5$ мм) (рис. 6, а, крива 2). Збільшення зазору до значення $h = 0,3$ мм викликає не тільки подальше зменшення H_c^{ef} , але також призводить до спотворення залежності $H_c^{ef} = f(l)|_{h=const}$, що проявляється у різкому зменшенні її значень в області стику з боку зразка КР-1 (рис. 6, а, крива 3). При цьому діапазон зміщень, у якому спостерігаються вказані зміни ефективної КС, збільшується в сторону зразка КР-2 до значень $l = -10...+25$ мм. Тобто немагнітний прошарок між однорідними зразками, з яких складається СЗ, викликає зменшення ефективної КС та нестабільність її значень поблизу стику. Для уникнення цього контактні поверхні однорідних зразків повинні бути абсолютно плоскими, відполірованими і ретельно припасованими одна до одної. Тому далі аналізуються тільки залежності ефективної КС від зміщення, отримані для стику без зазору ($h = 0$).

Аналогічну залежність $H_c^{ef} = f(l)$ отримано також для П-подібного МП 2 (рис. 6, б, крива 2), який відрізняється від МП 1 тільки меншими у $\approx 1,5$ рази розмірами (див. таблицю). Видно, що діапазон зміни ефективної КС для цього МП знаходиться в межах значень зміщення $l = -20...+10$ мм. Її порівняння з розглянутою вище аналогічною залежністю для МП 1 (рис. 6, б, крива 1) показує, що зменшення розмірів МП викликає зменшення діапазону змін ефективної КС. Причому це зменшення відбувається за рахунок ділянки, яка відповідає однорідному зразку КР-2 з більшим значенням КС. Це пояснюється більшою локалізацією зони вимірювань у МП меншого розміру, а також істотно більшим внеском висококоерцитивного зразка КР-2 у формування ефективної КС складеного СЗ порівняно з низькокоерцитивним зразком КР-1. Слід відмітити, що для кривих 1 (МП 1) і 2 (МП 2) на рис. 6, б характерною є велика ступінь симетрії відносно лінії стику. Точка симетрії відповідає значенню $l \approx -1$ мм, тобто зміщена в напрямку однорідного зразка КР-1 з меншим значенням КС.

Ефективна КС СЗ також залежить від способу перетинання лінії стику полюсами П-подібних МП. Порівняння залежностей $H_c^{ef} = f(l)$ для кожного з цих випадків (рис. 7), отриманих за допомогою П-подібного МП № 1 для СЗ № 1 (крива 1) і № 2 (крива 2), показує, що у випадку одночасного перетинання лінії стику полюсами МП (СЗ № 2) швидкість зростання H_c^{ef} є знач-

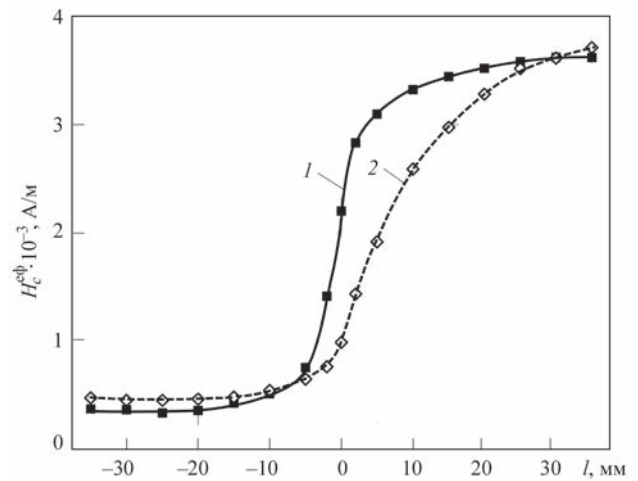


Рис. 7. Залежності ефективної КС СЗ № 1 (1) і № 2 (2) від положення П-подібного МП 1 відносно стику

но меншою. Збільшення ефективної КС відбуваються зі значно меншим градієнтом, але сама крива залежності $H_c^{ef} = f(l)$ набуває вираженої асиметрії відносно лінії стику. Діапазон змін H_c^{ef} СЗ № 2 знаходиться в межах $-10...+35$ мм і є значно зсунутим у бік однорідного зразка КР-2 з більшим значенням КС (рис. 7, крива 2). Плавніший характер залежності $H_c^{ef} = f(l)$ у СЗ № 2 порівняно з СЗ № 1 дозволяє точніше виставити П-подібний МП на задане значення КС. Тому він є придатнішим для використання для настроювання коерцитиметрів.

Розглянуті залежності $H_c^{ef} = f(l)$ відображають результати вимірювання ефективної КС у замкненому магнітному колі за допомогою приставних П-подібних МП. Для порівняння на рис. 8 показано графік аналогічної залежності для випадку вимірювань ефективної КС СЗ № 1 у розімкненому магнітному колі з використанням МП типу приставного соленоїда діаметром 35 мм, який працює за МТП. У даному випадку l є зміщенням центру МП відносно стику.

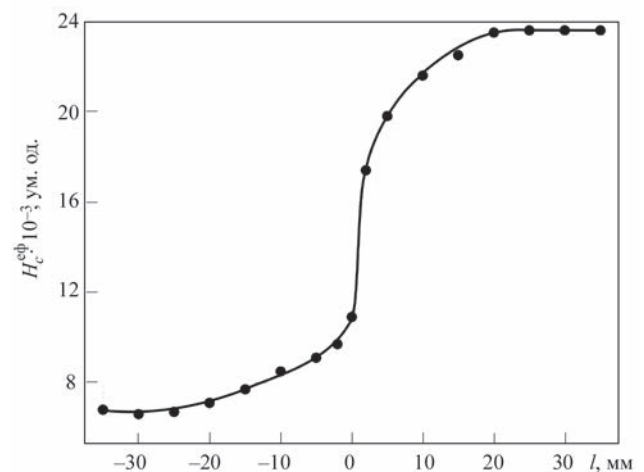


Рис. 8. Залежність ефективної КС СЗ № 1 від положення МП типу приставного соленоїда відносно стику

Характер наведеної залежності (рис. 8) якісно є подібним до графіків залежностей $H_c^{ef} = f(l)$ для СЗ № 1 (почергове перетинання полюсами лінії стику), отриманих за допомогою П-подібних МП (рис. 6 та рис. 7, крива 1). Відмінність полягає тільки у тому, що точка симетрії ($l \approx +1$ мм) трохи зсунута в протилежний бік, тобто в сторону однорідного зразка КР-2 з більшим значенням КС. Діапазон змін ефективної КС знаходиться в межах $-20...+20$ мм. У ньому можна виділити дві крайні ділянки ($l = -20...-2$ мм та $l = +5...+20$ мм), для яких характерною є помірна швидкість зміни H_c^{ef} , та центральну ділянку в околі стику ($l = -2...+5$ мм) з великою швидкістю зміни ефективної КС. Як бачимо, хоча за розмірами даний МП типу приставного соленоїда є найменшим порівняно з розглянутими раніше П-подібними МП 1 і 2, абсолютне значення діапазону змін ефективної КС, виміряної за його допомогою (40 мм), знаходиться посеред абсолютних значень аналогічних діапазонів змін H_c^{ef} для П-подібних МП 1 (50 мм) і 2 (30 мм). Це пояснюється тим, що внаслідок розімкненого характеру магнітного кола ОК – МП розміри області, яку займають створювані ним поля намагнічування та розмагнічування, є помітно більшими за розміри самого МП.

Отримані результати щодо розподілу ефективної КС досліджених СЗ показує принципову можливість їх використання в якості багатозначних зразків для перевірки роботи магнітних аналізаторів та коерцитиметрів з приставними МП різного типу. Крім того, СЗ дозволять моделювати методологічний підхід, пов'язаний з аналізом двовимірних зображень неоднорідного розподілу КС ферромагнітних конструкцій з великою площею поверхні [3].

Висновки

Досліджено розподіл ефективної КС СЗ у вигляді двох зістикованих однорідних зразків з суттєво різною КС приставними П-подібними МП різного розміру і приставним МП соленоїдального типу, який працює за МТП. Показано, що ефективна КС суттєво залежить від положення центру МП відносно стику СЗ. Якісний характер цього розподілу є однаковим для всіх досліджених МП. По мірі переміщення МП відносно стику від однорідного зразка з меншою КС до однорідного зразка з більшою КС ефективна КС збільшується в діапазоні між значеннями КС вказаних зразків. Кількісно характер розподілу ефективної КС СЗ залежить від типу МП коерцитиметра та його розмірів. Для приставних П-подібних МП розподіл ефективної КС залежить також від їх орієнтації відносно стику. За паралельної орієнтації полюсів П-подібного МП відносно стику характер зміни ефективної КС

є плавнішим. Стик не призводить до додаткових змін ефективної КС у цій зоні у випадку щільно стикованих пластин, а тому його впливом можна знехтувати. Наявність зазору між складовими частинами СЗ викликає зменшення ефективної КС і нестабільність її значень в області стику.

Для МП одного типу зменшення їх розмірів призводить до зменшення діапазону змін ефективної КС. На розміри області змін ефективної КС СЗ також впливає характер магнітного кола, у якому відбуваються вимірювання КС. Для розімкненого магнітного кола ці розміри є помітно більшими. Так, для приставного соленоїда діаметром 35 мм, який є найменшим за розмірами, ця зона складає 40 мм, що суттєво більше ніж у П-подібного МП 2 (30 мм) і менше ніж у П-подібного МП 1 (50 мм).

Отримані результати свідчать про принципову можливість використання СЗ для моделювання результатів контролю ферромагнітних конструкцій, який базується на аналізі двовимірного розподілу КС, та для метрологічного забезпечення приладів магнітної структуроскопії.

Список літератури/References

1. Kwun, H, Burkhart, G.L. (1987) Effects of grain size, hardness, and stress on the magnetic hysteresis loops of ferromagnetic steels. *Journal of Applied Physics*, 61(4), 1576–1579. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.338093>
2. Остап О.П., Федірко В.М., Учанін В.М. та ін. (2007) *Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій*. В «Механіка руйнування і міцність матеріалів». Т.9. Панасюк В.В. ред.). Львів, Сполом.
3. Ostash, O.P., Fedirko, V.M., Uchanin, V.M. et al. (2007) *Strength and service life of aircraft materials and structure elements*. In: *Fracture Mechanics and Strength of Materials*. Vol. 9, Ed. By V.V. Panasyuk. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
4. Безлюдько Г.Я. (2003) Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коерцитиметрическим) методом. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 20–26.
5. Bezlyudko, G.Ya. (2003) Operational control of the fatigue condition and residual life of metal structures by nondestructive (coercimetric) method. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 20–26 [in Russian].
6. Bezlyudko, G., Popov, B., Solomakha, R. (2014) The metal fatigue operational monitoring using a non-destructive method of coercive force. practical and philosophical aspects. *In Proc. 11th European Conf. on Nondestructive Testing (EC-NDT 2014), Prague, Czech Republic, 6-10 October, 2014*. Available from: https://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/289_Solomakha.pdf
7. Bida, G.V., Nichipuruk, A.P. (2000) Coercive force measurements in nondestructive testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 36(10), 707–727. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02759255>
8. Uchanin, V., Ostash, O., Nardoni, G., Solomakha, R. (2020) *Coercive force measurements for structural health monitoring*. In *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*, ed. Richard M. Wilcox, Nova Science Publishers, New York, Ch. 5, pp. 163–192.
9. Uchanin, V., Ostash, O. (2019) Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment. *Procedia Structural Integrity*, 16, 192–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.040>
10. Liu, J., Wilson, J., Davis, C.L., Peyton, A. (2019) Magnetic characterisation of grain size and precipitate distribution by major and minor BH loop measurements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 481, 55–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.02.088>

9. Chulkina, A.A., Ul'yanov, A.I. (2009) Effect of the magnetic properties of cementite on the coercive force of high-carbon steels after quenching and tempering. *Physics of Metals and Metallography*, 108(6), 548–555. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0031918x09120059>
10. Ostash, O.P., Vol'demarov, O.V., Hladysh, P.V. (2014) Diagnostics of the structural-mechanical state of steels of steam pipelines by the coercimetric method and prediction of their service life. *Materials Science*, 49(5), 667–680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9661-3>
11. Morishita, K., Gilanyi, A., Sukegawa, T. et al. (1998) Magnetic non-destructive evaluation of accumulated fatigue damage in ferromagnetic steels for nuclear plant component. *Journal of Nuclear Materials*, 258–263 (Part 2), 1946–1952. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0022-3115\(98\)00150-0](https://doi.org/10.1016/s0022-3115(98)00150-0)
12. Govindaraju, M.R., Kaminski, D.A., Devine, M.K. et al. (1997) Nondestructive evaluation of creep damage in power-plant steam generators and piping by magnetic measurements. *NDT&E International*, 30(1), 11–17. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0963-8695\(96\)00042-4](https://doi.org/10.1016/s0963-8695(96)00042-4)
13. Kikuchi, H., Ara, K., Kamada, Y., Kobayashi, S. (2009) Effect of microstructure changes on Barkhausen noise properties and hysteresis loop in cold rolled low carbon steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(6), 2744–2747. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.2009.2020545>
14. Самойлович Г.С. (1976) *Не разрушающий контроль металлов и изделий: Справочник*. Москва, Машиностроение.
15. Sandomirskii, S.G. (2006) Application of pole magnetization in magnetic structural analysis (Review). *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 42(9), 586–609. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106183090609004X>
16. Forster, F., Zizelman, G. (1954) Die schnelle zerstörungsfreie Bestimmung der Blechanisotropie mit dem Restpunktpolverfahren. *Zeitschrift für Metallkunde*, 45(4), 245–249.
17. Кифер И.И. (1969) *Испытания ферромагнитных материалов*. Москва, Энергия.
18. Kifer, I.I. (1969) *Tests of ferromagnetic materials*. Moscow, Energiya [in Russian].
19. Rybachuk, V.G., Uchanin, V.M. (2023) A recurrent formula for determination of the effective coercive force in layered ferromagnetic materials. *Materials Science*, 58(4), 533–539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00695-1>

DISTRIBUTION OF EFFECTIVE COERCIVE FORCE OF COMPOSITE SAMPLES AT ITS MEASUREMENT BY ATTACHABLE MAGNETIC TRANSDUCERS

R.M. Solomakha^{1,2}, V.G. Rybachuk¹, V.M. Uchanin¹

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

²SPF «Spetsialny naukovy rozrobky». 10 Svitla str., 61121, Kharkiv. E-mail: rsolomak@gmail.com

The paper presents the results of studying the distribution of effective coercive force (CF) in composite ferromagnetic standard samples assembled from two homogeneous samples with different CF values, abutted to each other. Two types of attachable U-shaped magnetic transducers (MT), which were connected to MA-5 type magnetic analyzer, were used for measurement of effective CF in a closed magnetic circuit. Measurements in an open magnetic circuit were performed using MT of attachable solenoid type, operating by the pole point method (PPM). This MT was connected to a coercimeter-structurescope of IKS-104 type. It is shown that for all MT types the effective CF of composite samples (CS) depends on their position relative to the butt. With MT movement relative to the butt from homogeneous sample with smaller CF to homogeneous sample with larger CF the effective CF increases in the range between CF values of these samples. Quantitatively, the nature of distribution of CS effective CF depends on MT type, its dimensions and type of their orientation relative to the butt for MT of non axisymmetric design. With parallel orientation of the poles of U-shaped MT relative to the butt, the nature of the changes in effective CF is smoother. Presence of a gap between CS parts causes a decrease of effective CF and instability of its values in the butt area. For MT of the same type reduction of their size leads to decrease of effective CF range. For MT of similar size the range of the change in CS effective CF, measured in an open magnetic circuit, is noticeably larger, compared to the one measured in a closed magnetic circuit. Shown is the principal possibility of CS application for metrological support of magnetic structurescopes, as well as for modeling the two-dimensional distribution of CF of ferromagnetic structures, which are characterized by surface inhomogeneity of magnetic parameters. 18 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: nondestructive testing, magnetic structurescopy, coercive force, coercimeter, standard sample, U-shaped magnetic transducer, attachable solenoid

Надійшла до редакції 11.06.2023



Асоціація "ОКО"

OKO_{ndt} GROUP
УЛЬТРАЗВУКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ. СЕРІЙНІ ТА ЗА СПЕЦЗАМОВЛЕННЯМ.













(044) 531 37 26 (27)


sales@ndt.com.ua


www.ndt.com.ua


ProNDTSolutions

ЧИСЕЛЬНО-ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ТЕРМОГРАФІЧНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД

О.С. Міленін, В.Ю. Глуховський, О.А. Великоіваненко, В.А. Литвиненко

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

Для підвищення ефективності безконтактного контролю стану важкодоступних ділянок великогабаритних конструкцій та споруд розроблено чисельно-інструментальний підхід термографічного контролю. Він полягає в комплексному застосуванні промислових тепловізійних приладів і розрахункових методів аналізу температурних полів у досліджуваних конструкціях. Це дозволяє покращити точність визначення геометричних особливостей дефектів і зменшити трудомісткість робіт з технічної діагностики стану. Використання розробленого підходу продемонстровано на типових прикладах безконтактного контролю технічного стану промислових димових труб. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: термографічний контроль, технічний стан, дефектоскопія, промислові димові труби, теплоперенесення

Вступ. Діагностика технічного стану великогабаритних конструкцій, будівель і споруд довготривалої експлуатації є обов'язковим етапом експертного аналізу їх стану та основою для планування заходів ремонтно-відновлювальних робіт. Одним із основних аспектів дослідження є виявлення дефектів конструкцій, які можуть впливати на цілісність і функціональність відповідних конструкційних компонентів.

Для аналізу конструкцій певного класу (житлові та нежитлові будівлі, димові труби, резервуари, посудини високого тиску) при виявленні геометричних аномалій різного типу показали свою ефективність методи пасивного термографічного контролю (ТК), які дозволяють проводити діагностику стану будівель у важкодоступних місцях без необхідності використання коштовного обладнання та знизити виробничі ризики для персоналу [1, 2]. Суть цього методу полягає в тому, що різниця температур всередині досліджуваної конструкції та зовні різна, це зумовлює певне прогрівання зовнішньої поверхні. Фактичний розподіл температури поверхні залежить від багатьох факторів, зокрема від термічного опору конструкції, теплопровідності матеріалів, а також від наявності експлуатаційних дефектів, тобто локальних стоншень або порожнин у стінці. Це може бути зафіксовано за допомогою безконтактних методів термографії. Простота та доступність цього підходу зумовила його поширеність для оцінки теплових характеристик будівель, виявлення зон надмірних втрат тепла, витоків повітря, відсутності або пошкодження теплоізоляції, джерел вологи тощо [3, 4]. Безконтактний характер ТК дозволяє широко застосовувати його для аналізу руйнування металевих

матеріалів, а також для виявлення підповерхневих дефектів у полімерах чи композитах [5, 6].

Але одним із принципових недоліків цього методу технічної діагностики є невелика точність кількісної оцінки розмірів виявлених дефектів, особливо вздовж товщини конструкції. Це означає, що в разі виявлення певних аномалій для обґрунтованого експертного висновку про їх припустимість необхідними є додаткові заходи з обстеження відповідного конструкційного елемента, що, певним чином, нівелює переваги ТК. Тому актуальною є розробка наукомістких підходів аналізу результатів вимірювання полів температур з точки зору їх кількісної інтерпретації.

Метою даної роботи є розробка чисельно-інструментального методу ТК стану великогабаритних конструкцій та споруд на основі комплексного застосування тепловізійних приладів і розрахункових підходів аналізу теплових полів.

Методологія дослідження. Інструментальна частина запропонованої методики полягає у термографічному вимірюванні природних (пасивна термографія) чи наведених (активна термографія) полів на поверхні плоских або циліндричних конструкцій. Області поверхневих або підповерхневих дефектів характеризуються локальною зміною температури. При цьому співвідношення температур в області дефекту та в бездефектній частині конструкції залежить, перш за все, від залишкової товщини стінки та типу дефекта. Для визначення типу (поверхнева, підповерхнева) та фактичного розміру несучільності необхідно мати залежності локальної температури на зовнішній поверхні конструкції в області дефекту від теплофізичних властивостей матеріалу та особливостей

Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Глуховський В.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-1969-495X>, Литвиненко В.А. – <https://orcid.org/0000-0003-3680-2198>

© О.С. Міленін, В.Ю. Глуховський, О.А. Великоіваненко, В.А. Литвиненко, 2023

температурного впливу. Такі залежності було отримано на основі чисельного розрахунку температурного поля з урахуванням геометричних та фізичних особливостей стану конструкції. Валідацію математичних моделей та засобів їх комп'ютерної реалізації було проведено на основі відповідних лабораторних досліджень модельних конструкційних елементів.

Так, розрахунок нерівномірного температурного поля базувався на скінченно-різницевому розв'язку нестационарного рівняння теплопровідності [7, 8]:

– у декартовій системі координат (x, y, z) – для опису процесів теплоперенесення в пластинах:

$$\begin{aligned} C\rho(x, y, z, T) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

– у циліндричній системі координат (r, β, z) – для циліндричних конструкцій:

$$\begin{aligned} C\rho(r, \beta, z, T) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z, t)}{\partial t} = \\ = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot \lambda(r, \beta, z) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z, t)}{\partial r} \right] + \\ + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} \left[\lambda(r, \beta, z) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z, t)}{\partial \beta} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(r, \beta, z) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z, t)}{\partial z} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

де T – температура, °C; λ – теплопровідність, Дж/(м·с·°C); $C\rho$ – об'ємна теплоємність, Дж/(м³·°C).

При постановці задачі (1) або (2) було використано граничні умови другого роду відповідно до сумарної дії характерних джерел і стоків тепла. У якості основних дисипативних процесів розглядалися конвективні (відповідно до закону Ньютона-Ріхмана) та випромінювальні (за законом Стефана-Больцмана) механізми. Процес нагрівання з однієї з поверхонь досліджуваного об'єкта описувався відповідним потоком тепла. Чисельний розв'язок рівняння теплопровідності дозволив визначити як стаціонарний розподіл температур, так і кінетику розвитку температурного поля, що було важливим при лабораторній валідації чисельного підходу.

Лабораторні випробування. Розроблений підхід було валідовано шляхом порівняння температурних полів, виміряних за допомогою тепловізора (TESTO 876 з роздільною здатністю 320×240 пікселів) на дослідних зразках з модельними поверхневими дефектами, з результатами чисельних розрахунків. У якості дослідних зразків були використані пластини розмірами 300×200×10 та 260×125×10 мм зі сталі Ст3 кп, теплофізичні властивості матеріалу в залежності від температури наведено в табл. 1. У якості модельних дефектів були розглянуті стоншення завдовжки 160 мм, завширшки 50 мм на глибинах 2 і 6 мм та горизонтальне підповерхнє розшарування (1×61×66 мм на глибині 8 мм) (рис. 1). У рамках лабораторних досліджень було використано метод двосторонньої активної термографії, для чого з одного боку зразки нагрівались інфрачервоним джерелом, потужність якого змінювалась від 1,05 до 0,45 кВт, а з іншого боку проводилося вимірювання температурних полів.

Нагрівання зазначених лабораторних зразків проводилось за різні проміжки часу для забезпечення стаціонарного температурного поля. Так, нагрівання пластини зі стоншеннями (рис. 1, а) відбувалося протягом 905 с, термограми температурних полів на поверхні зразка на різних етапах (5 та 65 с) наведено на рис. 2. Як видно з результатів вимірювань, області дефектів стоншення характеризуються локальним збільшенням температури в порівнянні з периферією від 3 до 22 °C у залежності від глибини дефекту та часу нагрівання. На противагу дефекту стоншення пластини в разі наявності розшарування на поверхні лабораторного зразка спостерігається локальне зниження температури в результаті збільшення термічного опору пластини (рис. 3). Для випадку, що розглядався в рамках лабораторних досліджень (рис. 1, б) та нагрівання протягом 47 с, величина локального зниження температури поверхні складала близько 2 °C. Порівняння експериментально виміряних розподілів температур з результатами розрахунків (рис. 4) показують похибку не більше 15 % як на етапі нагрівання, так і в стаціонарному режимі. Такий рівень точності є достатнім для розв'язання інженерних задач технічної діагностики.

Таблиця 1. Залежність теплофізичних властивостей сталі Ст3 кп від температури [9]

T, °C	Теплопровідність, Вт/(м·°C)	Теплоємність, Дж/(кг·°C)
100	55	482
200	54	498
300	50	514
400	45	533
500	39	555
600	34	584
700	30	626

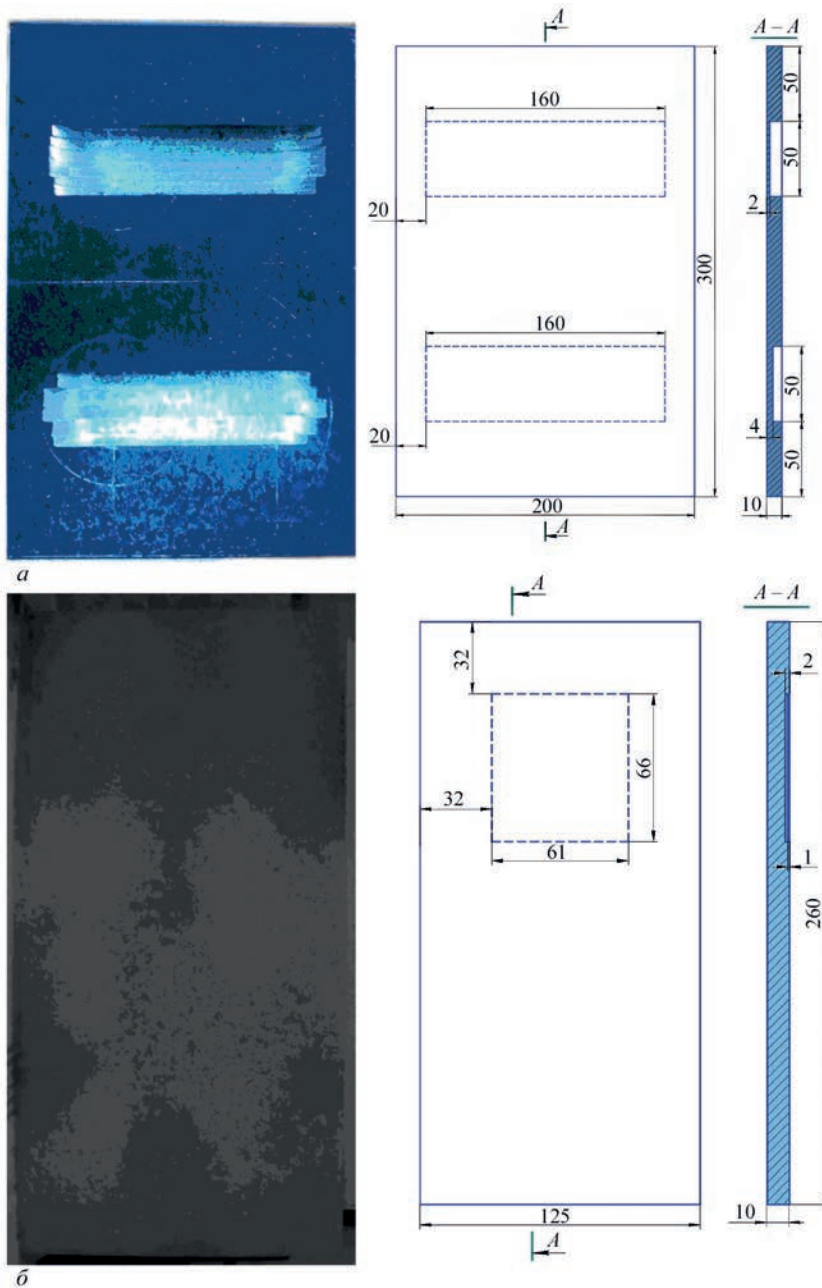


Рис. 1. Зовнішній вигляд і схеми пластин з модельними дефектами, що використані для лабораторних досліджень: *а* – пластина зі стоншеннями; *б* – пластина з розшаруванням

тики та підвищення точності кількісного аналізу відповідних термограм.

Результати та обговорення. Розроблений підхід було використано для підвищення ефективності діагностування технічного стану типових промислових димових труб на прикладі конструкції залізобетонної чотиришарової промислової димової труби для котлоагрегатів ПТВ-100 (висота

120 м, діаметр гирла 4,8 м, товщина стінки контрольованої області труби 0,55 м, при цьому товщина залізобетонного шару – 0,120 м, цегляного притискного шару – 0,120 м, теплоізолюючого шару – 0,05 м та шару цегляної футерівки – 0,120 м). Теплофізичні характеристики матеріалів шарів наведено в табл. 2. На основі результатів чисельного розрахунку було отримано залежності максималь-

Таблиця 2. Теплофізичні властивості матеріалів різних шарів промислової димової труби для котлоагрегатів ПТВ-100 у сухому стані при атмосферному тиску і температурі 20...50 °С [10]

Назва шару	Матеріал	Теплопровідність, Вт/(м °С)	Теплосмність, Дж/(кг °С)
Футерівка	Цегла червона повнотіла	0,74	860
Теплоізоляція	Вата мінеральна	0,041	920
Притискний	Цегла червона повнотіла	0,74	860
Залізобетонний стовбур	Залізобетон	1,70	840

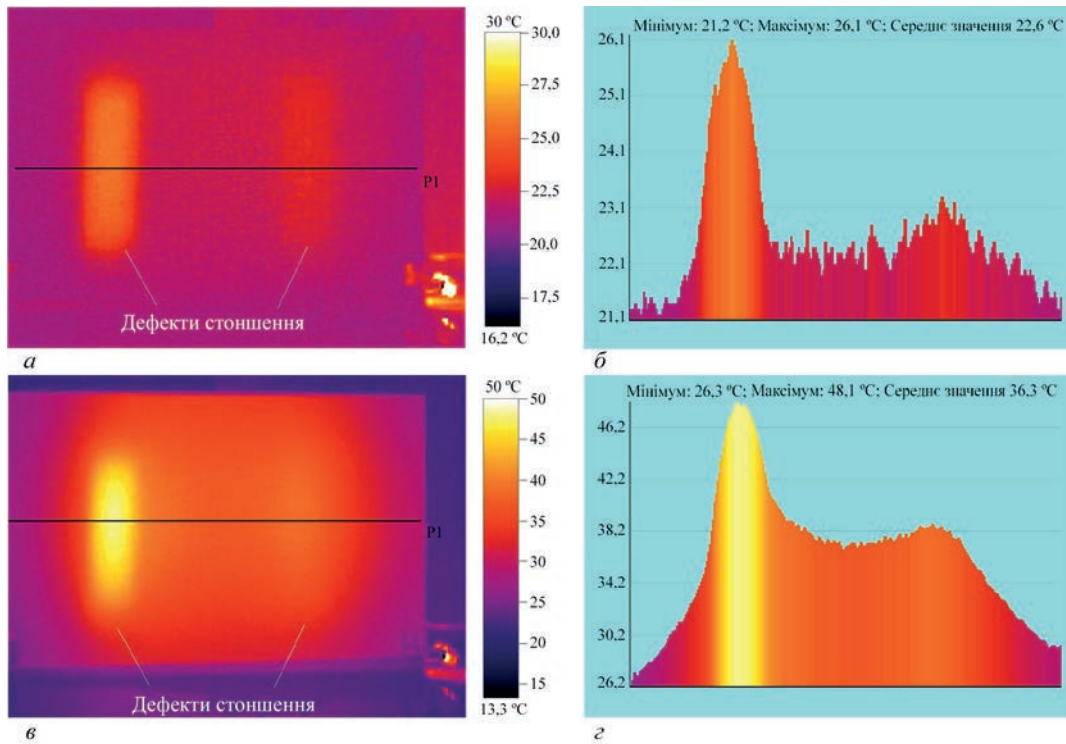


Рис. 2. Термограми температурних полів на поверхні плоского лабораторного зразка з модельними дефектами стоншення (а, в) та температурні розподіли вздовж лінії P1 (б, г) через різні проміжки часу після початку нагрівання: а, б – 5 с ; в, г – 65 с

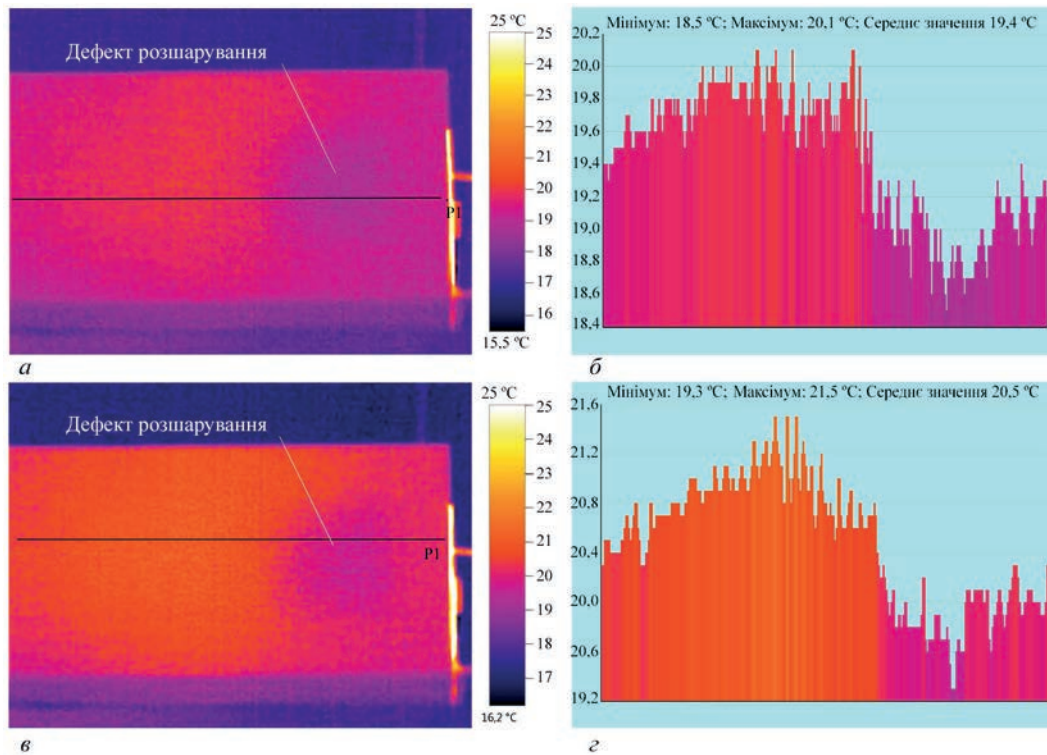


Рис. 3. Термограми температурних полів на поверхні плоского лабораторного зразка з модельним дефектом розшарування (а, в) та температурні розподіли вздовж лінії P1 (б, г) через різні проміжки часу після початку нагрівання: а, б – 18 с ; в, г – 47 с

ної температури в центрі дефекту локального стоншення стінки від його глибини та внутрішньої температури в трубі при різній температурі димових газів в трубі $T_{вн}$ (рис. 5). Як видно з цих даних, при руйнуванні внутрішнього шару цегляної футерівки стрімке зростання температури на зовнішній поверхні димової труби починається лише

при деградації наступного шару, а саме теплової ізоляції, що накладає певні обмеження щодо застосування ТК технічного стану такого роду неоднорідних об'єктів.

Стосовно підповерхневих дефектів розшарування, на рис. 6 наведено розрахункові залежності локальної температури від радіального розміру

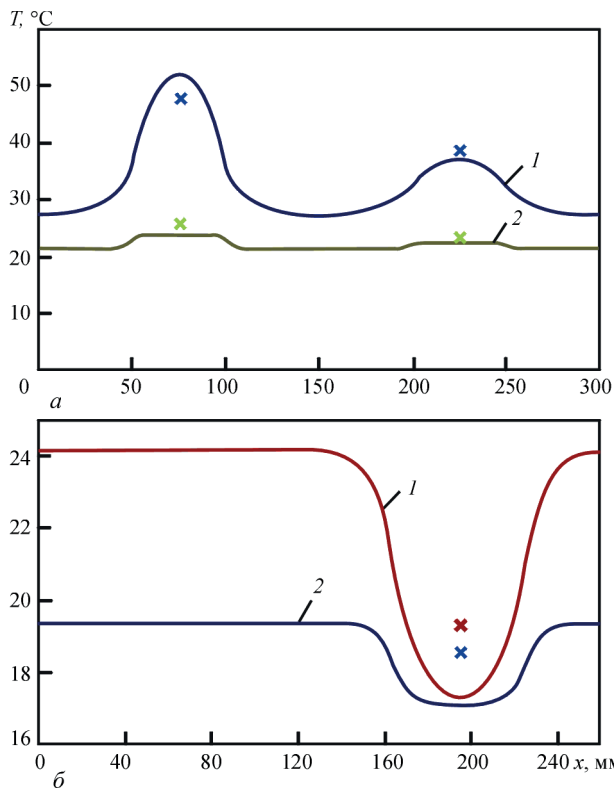


Рис. 4. Розрахункові розподіли температури на поверхні лабораторного зразка зі стоншеннями (а) ($1 - \tau = 65$ с, $2 - \tau = 5$ с) та розшаруванням (б) ($1 - \tau = 47$ с, $2 - \tau = 18$ с) через різні проміжки часу нагрівання (лінії) та відповідні значення термографічних вимірювань (x)

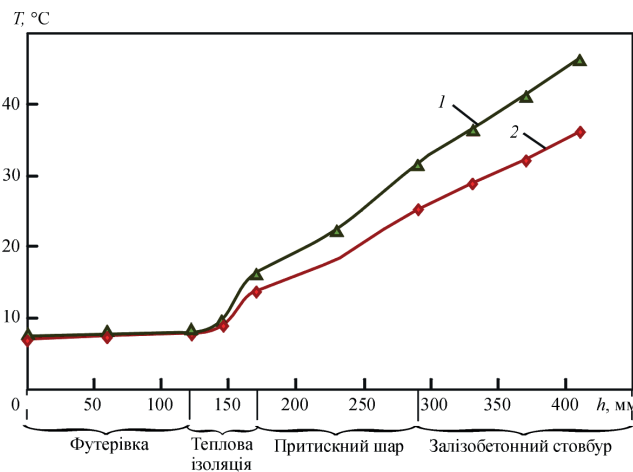


Рис. 5. Розрахункові залежності локального максимуму температури від глибини стоншення промислової чотиришарової димової труби діаметром 5870 мм при різних температурах димових газів: $T_{\text{вн}}$: 1 – 130; 2 – 100 $^{\circ}\text{C}$

об'ємного дефекту (величини розкриття порожнини в результаті деградації матеріалу), що розташований в центральному ізоляційному шарі труби, та температури димових газів. Як видно з цих даних, рекомендований метод ТК є достатньо чутливим для ідентифікації такого роду внутрішніх дефектів, які важко виявити іншими засобами неруйнівного контролю: перепад температури на поверхні в залежності від розміру дефекта досягає

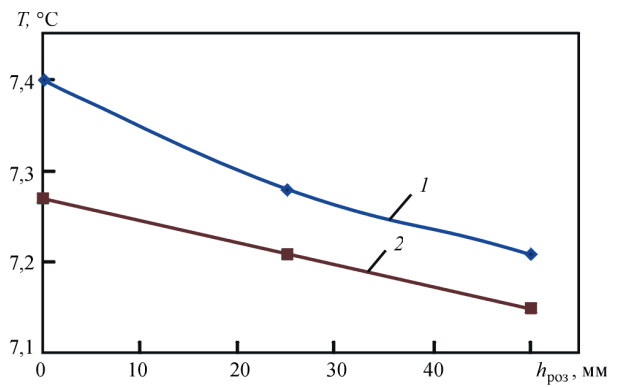


Рис. 6. Розрахункові залежності локального температурного мінімуму від величини деградації (розшарування) ізоляційного шару промислової димової труби діаметром 5870 мм при різних температурах димових газів $T_{\text{вн}}$: 1 – 130; 2 – 100 $^{\circ}\text{C}$

0,2 $^{\circ}\text{C}$, що може бути виявлено, враховуючи точність прилада на рівні 0,1 $^{\circ}\text{C}$.

Запропоновані розрахункові залежності дозволяють точніше аналізувати відповідні термограми, оцінювати температуру всередині труби на певній висоті (відповідні залежності сходяться до конкретних температур поверхні бездефектної ділянки при розмірі дефекта, що дорівнює нулю), визначити тип і розміри дефектів у процесі ТК.

Висновки

Розроблено чисельно-інструментальний метод термографічного аналізу технічного стану великогабаритних конструкцій і споруд з метою підвищення точності визначення розмірів експлуатаційних дефектів. Для цього поєднано методи чисельного моделювання неоднорідного поля температур на поверхні плоских чи циліндричних об'єктів контролю з інструментальними підходами термографічного аналізу інфрачервоного випромінювання.

Для валідації розробленого методу проведено лабораторні дослідження на сталевих пластинах з модельними дефектами — локальним стоншенням і внутрішнім розшаруванням. За результатами розрахунків і термографічного вимірювання температури поверхні дефектного зразка показано похибку розробленого підходу не вище 15 %.

На прикладі конструкції залізобетонної чотиришарової промислової димової труби для котлоагрегатів ПТВ-100 заввишки 120 м та діаметром гирла 4,8 м на основі результатів чисельного розрахунку було отримано залежності максимальної температури в центрі дефекту локального стоншення стінки від його глибини, а також локальної температури від радіального розміру об'ємного дефекту розшарування, що розташований в центральному перерізі стінки димової труби. Запропоновані розрахункові залежності на основі аналізу відповідних термограм дозволяють оцінити темпе-

ратуру всередині труби на певній висоті, визначити тип і розміри дефектів з підвищеною точністю.

Список літератури/References

1. Fox, M., Coley, D., Goodhew, S., P. de Wilde (2014) Thermography methodologies for detecting energy related building defects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40**, 296–310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>
2. DSTU B EN 13187:2011 *Thermal performance of buildings – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method.*
3. Kylili, A., Fokaides, P.A., Christou, P., Kalogirou, S.A. (2014) Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, **134**, 531–549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>
4. Miguel, M., Chong, A., Biljecki, F., Miller, C. (2022) Infrared thermography in the built environment: A multi-scale review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **165**, 112540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112540>
5. Wu, Z., Qin, S., Zhang, P., Pan, Z. (2023) Damage evolution in braided composite tubes under axial compression studied by combining infrared thermography and X-ray computed tomography. *Composite Structures*, **307**, 116634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116634>
6. Xie, H., Fang, H., Li, X. et al. (2021) Low-velocity impact damage detection and characterization in composite sandwich panels using infrared thermography. *Composite Structures*, **Vol. 269**, 114008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114008>
7. Karkhin, V.A. (2019) *Thermal Processes in Welding*. Singapore, Springer Singapore.
8. Ахонин С.В., Миленин А.С., Пикулин А.Н. (2005) Моделирование процессов испарения легирующих элементов при электронно-лучевом оплавлении поверхности цилиндрических слитков из сплавов на основе титана. *Современная электротехнология*, **1**, 21–25.
9. Akhonin, S.V., Milenin, A.S., Pikulin, A.N. (2005) Modeling of processes of evaporation of alloying elements in EBSM of cylindrical ingots produced from Ti-base alloys. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 21–25.
9. (1991) *Физические величины. Справочник*. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. (ред.). Москва, Энергоатомиздат. (1991) *Physical quantities. Handbook*. Eds by I.S. Grigoriev, E.Z. Mejlkhov. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
10. <https://eco-obogrev.com/ua/a233242-spravka-plotnost-teploprovodnost.html>

NUMERICAL-INSTRUMENTAL METHOD OF THERMOGRAPHIC CONTROL OF THE STATE OF LARGE-SIZED STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

O.S. Milenin, V.Yu. Glukhovskiy, O.A. Velykoivanenko, V.A. Lytvynenko

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

A numerical-instrumental approach of thermographic control was developed to improve the efficiency of contactless control of the state of difficult-of-access parts of large-sized structures and constructions. It consists in integrated application of industrial thermal imaging instruments and computational methods of analysis of temperature fields in the studied structures. This allows improving the accuracy of determination of the geometrical features of the defects and reducing the labour consumption of operations of technical diagnostics of the state. Application of the developed approach was demonstrated on typical examples of contactless control of the technical state of industrial chimneys. 10 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: thermographic control, technical state, flaw detection, industrial chimneys, heat transfer

Надійшла до редакції 03.04.2023

ПЕРЕДПЛАТА 2024

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	–	–	900	1800
«Сучасна електротехнологія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

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

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

Передплата на електронну версію журналів.

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

Передплата через сайт видавництва:

- <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>
- <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>
- <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>
- <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2022 рр.

ДИСТАНЦІЙНА ОЦІНКА ПОШКОДЖЕНЬ КИЇВСЬКОЇ ТЕЛЕВЕЖІ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ АЕРОФОТОЗЙОМКИ ТА МЕТОДУ ФОТОГРАММЕТРІЇ

Л.М. Лобанов¹, Д.І. Стельмах¹, В.В. Савицький¹, В.П. Дядін¹, О.П. Шуткевич¹, А.Г. Козачек²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: d.stelmax1996@gmail.com

²Концерн радіомовлення, радіозв'язку та телебачення. 04112, м. Київ, вул. Дорогожицька, 10. E-mail: a.kozachek@rrt.ua

Стаття присвячена застосуванню методів неруйнівного контролю та візуального обстеження з використанням БПЛА (дронів) для оцінки пошкоджень конструкції телевежі. Описано методологію, яка включає застосування аерофотозйомки та методу фотограмметрії для створення тривимірної моделі телевежі та локалізації пошкоджень. За допомогою програмного забезпечення 3DF Zephyr побудовано 3D-модель, що дозволило встановити розміри дефектів та провести їх класифікацію. На основі проведеного обстеження розроблено рекомендації щодо оперативного ремонту та відновлення телевежі з метою забезпечення безпеки її експлуатації. Представлені результати підтверджують високий потенціал поєднання традиційних методів неруйнівного контролю з дистанційною діагностикою на основі застосування дронів та фотограмметрії для обстеження великогабаритних конструкцій. Бібліогр. 10, рис. 4.

Ключові слова: БПЛА (дрон), фотограмметрія, неруйнівний контроль, 3D-модель, візуалізація, телевежа

Вступ. Запобігання аварійним ситуаціям та забезпечення надійної роботи великогабаритних споруд передбачає проведення регулярних профілактичних заходів для збереження їх технічного стану. Метою інспектування великогабаритних конструкцій є виявлення можливих недоліків, дефектів або потенційно проблемних зон, які потребують технічного обслуговування. У випадку великогабаритних конструкцій для ефективного виявлення дефектів необхідно використовувати спеціалізоване додаткове обладнання, що ускладнює процес, робить його тривалим, трудомістким і небезпечним для виконавців [1]. Крім того, для успішного проведення інспектування потрібно залучати професійних альпіністів та отримувати дозволи на їх роботу на об'єкті. У багатьох випадках також існують місця з обмеженим оглядом та важким доступом, що знижує ефективність виявлення пошкоджень.

Одним із можливих способів подолання вищезазначених обмежень є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Однак присутність кваліфікованих інженерів на місці продовжує відігравати фундаментальну роль у виконанні завдання інспекції (наприклад, пілот, другий пілот, експерт у сфері діагностики матеріалів). Крім того, для отримання об'єктивних результатів важливо усунути залежність їх перевірки від досвіду, фізичних аспектів і набору навичок оператора БПЛА. Результати не можуть бути досягнуті в режимі реального часу і деякі дефектні місця потрібно підтверджувати та обстежувати неоднора-

зово. Тому потрібні досвідчені професійні фахівці у сфері неруйнівного контролю якості.

У статті описується процедура обстеження Київської телевежі, яку було пошкоджено ворожим ракетним ударом 1-го березня 2022 р. внаслідок військової агресії росії. Київська телевежа – суцільнометалева зварна просторова ґратована висотна споруда заввишки 380 м, побудована в 1968–1973 рр. – була найвищою решітчастою вільно розташованою конструкцією в світі на момент спорудження [2, 3]. Враховуючи, що Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» були авторами проекту цієї унікальної інженерної споруди, обстеження та оцінка технічного стану металоконструкцій вежі виконувалась цими організаціями.

Візуальне та інструментальне обстеження металоконструкцій вежі в зоні завдання ракетного удару з позначки +0,000 до позначки + 80,000 виконувалось у чотири етапи з використанням наступних методів неруйнівного контролю:

- візуально-вимірювальний;
- магнітна дефектоскопія;
- ультразвуковий контроль основного металу та зварних з'єднань елементів вежі;
- візуальне обстеження за допомогою БПЛА.

Методи обстеження великогабаритних металевих конструкцій. Візуально-вимірювальний контроль полягав у зовнішньому огляді трубчастих елементів вежі, вузлових зварних з'єднань, фасонки та інших елементів її металевих кон-

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>,

Дядін В.П. – <https://orcid.org/0000-0002-2061-8436>, Шуткевич О.П. – <https://orcid.org/0000-0001-5758-2396>,

Стельмах Д. І. – <https://orcid.org/0000-0002-0412-9747>

© Л.М. Лобанов, Д.І. Стельмах, В.В. Савицький, В.П. Дядін, О.П. Шуткевич, А.Г. Козачек, 2023

струкцій. Огляд металевих елементів вежі проводився з відміток 0; +5; +40; +72 та +80 м.

Основною задачею візуально-вимірювального методу контролю було виявлення та фіксація всіх візуально спостережених пошкоджень елементів металоконструкцій вежі для подальшої їх оцінки. Так, у залежності від енергії впливу уламків на стінку труб можна виділити декілька видів ушкодження елементів конструкції:

- повне проникнення уламка крізь одну стінку труби без впливу на другу стінку;
- повне проникнення уламка крізь одну стінку труби з пластичним деформуванням другої стінки;
- повне проникнення уламка крізь дві стінки труби (простріл);
- часткове проникнення уламка в одну стінку труби на різну глибину (кратер);
- наявність вм'ятини в стінці труби без проникнення уламка;
- деформація елемента під впливом уламків та ударної хвилі;

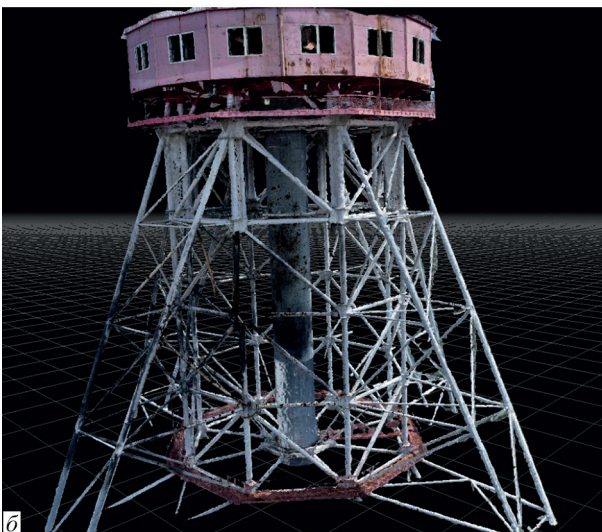
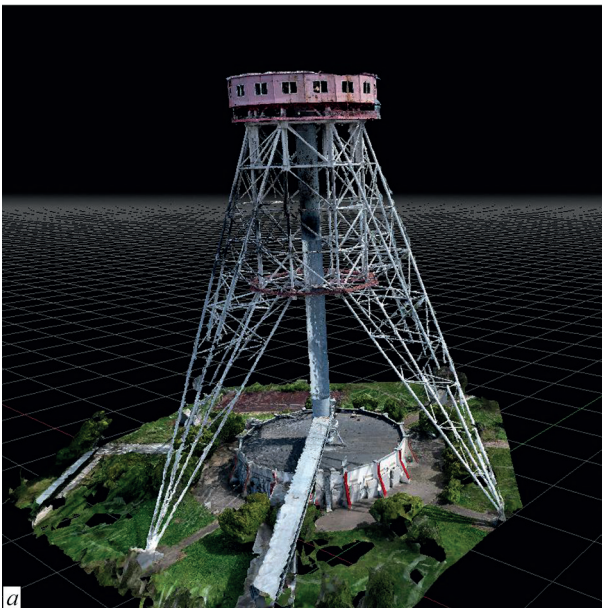


Рис. 1. Моделі нижнього ярусу Київської телевежі: *а* – повномасштабна модель; *б* – місце вибуху

- руйнування елемента чи вузла його кріплення;
- наявність тріщин в місцях впливу уламків та у вузлах розкріплення елементів;
- руйнування гасників коливань між елементами.

Особливості застосування магнітного та ультразвукового методу контролю полягали у вірогідному виявленні волосяних наскрізних, поверхневих та підповерхневих тріщин у місцях ударного впливу та проникнення уламків ракети крізь стінку елементів металоконструкцій вежі. У місцях виявлених ушкоджень робилося фотографування з реєстрацією місця їх розташування.

Внаслідок виконаної інспекції різних ділянок металоконструкцій телевежі було встановлено:

1. У місцях, схильних до значного силового впливу, не виявлено протяжних прихованих тріщин, тобто тріщин, що виходять на внутрішню поверхню або тріщини всередині металу, які не можуть бути виявлені візуально. Практично всі виявлені та досліджені тріщини є наскрізним розривом металу. Є нечисленні деформовані ділянки, де на внутрішній поверхні виявляються сліди розтріскування. Оцінка розмірів такого розтріскування становить лише кілька мм.

2. При інструментальному обстеженні металу в місцях з очевидною пластикою та розривами кількісні оцінки розмірів розтріскування практично дорівнюють візуально-вимірювальним оцінкам, відмінність становить не більше 2...3 мм.

3. У місцях, віддалених від зон пластичної деформації та слідів ударної дії, не виявлено дефектів (зокрема тріщин).

Протягом останнього десятиліття почалось широке використання безпілотних літальних апаратів (дронів) для виконання великого спектру завдань, у тому числі для проведення неруйнівного контролю якості.

При дослідженні пошкоджень телевежі застосування цього методу діагностики було обумовлено декількома причинами. По-перше, доступні місця візуального огляду пошкоджених елементів конструкцій не дозволяли оглянути всю поверхню просторових конструкцій у зв'язку з обмеженням

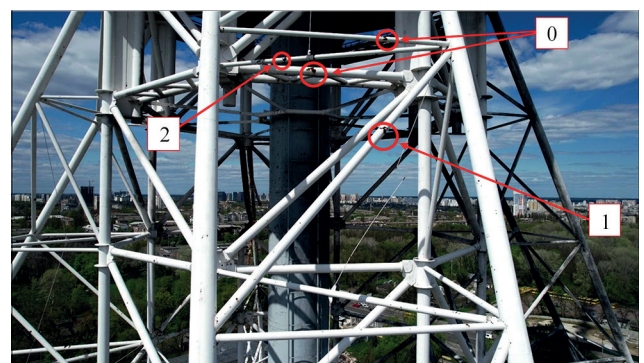


Рис. 2. Фотографія елемента опори, яку отримано за допомогою безпілотного літального апарату при аерофотозйомці телевежі

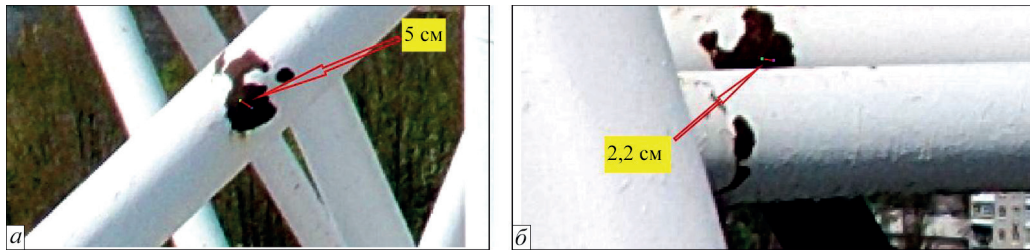


Рис. 3. Фотографії пошкоджень в елементі конструкції телевежі: *a* – дефект 1, *б* – дефект 2 (див. рис. 2)

кутів огляду з місць спостереження. Як наслідок це значно ускладнювало завдання загальної оцінки об'ємів руйнації об'єкту в цілому. По-друге, складання повних карт пошкодження елементів без їх просторового огляду потребувало значного часу та залучання великої кількості альпіністів до їх виконання. Крім зазначених причин, необхідно також відзначати проблему ідентифікації дефектів за результатами візуального огляду.

Обстеження металевих та залізобетонних конструкцій із застосуванням безпілотних і роботизованих систем значно зменшують вартість і час перевірки, одночасно підвищуючи надійність і узгодженість отриманих даних. Крім того, скорочення часу простою допомагає продовжувати роботу протягом тривалого періоду, що призводить до покращення працездатності відповідальних об'єктів. Слід також зазначати, що у випадку дослідження небезпечних або важкодоступних зон найефективнішим способом діагностики конструкцій з точки зору операційного ризику, вартості та можливостей є використання дронів [4, 5].

Разом з тим, дрони мають деякі обмеження, які необхідно враховувати. Однією з проблем під час експлуатації дрона є вібрація. БПЛА часто піддаються впливу різних джерел вібрації, що може вплинути на надійність отриманих даних [6]:

- вібрації, спричинені зовнішніми джерелами, наприклад сильний порив вітру;
- вібрації, спричинені маневрами дрону;
- вібрації, спричинені аеродинамічними джерелами, наприклад зустрічний вітер;
- вібрації, спричинені самою системою стабілізації;
- вібрації, спричинені двигунами та пропелерами.

У процесі обстеження телевежі спостерігалися деякі впливи зовнішніх чинників, а саме:

- утворення тіней на трубчастих конструкціях внаслідок хмарної погоди;
- порушення стабілізації внаслідок змінних вітрових потоків;
- зміна кута освітлення об'єкта;
- притягування до металевих конструкцій внаслідок впливу електромагнітного обладнання.

Конкретний час, коли проводиться обліт конструкцій, може істотно вплинути на достовірність результату. Наприклад, тіні, денне світло, погодні умови та сонячна радіація можуть мати негатив-

ний вплив, що призводить до неточних результатів [4].

Застосування методу фотограмметрії для пошуку пошкоджень телевежі. Фотограмметрія – це технологія отримання надійної інформації про фізичні об'єкти та навколишнє середовище за допомогою процесів запису, вимірювання та інтерпретації фотографічних зображень. Як впливає з назви технології, методологія спочатку складалася з аналізу фотографій, однак використання плівкових камер значно зменшилося на користь цифрових сенсорів. Фотограмметрія розширилася, щоб включити аналіз інших записів, таких як цифрові зображення, випромінювана акустична енергія, лазерні вимірювання та магнітні явища [7].

За останні роки фотограмметрія з її можливостями комп'ютерної обробки та залученням нових інструментів збору даних відкрила багато нових сфер застосування: дистанційна візуалізація, робототехніка, віртуальна реальність, 3D анімація тощо [8]. У промисловій інспекції і контролі якості фотограмметричні методи та системи знайшли своє призначен-



Рис. 4. Ділянка телевежі епіцентру вибуху: *a* – фотографія; *б* – тривимірна модель

ня у таких сферах, як: автошляхи, мости, трубопроводи, вітрові турбіни, лінії електропередач.

Існує два основних типи фотограмметрії: повітряна (з камерою в повітрі) і наземна (з камерою в руках або на штативі). Наземна фотограмметрія має справу з відстанями до об'єктів близько 200 м, її також називають ближньою фотограмметрією. Малоформатна аерофотограмметрія певним чином використовує ці два типи, поєднуючи точку огляду з повітря з близькими відстанями до об'єктів і високою деталізацією зображення [9].

Метод фотограмметрії базується на геометрично-математичній реконструкції шляхів променів від об'єкта до сенсора цифрової камери в момент експонування, що дозволяє дистанційно визначити дефектні ділянки, отримати точні геометричні розміри пошкоджень та їх розташування на конструкції. Для цього спочатку використовуються алгоритми орієнтації для визначення внутрішніх і зовнішніх параметрів кожного зображення, таких як фокусна відстань, точка центру фокусування, положення й орієнтація камери і точки зйомки. На наступному етапі виконується спільна обробка зображень, вони вирівнюються, щоб забезпечити правильну взаємну позицію та відповідність точок на фото. Після вирівнювання зображень можна визначити 3D-координати точок поверхні об'єкта, використовуючи методи, які базуються на їх відносних позиціях на зображеннях. На основі 3D-координат хмари точок створюється тривимірна модель об'єкта. Після отримання 3D-моделі на основі фотограмметрії проводиться її масштабування.

Для знаходження розмірів дефектів було побудовано 3D-модель Київської телевежі за допомогою програмного забезпечення 3DF Zephyr. Для побудови моделі було використано базу з 2351-ї фотографії, для фінального результату було залучено 1292 фотографії (рис. 1).

Перед початком побудови моделі було проаналізовано всі доступні режими в програмному забезпеченні 3DF Zephyr і експериментально обрано найкращий серед 6-и варіантів [10]:

1. General; 2. Aerial–Nadir images; 3. Urban; 4. Human body; 5. Surface scan; 6. Vertical structure.

Режими Urban і Human body були одразу відкинуті, тому що їх потрібно використовувати, якщо стоїть завдання побудови 3D-моделі міста з його ландшафтом та різноманітними фасадами будівель або якщо потрібна 3D-модель людини з точними розмірами її тіла.

Режим General є універсальним і з його допомогою можливо виконати поставлене завдання, але при цьому постає проблема з визначенням розмірів дефектів. Цей режим не дає достатньої точності розмірів елементів конструкції та унеможливує вимірювання відстані з точністю до мм.

Aerial–Nadir images — режим, який створено для роботи з даними, що надають БПЛА. При використанні такого режиму виникла проблема з подво-

єнням елементів та їх невизначеною орієнтацією в просторі. Оскільки обстеження вежі проводилося на різних висотах та під різними кутами, це було головною проблемою для даного режиму, адже для оптимальної побудови моделей в Aerial–Nadir images потрібні фото, які знято з однієї висоти з напрямком згори вниз до обстежуваного об'єкту.

Surface scan підійшов би, якби потрібно було проаналізувати невелику ділянку конструкції. Також для цього потрібні зображення з максимальною близької відстані до об'єкта. Дрон не може підлетіти ближче ніж 1 м до об'єкта, тому що спрацьовують захисні вмонтовані датчики, які блокують керування ним. Проблема з неправильною орієнтацією елементів в просторі в даному режимі теж присутня.

Було визначено, що Vertical structure є оптимальним для побудови моделі Київської телевежі. За допомогою нього вдалося вирішити поставлені завдання.

Для створення 3D-моделі було використано графічну станцію Dell Precision 3650 Tower з наступними характеристиками:

Процесор 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11700 @ 2.50GHz; пам'ять 32 GB (4·8 GB); диск 512 SSD; відеокарта Nvidia T1000 4 GB; операційна система Windows 10 Pro.

Робота з великим обсягом даних є трудомісткою, адже процеси створення моделей можуть тривати декілька днів, а то і тижнів. У нашому випадку для отримання фінального результату була потрібна безперервна робота графічної станції близько 36 год.

Після побудови чорнового варіанту 3D-моделі почався наступний етап роботи, а саме її обробка. Фільтруються зайві елементи графіки, підбираються оптимальні параметри для найкращого огляду моделі та виявлення дефектів. Після цього отримується фінальна 3D-модель (рис. 1).

На рис. 2 показано дефекти, які утворилися внаслідок вибуху ракети. Дефект 0 являє собою руйнування захисного покриття елемента конструкції та не є небезпечним для вежі у короткостроковій перспективі. Дефекти 1 і 2 — це отвори, які утворилися внаслідок проникнення уламка крізь стінку труби і через них потрапляє вода та волога в середину трубчастих елементів, що призводить до їх корозії, суттєвого зниження характеристик міцності.

На основі аналізу фотографій та їх проєкцій на цифрову тривимірну модель, яку було отримано методом фотограмметрії, було визначено характерні розміри цих дефектів. Так, наприклад, за допомогою інструмента Measures було встановлено, що діаметр першого дефекту становить приблизно 5 см (рис. 3, а), а другого – 2,2 см (рис. 3, б). Варто зазначити, що ці дефекти було виявлено на найменш пошкодженій опорі телевежі.

3D-модель дозволила вдало візуалізувати великі пошкодження з їх реальним виглядом та розмірами (рис. 4).

Проведенні роботи з обстеження Київської телевежі допомогли оцінити дефекти та розробити рекомендації для ремонту.

Висновки

Проведено обстеження пошкоджень трубчастих конструкцій Київської телевежі за допомогою методів неруйнівного контролю та візуального обстеження дроном з подальшим використанням методу фотограмметрії. Побудована 3D-модель допомагає локально виявити розташування дефектів на елементах конструкції та візуалізувати результати діагностики, визначити розмір дефектів та класифікувати їх. Використовуючи дистанційну візуальну інспекцію за допомогою БПЛА, вдалося знайти пошкодження, які не було ідентифіковано методами неруйнівного контролю, та критичні дефекти, які можуть становити загрозу для безпеки експлуатації об'єкта або призвести до серйозних проблем з його функціонуванням, та потребують термінового ремонту для того, щоб зменшити ризик аварійного випадку та забезпечити безпеку експлуатації об'єкта. Побудовану тривимірну модель може бути використано для чисельних розрахунків напружено-деформованого стану Київської телевежі для аналізу просторового розподілу напружень у вузлах та елементах її конструкції. Отримані дані дозволили розробити рекомендації щодо оперативного ремонту та відновлення телевежі. Представлені результати демонструють високий потенціал поєднання традиційних методів неруйнівного контролю якості з технологією дистанційної діагностики на основі застосування БПЛА та фотограмметрії для обстеження великогабаритних конструкцій відповідального призначення.

Подяка

Опубліковані результати отримані в рамках реалізації проекту 022.01/0095 «Розробка технології дистанційної діагностики пошкоджених великогабаритних об'єктів на основі застосування

безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та фотограмметрії», за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Автори висловлюють також подяку корпорації 3Dflow за надане цифрове забезпечення 3DF Zephyr та технічну підтримку у рамках програми 3Dflow for the Ukrainian Crisis [10]. Автори вдячні за можливість використовувати цей потужний інструмент у своїх дослідженнях і вважають, що він допоміг успіху їхньої роботи.

Список літератури/References

1. Parham Nooralishahi, Clemente Ibarra-Castanedo, Shakeb Deane et al. (2021) Drone-Based Non-Destructive Inspection of Industrial Sites: a review and case studies. *Drones*, 5(4), 106. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5040106>
2. Лобанов Л.М., Гарф Э.Ф., Копылов Л.Н., Синеок А.Г. (2013) Сварка при возведении башни киевского телецентра. *Промислове будівництво на інженерні споруди*, 3, 16–20. Lobanov, L.M., Garf, E.F., Kopylov, L.N., Sineok, A.G. (2013) Welding construction of Kyiv TV tower. *Promyslove Budivnytstvo ta Inzhenerni Sporudy*, 3, 16–20 [in Russian].
3. Демьянов И.А., Мурашов А.П., Борисов Ю.С. и др. (2005) Применение электродуговой металлизации для антикоррозионной защиты телевизионной башни в Киеве. *Сварщик*, 3, 19–21. Demyanov, I.A., Murashov, A.P., Borisov, Yu.S. et al. (2005) Application of electric arc metallization for anticorrosion protection of TV tower in Kiev. *Svarshchik*, 3, 19–21 [in Russian].
4. Nenad Gucunski, Hung Manh La, Kien Dinh, Mustafa Khudhair (2023) Advancing condition assessment of reinforced concrete bridge elements through automation, visualization, and improved interpretation of multi-NDE technology data. *Materials Evaluation*, 81(1), 56–66. DOI: <https://doi.org/10.32548/2023.me-04289>
5. Rok Cajzek, Uroš Klanšek (2016) An unmanned aerial vehicle for multi-purpose tasks in construction industry. *Journal of applied engineering science*, 14(2), 314–327. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes14-10918>
6. Paul R. Wolf, Bon A. Dewitt, Benjamin E. Wilkinson (2014) *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th Edition, 2014.
7. Zhilin Li, Jun Chen, Emmanuel Baltsavias (2008) *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. ISPRS Congress Book.
8. James, S. Aber, Johannes, B. Ries (2010) *Small-Format Aerial Photography*. ISBN: 978-0-444-53260-2.
9. [https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-documentation/Copyright © 2023 by 3Dflow srl](https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-documentation/Copyright%20%20%202023%20by%203Dflow%20srl)
10. [https://www.3dflow.net/3dflow-for-the-ukrainian-crisis/\(3 March 2022\)](https://www.3dflow.net/3dflow-for-the-ukrainian-crisis/(3%20March%202022))

REMOTE ASSESSMENT OF DAMAGE TO KYIV TV TOWER BASED ON THE APPLICATION OF AERIAL PHOTOGRAPHY AND PHOTOGRAMMETRY METHOD

L.M. Lobanov¹, D.I. Stelmakh¹, V.V. Savitsky¹, V.P. Diadin¹, O.P. Shutkevych¹, A.G. Kozachek²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: d.stelmakh1996@gmail.com

²Concern of radio broadcasting, radio communication and television. 10 Dorohozhytska str., 04112, Kyiv, Ukraine.

E-mail: a.kozachek@rrt.ua

The paper is devoted to application of the methods of nondestructive testing and visual examination using UAV (drones) for evaluation of damage of the TV tower structure. A methodology is described, which includes application of aerial photography and photogrammetry method to construct a 3D model of the TV tower and localize the damage. 3DF Zephyr software was used to plot a 3D-model, which allowed sizing the defects and classifying them. Conducted examination provided the grounds for elaboration of the recommendations on operative repair and restoration of the TV tower to ensure its safe operation. The presented results confirm the high potential of the combination of the traditional nondestructive testing methods with remote diagnostics based on application of drones and photogrammetry for examination of large-sized structures. 10 Ref., 4 Fig.

Keywords: UAV (drone), photogrammetry, nondestructive testing, 3D-model, visualization, TV tower

Надійшла до редакції 31.05.2023

ВПЛИВ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ ВОДНЮ З МЕТАНОМ НА ФІЗИЧНУ ТА ХІМІЧНУ СТРУКТУРУ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ З ПЕ-80

М.В. Юрженко^{1,2}, М.О. Ковальчук¹, В.Ю. Кондратенко¹, В.Л. Демченко^{1,2}, К.Г. Гусакова²,
В.С. Вербовський³, Г.В. Жук³, К.П. Костогриз⁴, І.А. Гоцик⁵

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: 4chewip@gmail.com

²Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України. 02160, м. Київ, вул. Харківське шосе, 48. E-mail: dvaleriy@ukr.net

³Інститут газу НАН України. 03113, м. Київ, вул. Дехтярівська, 39. E-mail: company_era@ukr.net

⁴ТОВ «Нафтогазбудінформатика». 04053, м. Київ, вул. Кудрявський узвіз, 5б. E-mail: Kostohryz@nas.gov.ua

⁵ТОВ «Регіональна газова компанія». 01010, м. Київ, вул. Князів Острозьких, 32/2

У роботі представлено результати комплексних структурних досліджень ефекту впливу сумішей газоподібного водню з природним газом у співвідношеннях 10 % H₂/90 % CH₄ та 20 % H₂/80 % CH₄ на матеріал полімерних труб з ПЕ-80, які раніше не експлуатувались. Виявлено збільшення кількості кристалічної фази в матеріалі під дією водневих сумішей та появу кристалів нової форми. Зроблено припущення, що зміну структури кристалічної фази спровоковано конкуруючою дією молекул водню та метану. Встановлено, що вплив водневих сумішей на матеріал поліетиленових труб має фізичний характер. Змін у хімічній структурі матеріалу поліетиленових труб не виявлено. Дана робота є початком масштабніших досліджень, у ході яких планується дослідження довготривалого впливу сумішей водню з природним газом через 12 та 24 місяців наводнювання. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 6.

Ключові слова: поліетилен, ПЕ-80, суміші природного газу, суміші водню, транспорт водню

Вступ. Питання можливості транспортування водню та його сумішей впливає з необхідності заміщення традиційних видів пального, таких як вугілля, нафта та природний газ. Саме питання є комплексним і ставить нові завдання як для полімерного матеріалознавства, так і для промисловості. Можливість транспортування водню досліджується світовими профільними установами вже більш ніж 10 років [1]. В Україні подібні дослідження проводяться вже 3 роки [2, 3]. Не дивлячись на те, що подібні дослідження проводяться вже певний час, питання ефекту довготривалого впливу водню на технічні поліетиленові все ще залишається відкритим.

У даній роботі проведено комплексні дослідження впливу сумішей водню з природним газом на фізичну та хімічну структуру матеріалу поліетиленових труб з ПЕ-80, що попередньо не використовувались у діючих газорозподільних мережах України. Представлені результати є підґрунтям для майбутнього масштабнішого дослідження, метою якого є вивчення можливості транспортування чистого водню та водневих сумішей з природним газом діючими в Україні та ЄС газорозподільними мережами.

Матеріали. Для досліджень використовували дві газові суміші водню з метаном у співвідно-

шеннях 10 % H₂/90 % CH₄ та 20 % H₂/80 % CH₄. Для вивчення впливу газових сумішей на структуру матеріалу поліетиленових труб з використанням їх натурних зразків було побудовано науково-дослідний стенд (рис. 1). Для досліджень були відібрані зразки поліетиленових труб з ПЕ-80 виробництва ТОВ «Ельпласт-Львів» 04.09.2020 р. із зовнішнім діаметром 63 мм; товщиною стінки 3,6 мм; SDR 17,6 (рис. 2) (позначені надалі як НОВІ, які попередньо не були в експлуатації). Процес виготовлення стенду наведено у [4].

Методи досліджень. Структурні дослідження матеріалу внутрішньої поверхні стінки поліетиленових труб у повздовжньому напрямку до основної осі труби досліджували методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів. Детальний опис параметрів процесу досліджень наведено у [4].

Інфрачервону спектроскопію (ІЧ) матеріалу внутрішньої поверхні стінок та об'єму (на глибині 1 мм від внутрішньої поверхні стінки) поліетиленових труб проводили на відбиття на спектрометрі з Фур'є перетворенням «Tensor 37» виробництва компанії «Bruker Corp.», по аналогії з попередньою роботою [4].

Перед початком наводнювання стенд для випробування на щільність, міцність та герметичність продували повітрям при тиску 3 бар, а потім

Юрженко М.В. – <https://orcid.org/0000-0002-5535-731X>, Ковальчук М.О. – <https://orcid.org/0000-0003-2161-643X>, Кондратенко В.Ю. – <https://orcid.org/0009-0003-3521-9639>, Демченко В.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-9146-8984>, Гусакова К.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-0827-7042>, Вербовський В.С. – <https://orcid.org/0000-0003-4684-6768>, Жук Г.В. – <https://orcid.org/0000-0001-6615-8239>

© М.В. Юрженко, М.О. Ковальчук, В.Ю. Кондратенко, В.Л. Демченко, К.Г. Гусакова, В.С. Вербовський, Г.В. Жук, К.П. Костогриз, І.А. Гоцик, 2023

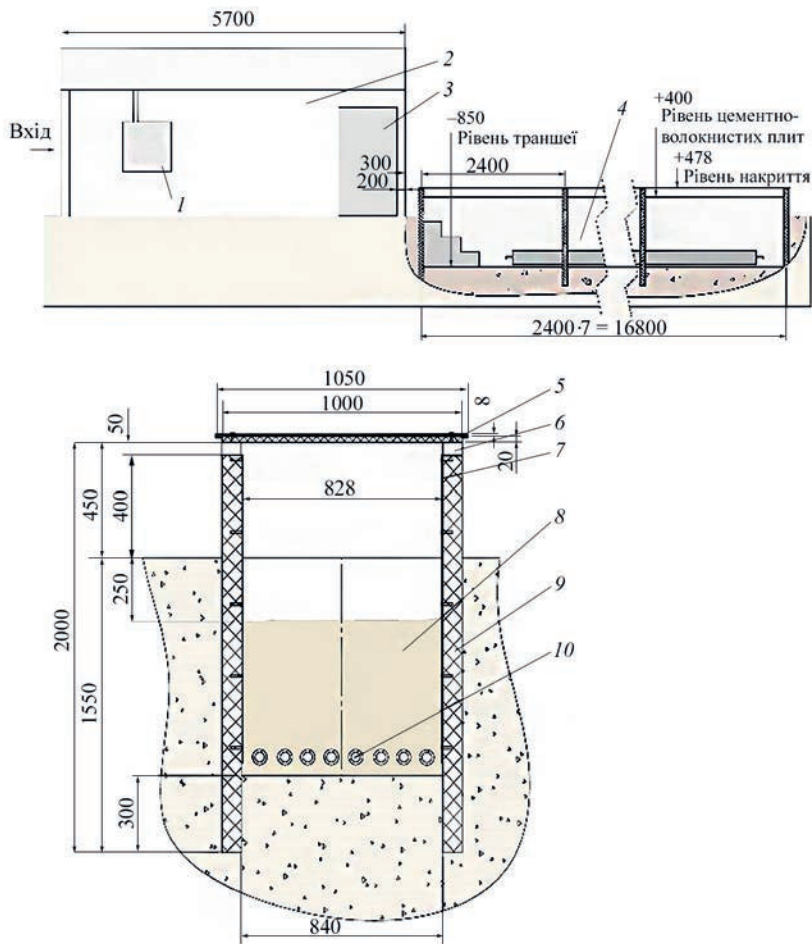


Рис. 1. Схема науково-дослідного стенду: 1 – шафа керування; 2 – приміщення для наводнювання та моніторингу; 3 – шафа для балонів; 4 – траншея; 5 – металеве покриття; 6 – пази для витoku газу; 7 – цементно-волокнисті плити; 8 – пісок; 9 – брус (сосна) 60×80×2000; 10 – труби

інертним газом (азотом) з метою витіснення повітря. У ході експерименту після наводнювання в стенді підтримувався тиск 3 бар. При падінні тиску в стенді тиск піднімали до 3 бар. Контроль тиску сумішей водню з природним газом в стенді відбувався щоденно. Різких падінь тиску ($P > 0,1$ бар) за добу не зафіксовано.

Перед початком досліджень ефекту впливу водневих сумішей на матеріал поліетиленових труб дослідний стенд розводнювали та продували газоподібним азотом.

Після відбору зразків труб їх вакуумували та транспортували до лабораторії в закритому контейнері, унеможливаючи вплив ультрафіолетового випромінювання.

Результати досліджень. Рентгеноструктурний аналіз. У ході аналізу результатів рентгено-



Рис. 2. Зразок поліетиленової труби з PE-80 виробництва ТОВ «Ельпласт-Львів»

структурних досліджень матеріалу поліетиленових труб до наводнювання (рис. 3) встановлено присутність кристалічних дифракційних максимумів.

I , відн. од.

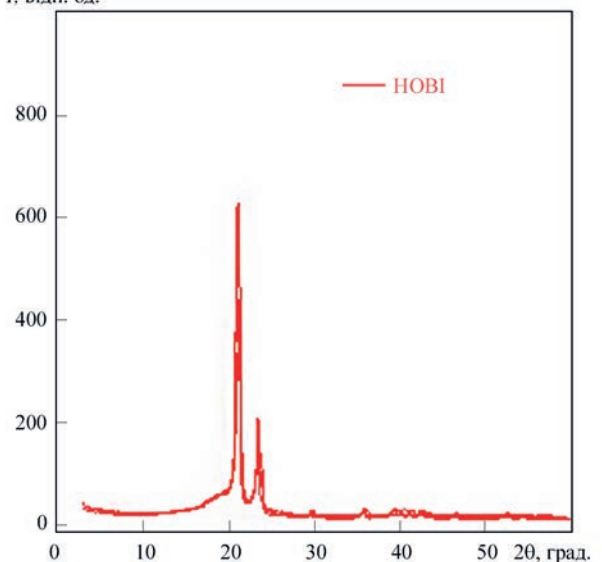


Рис. 3. Ширококутові дифракційні криві (НОВІ) рентгеноструктурного аналізу матеріалу поліетиленових труб до наводнювання: I , відн.од. – відносна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка

Таблиця 1. Розміри кристалітів за дифракційними максимумами зразка матеріалу труби до наводнювання

2θ, град.	d, Å	Спроб	ПШПМ сум., град.	ПШПМ інстр., град.	ПШПМ зразка, град.	Розмір кристалітів, Å
21,000	4,2304	36483	0,5000	0,1303	0,3697	218,7
23,500	3,8037	10621	0,5000	0,1303	0,3697	219,6
29,450	3,0330	270	0,3000	0,1273	0,1727	476,2
35,650	2,5185	691	0,4000	0,1135	0,2865	291,5
39,150	2,3010	896	0,6000	0,1076	0,4924	171,4
40,100	2,2487	512	0,4000	0,1062	0,2938	288,1
41,050	2,1988	674	0,7000	0,1049	0,5951	142,7
42,400	2,1319	817	0,7000	0,1031	0,5969	142,9
52,400	1,7462	618	0,7000	0,1009	0,5991	142,9

мів на фоні уявного аморфного гало з вершиною при $2\theta_{\max} \approx 20^\circ$, що вказує на аморфно-кристалічну структуру матеріалу [5].

Відносний рівень кристалічності ($X_{кр}$) досліджуваних полімерних зразків обчислено за методом Метьюза [6]:

$$X_{кр} = Q_{кр} / (Q_{кр} + Q_{ам}) \cdot 100 \quad (1)$$

де $Q_{кр}$ – площа дифракційних максимумів, які характеризують кристалічну структуру полімеру; $Q_{кр} + Q_{ам}$ – площа всієї дифрактограми в інтервалі кутів розсіювання ($2\theta_1 \div 2\theta_2$), у якому проявляється аморфно-кристалічна структура полімеру.

Оцінку ефективного розміру кристалітів (L) зразків проведено за методом Шеррера [7]:

$$L = K\lambda(\beta \cos \theta_{\max})^{-1}, \quad (2)$$

де K – стала, пов'язана з формою кристалітів (при невідомій їх формі $K = 0,9$); β – кутова напівширина (ширина на половині висоти) дифракційного максимуму.

Оцінка показала, що для зразка поліетилену ПЕ-80, що попередньо не використовувався в газорозподільних мережах та не перебував під дією газу та водневих сумішей, ступінь кристалічності становить $X_{кр} = 67,29\%$ при середньому розмірі кристалітів $L = 23,32$ нм. Розмір кристалітів за окремими дифракційними максимумами наведено в табл. 1, де ПШПМ – повна ширина половини максимуму (ширина спектральної кривої, виміряна між тими точками на осі γ , які є половиною максимальної амплітуди), ПШПМ сум. – повна ширина половини максимуму сумарна, ПШПМ інстр. – повна ширина половини максимуму інструментальна.

Результати рентгеноструктурного аналізу матеріалу поліетиленових труб після 6-ти місяців наводнювання газовими сумішами наведено на рис. 4. Встановлено, що у даному випадку матеріал так само, як і вихідні зразки, характеризуються аморфно-кристалічною структурою, на що вказує присутність кристалічних дифракційних максимумів на фоні уявного аморфного гало з вершиною при $2\theta_{\max} \approx 20^\circ$.

Встановлено, що у матеріалі поліетиленових труб, які знаходилися під дією газових сумішей,

I, відн. од.

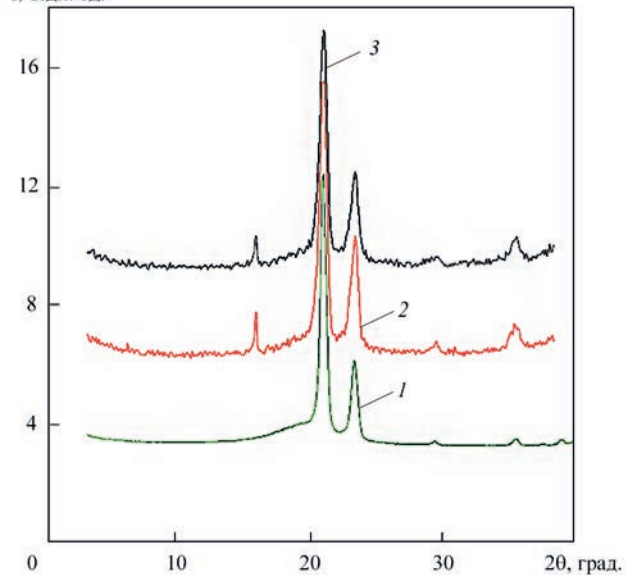


Рис. 4. Порівняльні графіки ширококутових дифракційних кривих рентгеноструктурного аналізу матеріалу поліетиленових труб до і після 6 місяців наводнювання: 1 – НОВІ; 2 – НОВІ 10% H₂; 3 – НОВІ 20% H₂

з'являються як нові дифракційні максимуми при $2\theta_{\max} \approx 15,8^\circ$, так і зростає інтенсивність дифракційних максимумів при $2\theta_{\max} \approx 29,5^\circ$ та $35,6^\circ$, що свідчить про збільшення кристалічності матеріалу поліетиленових труб.

Оцінка ступеня кристалічності показала, що для зразків поліетиленових труб, які знаходилися під дією газових сумішей 10% H₂/90% CH₄ та 20% H₂/80% CH₄, ступінь кристалічності $X_{кр}$ зростає і становить 77,06% та 76,19% відповідно (табл. 2).

Встановлено, що середній розмір кристалітів L у зразках матеріалу поліетиленових труб, які знаходилися під дією газових сумішей, є знач-

Таблиця 2. Ступінь кристалічності матеріалу поліетиленових труб, розрахована за даними рентгеноструктурного аналізу

Зразок	$X_{кр}$, %	L , нм
НОВІ	67,29	23,32
НОВІ 10 % H ₂	77,06	15,78
НОВІ 20 % H ₂	76,19	15,78

Таблиця 3. Розміри кристалітів за дифракційними максимумами зразка, що перебував під дією газової суміші 10% H₂/90% CH₄

2θ, град.	d, Å	Спроб	ПШПМ сум., град.	ПШПМ інстр., град.	ПШПМ зразка, град.	Розмір кристалітів, Å
17,250	5,1386	10	0,2000	0,1303	0,0697	1153,7
22,400	3,9658	834	0,7000	0,1303	0,5697	142,3
24,750	3,5943	251	0,6000	0,1303	0,4697	173,3
37,000	2,4276	61	0,9000	0,1110	0,7890	106,3

Таблиця 4. Розміри кристалітів за дифракційними максимумами зразка, що перебував під дією газової суміші 20% H₂/80% CH₄

2θ, град.	d, Å	Спроб	ПШПМ сум., град.	ПШПМ інстр., град.	ПШПМ зразка, град.	Розмір кристалітів, Å
17,250	5,1365	12	0,2000	0,1303	0,0697	1153,7
22,400	3,9658	725	0,7000	0,1303	0,5697	142,3
24,750	3,6943	213	0,6000	0,1303	0,4697	173,3
37,050	2,4245	83	0,9000	0,1110	0,7890	106,3

но меншим у порівнянні з вихідним матеріалом і становить 15,78 нм в обох випадках. Для розрахунків використовували дифракційні максимуми при $2\theta_{\max} \approx 21,0^\circ$ та $23,4^\circ$. Розмір кристалітів та міжплощинні відстані за окремими дифракційними максимумами зразків, які перебували під дією газових сумішей 10% H₂/90% CH₄ та 20% H₂/80% CH₄ відповідно, наведено в табл. 3, 4.

Інфрачервона спектроскопія. На рис. 5 наведені спектри ІЧ матеріалу з внутрішньої поверхні та об'єму стінок зразків труб. На рис. 6 наведено порівняльні спектри ІЧ спектроскопії матеріалу з внутрішньої поверхні та об'єму стінок зразків труб до і після 6-ти місяців наводнювання газовими сумішами 10% H₂/90% CH₄ та 20% H₂/80% CH₄.

З порівняльних ІЧ спектрів до і після 6-ти місяців наводнювання зразків матеріалів поліетиленових труб видно, що хімічна структура поліетилену не зазначала змін, що впливає з відсутності нових або зсуву існуючих піків, які відповідають за хімічні зв'язки або групи атомів. Видно, що спектри поглинання для усіх зразків подібні і є типовими для поліетиленів. Необхідно зазначити, що на спектрах зразків, які знаходилися під дією газової суміші 20% H₂/80% CH₄, підвищується інтенсивність піків у діапазоні довжин хвиль

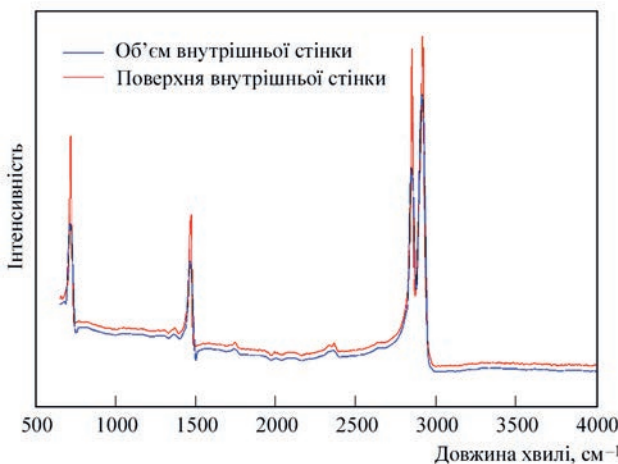


Рис. 5. ІЧ спектри матеріалу внутрішньої поверхні та об'єму стінок зразків труб до наводнювання

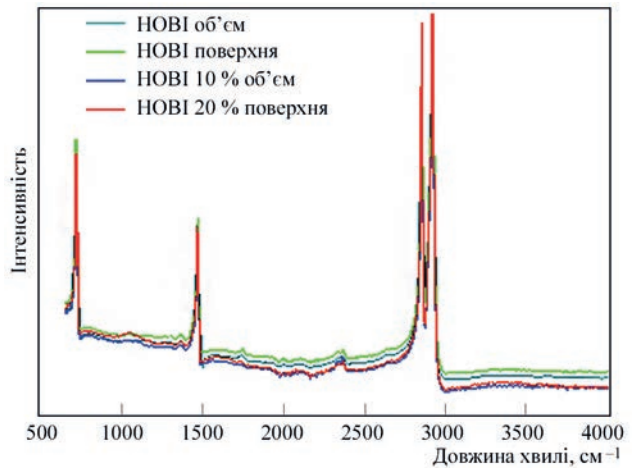


Рис. 6. Порівняльні ІЧ спектри матеріалу внутрішньої поверхні та об'єму стінок зразків труб до та після 6-ти місяців наводнювання

1000...1200 та 3300...3500 см⁻¹, які відповідають за коливання С-О-Н та -ОН груп, що може свідчити про певну взаємодію молекул водню з полімерними ланцюгами поліетилену, ймовірно дипольного характеру, з їх бічними групами атомів [8].

Висновки

У роботі проведено комплексні дослідження впливу газових сумішей водню з метаном у співвідношеннях 10 % H₂/90 % CH₄ та 20 % H₂/80 % CH₄ на фізичну та хімічну структуру матеріалу поліетиленових труб з ПЕ-80, які попередньо не експлуатувались.

За результатами рентгеноструктурного аналізу виявлено наявність впливу водневих сумішей, що проявляється в збільшенні кристалічної фази та появі нових піків кристалічності, тобто нових типів кристалів, завдяки яким і відбувається збільшення ступеня кристалічної фази під дією водневих сумішей.

Вплив газових сумішей на матеріал поліетиленових труб має фізичний характер, що впливає з відсутності нових або зсуву існуючих піків ІЧ спектрів, які відповідають за хімічні зв'язки

або групи атомів. Зроблено припущення, що зміна структури кристалічної фази спровокована конкуруючою дією молекул водню та метану, при цьому метан може виступати в ролі розчинника поліетилену низької концентрації у газоподібному стані, що супроводжується незначним набуханням поліетилену та незначними структурними змінами фізичного характеру. Молекули водню в такому випадку сприяють формуванню кристалітів меншого розміру та нової форми.

Змін в хімічній структурі матеріалу поліетиленових труб не виявлено.

Список літератури/References

1. Dodds, P.E., Demoullin, S. (2013) Conversion of the UK Gas System to Transport Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(18), 7189–7200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.070>
2. Казда С., Уніговський Л. (2020) Наукове супроводження експериментів транспортування сумішей водню та природного газу розподільними газопроводами. *Нафтогазова галузь України*, 5, 9–14.
3. Kozda, S., Unihovskiy, L. (2020) Scientific support of experiments on transportation of mixtures of hydrogen and natural gas through distribution gas pipelines. *Naftogazova Galuz Ukrainy*, 5, 9–14 [in Ukrainian].
4. Костогриз К., Височанський І., Колесник С. (2020) Перші випробування водню в українських газових мережах. *Нафтогазова галузь України*, 5, 24–30.
5. Kostohryz K., Vysochanskyi I., Kolesnyk S. (2020) The first tests of hydrogen in Ukrainian gas networks. *Naftogazova Galuz Ukrainy*, 5, 24–30 [in Ukrainian].
6. Юрженко М.В., Ковальчук М.О., Кондратенко В.Ю. та ін. (2023) Вплив газових сумішей водню з метаном на фізичну та хімічну структуру поліетиленових труб діючих газорозподільних мереж України. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 41–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.06>
7. Iurzhenko M.V., Kovalchuk M.O., Kondratenko V.Yu., Demchenko V.L., Gusakova K.G., Verbovskiy V.S., Zhuk H.V., Kostohryz K.P., Hotsyk I.A. (2023) The influence of gas mixtures of hydrogen and methane on the physical and chemical structure of polyethylene pipes of the operating gas distribution networks of Ukraine. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 41–46 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.06>
8. Galchun, A., Korab, N., Kondratenko, V. et al. (2015) Nanostructurization and thermal properties of polyethylenes' welds. *Nanoscale Res. Lett.*, 10, Article number 138. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0832-4>
9. Штомпель В.И., Керча Ю.Ю. (2008) Структура линейных полиуретанов. Наукова думка.
10. Stompel, V.I., Kercha, Yu.Yu. (2008) *The structure of linear polyurethanes*. Naukova Dumka [in Russian].
11. Гинье А. (1961) Рентгенография кристаллов. Теория и практика. Пер. с англ., М., Физматгиз.
12. Ginye, A. (1961) *Radiography of crystals. Theory and practice*. Moscow, Fizmatgiz [in Russian].
13. Klopffer, M.-H., Berne, P., Espuche, E. (2015) Development of innovating materials for distributing mixtures of hydrogen and natural gas. Study of the barrier properties and durability of polymer pipes. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 70(2), 305–315. DOI: <https://doi.org/10.2516/ogst/2014008>

INFLUENCE OF GAS MIXTURES OF HYDROGEN WITH METHANE ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL STRUCTURE OF POLYETHYLENE PIPES FROM PE-80

M.V. Iurzhenko^{1,2}, M.O. Kovalchuk¹, V.Yu. Kondratenko¹, V.L. Demchenko^{1,2}, K.H. Gusakova², V.S. Verbovskiy³, G.V. Zhuk³, K.P. Kostohryz⁴, I.A. Gotsyk⁵

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: 4chewip@gmail.com

²Institute of Macromolecular Chemistry of NASU. 48 Kharkiv Hwy, 02160, Kyiv, Ukraine. E-mail: dvaleriy@ukr.net

³Gas Institute of NASU. 39 Dekhtyariv's'ka str., 03113, Kyiv, Ukraine. E-mail: company_era@ukr.net

⁴«Naftogasbudinformatika» Company. 5b Kudryavsky uzviz, 04053, Kyiv, Ukraine. E-mail: Kostohryz@nas.gov.ua

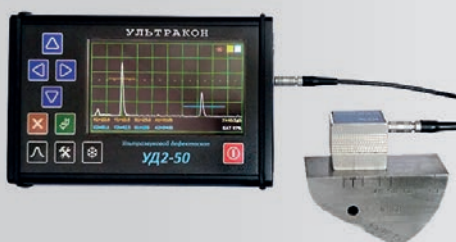
⁵«Regional Gas Company» LLC. 32/2 Knyaz Ostrozky str., 01010, Kyiv, Ukraine

The work presents the results of comprehensive structural studies of the influence of mixtures of gaseous hydrogen with natural gas in the ratios of 10 % H₂/90 % CH₄ and 20 % H₂/80 % CH₄ on the material of polymer pipes from PE-80, that have not been in operation before. An increase in the amount of the crystalline phase in the material under the impact of hydrogen mixtures and appearance of crystals of a new shape was revealed. An assumption was made that the change in the crystalline phase structure was provoked by the competitive effect of hydrogen and methane molecules. It is found that the influence of hydrogen mixtures on polyethylene pipe material is of a physical nature. No changes in the chemical structure of polyethylene pipe material were revealed. This work is the start of large-scale investigations, in which it is intended to study the long-term influence of hydrogen mixtures with natural gas after 12 and 24 months of hydrogenation. 8 Ref., 4 Tabl., 6 Fig.

Keywords: polyethylene, PE-80, natural gas mixtures, hydrogen mixtures, hydrogen transport

Надійшла до редакції 30.06.2023

Ультразвуковий дефектоскоп УД2-50



Сучасний малогабаритний ультразвуковий дефектоскоп загального призначення для неруйнівного контролю. Призначений для пошуку порушень суцільності та однорідності виробів, зварних з'єднань і напівфабрикатів з металів, пластиків, композитів, а також для вимірювання координат залягання і оцінки параметрів дефектів.

Розробник ТОВ НВФ «УЛЬТРАКОН»

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ЗМІН ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 17Г1С ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.М. Гур'янов

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

Сталь 17Г1С є широко застосованою у трубопроводах. Зміна фізичних властивостей цього матеріалу з часом залежить від умов експлуатації газопроводу та середовища, у якому знаходиться труба. Пошкодженість матеріалу внаслідок експлуатаційного напруження далеко не завжди призводить до зміни стандартних характеристик матеріалу, таких як σ_B , σ_T , K_{1C} та ряду інших. У той же час такий матеріал може бути суттєво пошкодженою, а традиційні методи не дозволяють цього визначити. Завдання даної роботи — показати чутливість методу акустичної емісії до змін властивостей сталі 17Г1С після 15-ти років експлуатації магістрального газопроводу. Результати випробувань показують, що параметри акустичної емісії, що аналізуються, суттєво змінюються під впливом експлуатаційного напруження і можуть бути характеристиками для оцінки поточного стану пошкодженого матеріалу. Бібліогр. 6, рис. 5.

Ключові слова: акустична емісія (АЕ), фізичні властивості, АЕ моніторинг, механічні випробування

Сталь 17Г1С широко застосовується у трубопроводах і, зокрема, газопроводах. Зміна деяких властивостей цього матеріалу з часом є досить істотною і залежить від умов експлуатації газопроводу та середовища, у якому знаходиться труба [1].

Характерно, що пошкодженість матеріалу внаслідок експлуатаційного напруження далеко не завжди призводить до зміни стандартних характеристик матеріалу, таких як σ_B , σ_T , K_{1C} та ряду інших. Внаслідок цього такий матеріал може бути суттєво пошкодженою, а традиційні методи не дозволяють цього визначити.

У даній роботі зміну властивостей сталі оцінювали шляхом розтягу еталонних, непошкоджених зразків та зразків, вирізаних з труби після тривалої експлуатації, у розривній машині з реєстрацією навантажень та подовження, а також параметрів акустичної емісії (АЕ).

На відміну від світової практики [1–3], технологія оцінки стану матеріалу, розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [4, 5], базується лише на отриманні даних щодо АЕ активності матеріалу та параметрів навантаження, у той час як більшість відомих досліджень потребують багатоступінчастої процедури оцінки, у якій методу АЕ відведено роль початкового ступеня, на якому визначають АЕ активність на окремих ділянках та координати цих ділянок. Надалі вказані дослідження потребують додаткового вивчення матеріалу на ділянках, визначених методом АЕ як небезпечні. Ці дослідження включають вирізання зразків-свідків та вивчення їх механічних властивостей з подальшим розрахунком коефіцієнтів

інтенсивності напружень, або, як альтернативу, використання додаткових методів неруйнівного контролю, перш за все ультразвукового (УЗК), за допомогою яких визначають форму та розміри дефектів, а надалі знов таки виконуються розрахунки механічних властивостей з урахуванням форми знайдених дефектів і вирахуванням зазвичай тих самих коефіцієнтів інтенсивності напружень, і на цьому показнику базується аналіз стану матеріалу. Така багатоступінчаста оцінка, по-перше, є досить складною у виконанні, по-друге, не дозволяє оцінити стан матеріалу у реальному часі.

Системи типу ЕМА кількох поколінь, розроблені у ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, мають вбудовану технологію оцінки стану матеріалу у реальному часі з прогнозуванням руйнівного навантаження, яка базується на розпізнаванні образів [4–6]. Це дозволяє суттєво прискорити якісну та кількісну оцінку стану без використання додаткових методів з нормованою точністю (похибка у межах $\pm 15\%$) та ймовірністю 95%. У даній роботі показані, зокрема, результати прогнозування руйнівного навантаження під час випробувань зразків на статичний розтяг.

Результати отримуємо при розтягуванні зразків зі сталі 17Г1С на машині Р20. На рис. 1 представлені схема навантаження та розташування зразка у розривній машині.

Представлена на рис. 1 схема є універсальною для більшості АЕ випробувань зразків, включаючи температурні. Нижче наведено діаграми показань АЕ приладу під час розтягування типових зразків з матеріалу у стані постачання та зразків

Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>, Гур'янов О.М. <https://orcid.org/0000-0001-9566-1706>

© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.М. Гур'янов, 2023

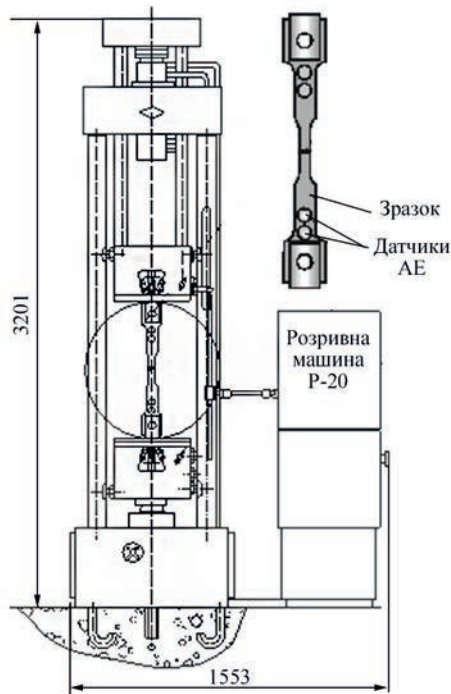


Рис. 1. Зразок та схема його встановлення в машині Р20

з пошкодженого матеріалу, вирізаних з труби після 15-ти років транспортування газу. АЕ системи типу ЕМА можуть у реальному часі та під час наступних повторювань проведених вимірювань на комп'ютері надати досить велику кількість параметрів, зокрема:

1. Зовнішні силові поля: у даному експерименті P – поточне навантаження, кг; e – подовження, мм.

2. A – максимальна амплітуда найбільшої у даний час події, що розглядається, мВ, умовно характеризує об'єм, що утворив дефект під час його динамічного розвитку.

3. Rt (W) – час наростання найбільшого у сумі подій цього часу чи його тривалість, мкс, характеризує зміцнення матеріалу внаслідок деформування.

4. O – кількість осциляцій у події АЕ, характеризують кількість пошкоджень, що виникли на даний момент часу.

5. A_c – сумарна амплітуда подій АЕ за час випробувань, дБ, характеризує загальний обсяг пошкоджень, що утворилися.

6. O_c – сумарна кількість пошкоджень у матеріалі за аналізований проміжок часу, що визначається за сумою осциляцій подій АЕ.

7. N_c – накопичені в процесі руйнування події АЕ, характеризують загальну кількість пошкоджень, які виникли за проміжок часу, що розглядається, може не збігатися з O_c .

8. A^2 – характеризує енергію, витрачену на утворення дефекту, Дж.

9. A_c^2 – характеризує сумарну енергію АЕ, витрачену на руйнування зразка, Дж.

10. n – активність АЕ за вибраний момент часу, 1/с.

11. N – сума подій в аналізованій час, характеризує кількість дефектів, що виникли у часі, може збігатися з O_c .

12. X, Y – опосередковані із заданою ймовірністю координати суми подій, які виникли в момент часу, що розглядається, на певній ділянці зразка або конструкції, мм. Розмір ділянки визначається автоматично залежно від розмірів об'єкта контролю та схеми розташування датчиків АЕ.

Ураховуючи те, що достатньо показовими можуть бути не обов'язково всі перелічені параметри, у вікні локаційної антени та побудованих графіках будуть розглядатися такі параметри як P, e, A, Rt, n, N, X . Вони забезпечують повну картину процесу накопичення пошкоджень під час випробувань і дають наочну демонстрацію змін властивостей у пошкодженому матеріалі порівняно з металом у вихідному стані.

Окрім сказаного вище, системи типу ЕМА мають функціонал, що дозволяє у реальному часі та після повторного перегляду проведених вимірювань на комп'ютері прогнозувати руйнівне навантаження, результати якого також надані у цьому дослідженні.

На рис. 2 представлено екран локації програми ЕМА з миттєвими значеннями АЕ параметрів, що виникли при випробуванні зразка зі сталі 17Г1С у стані постачання. У цей момент у вікні представлено такі дані:

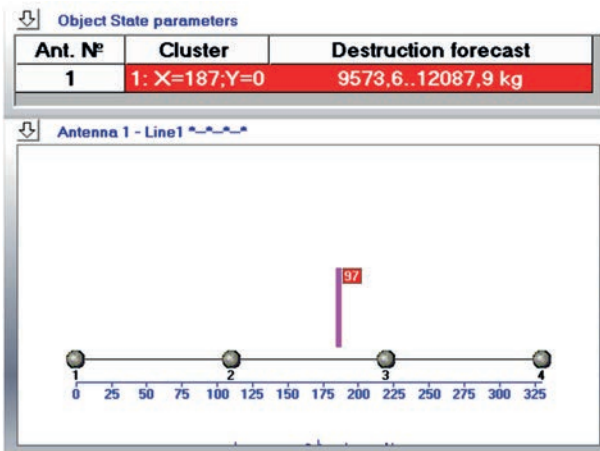


Рис. 2. Вікно локації програми ЕМА з АЕ даними, накопиченими під час процесу випробувань зразка у вихідному стані

1. Вгорі ліворуч надані координати кластера (Cluster), що вказують на прогнозоване місце руйнування. По мірі навантаження зразка координати уточнюються.

2. Вгорі праворуч надано прогнозоване руйнівне навантаження (Destruction forecast) у діапазоні 9573...12087 кг, що відповідає реальним даним, зафіксованим апаратурою. Слід зазначити, що прогнозоване значення руйнівного навантаження з'явилося у вікні при навантаженні, що становить приблизно 30 % від дійсного руйнівного, яке дорівнює 11758 кг (рис. 3). Прогнозні значення попадають у діапазон вимог до систем типу ЕМА щодо прогнозу руйнування $\pm 15\%$.

3. Нижче у вікні показано стовпчик поєднаних у кластер подій АЕ, які відображують накопичення пошкоджень у зразку із зазначенням координати X ймовірного місця руйнування. Нижче схематично показано зразок з розташованими на ньому датчиками АЕ (їхні номери та координати розташування).

4. Ще нижче показано справжні значення сигналів АЕ, що накопичуються в контрольованій ділянці. Відзначимо, що на рис. 2, який є моментальним знімком екрану програми ЕМА на момент прогнозу руйнування, АЕ події з великими амплітудами ще відсутні, вони з'являються пізніше, під час руйнування зразка.

5. Діаграма працює з початком випробувань та простежує у динаміці всю кінетику руйнування.

Детальну кінетику руйнування зразка представлено на рис. 3. Для зручності сприйняття дані випробувань розділені по двох графіках.

На графіку на рис. 3, а показано:

1. Стовпчики – амплітуди A подій АЕ у лінійному режимі вимірювань. Ліворуч на осі показано шкалу амплітуд, максимум не може перевищувати 500 мВ.

2. Лінія – робоче навантаження P . Праворуч на осі показано величину реального руйнівного навантаження 11758 кг.

3. Точки – активність n АЕ подій у часі. Праворуч на осі показано величину n , максимум якої дорівнює 18.

На графіку на рис. 3, б показано:

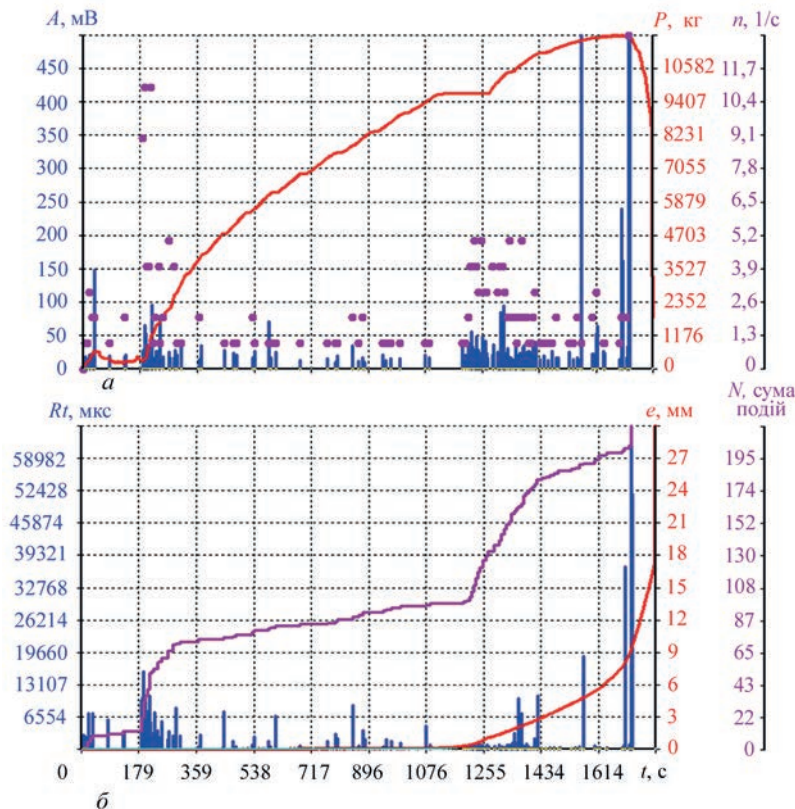


Рис. 3. Графіки розвитку процесу руйнування зразка із сталі 17Г1С у вихідному стані

1. Стовпчики – час наростання амплітуди подій АЕ до максимуму Rt . Ліворуч на осі показано шкалу Rt , максимум не може перевищувати 65535.

2. Плавна експоненційна крива, як починає зростати приблизно після 1000 с навантаження, показує подовження e . Праворуч на осі показано величину e , максимум якої дорівнює 30 мм – в момент руйнування зразка.

3. Ступінчаста крива показує поступове накопичення пошкоджень у зразку, яке відображує сума подій N . Загалом їх кількість становила 217.

Як бачимо, у вихідному матеріалі ефект Кайзера відсутній – події АЕ починають формуватися одразу ж з початком навантаження, а крива їх накопичення має типовий вигляд для непошкодженого матеріалу. Відзначимо очевидну наявність площадки плинності, при якій деформація зростає на ділянці горизонтальної кривої навантаження.

Розрив зразка характеризується сплесками амплітуд АЕ до максимуму ще до досягнення межі міцності та безпосередньо під час її досягнення.

Зовсім інша картина спостерігається для зразка, вирізаного з труби після 15-ти років експлуатації (рис. 4, 5). Параметри, що наведено на рис. 2, 4, ті ж самі, параметри на графіках рис. 3, 5 також ті самі, але характер їх суттєво змінився.

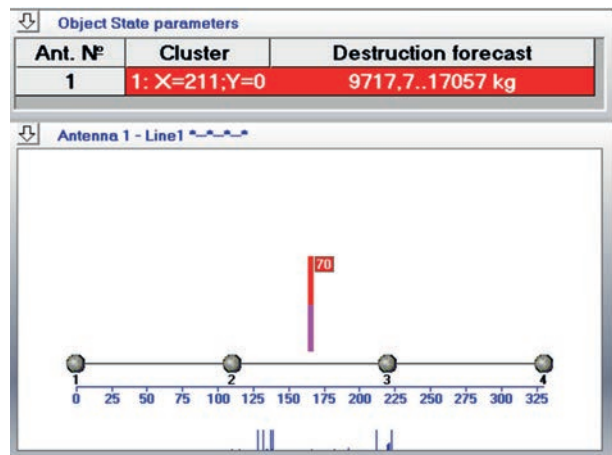


Рис. 4. Вікно локації програми ЕМА з АЕ даними, накопиченими під час процесу випробувань зразка у пошкодженому стані після 15-ти років експлуатації

Зразок зміцнився через 15 років експлуатації під час транспортування газу, про що свідчить зменшення подовження – з 30 до 15,9 мм при руйнівному навантаженні, яке виросло незначно – з 11758 до 11886 кг. Чітко простежується ефект Кайзера – на початковій стадії навантаження події АЕ відсутні.

Під час експлуатації газ поступово проникає у матеріал труби, викликаючи її поступове окрихчування, підвищення рівня жорсткості руйнування, старіння матеріалу труби [4, 5]. Це підтверджують різке зменшення параметру тривалості зростаючої частини події Rt , загальної суми подій АЕ $N = 70$

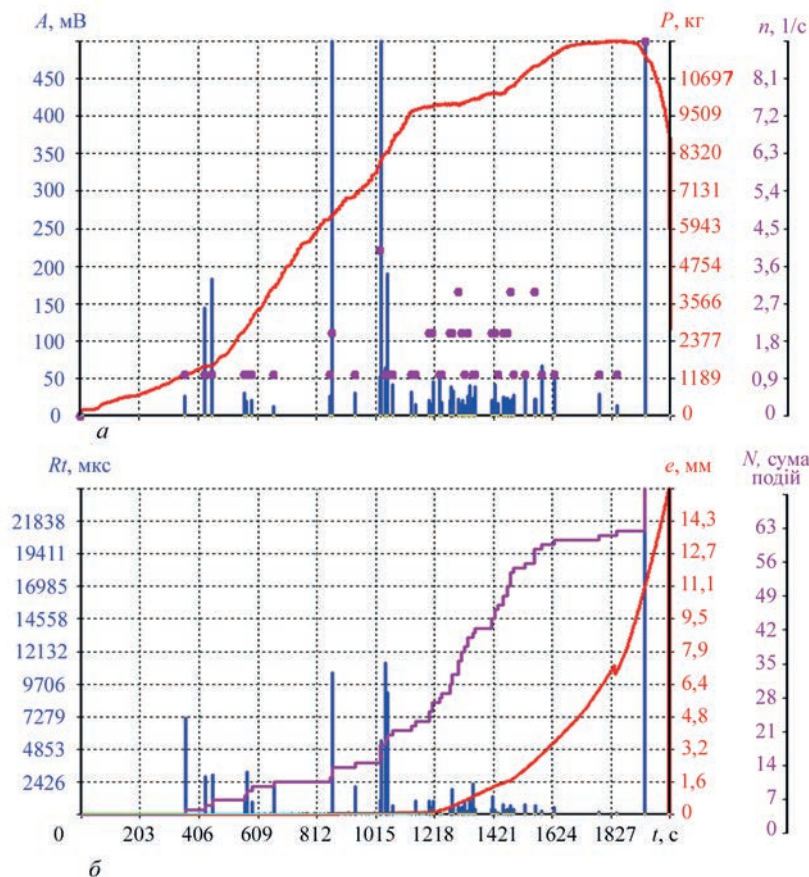


Рис. 5. Графіки розвитку процесу руйнування зразка зі сталі 17Г1С у пошкодженому стані після 15-ти років експлуатації

(у вихідному матеріалі їх було 217), тобто кількість пошкоджень у матеріалі після тривалої експлуатації різко зменшується. Збільшення відсотка подій АЕ з максимальними амплітудами відносно кількості самих подій – це результат окрихчування.

Удвічі зменшилася АЕ активність n , що також свідчить про зміцнення матеріалу після експлуатації.

Розглядаючи далі зміну АЕ параметрів у процесі випробувань, помітно, що у пошкодженому матеріалі АЕ події масово настають не одразу, а через певний час. У даному випадку це відбувається при $t = 400$ с і далі інтенсивніше при $t = 1010$ с (саме з цього моменту починається активне зростання деформації зразка), що вказує відповідно до ефекту Кайзера на те, що матеріал труби в процесі експлуатації працював під навантаженням приблизно 27 ат та що напруження для аналізованої труби (діаметр 1020 мм, товщина стінки 8 мм) складає приблизно 173,4 МПа. У той же час слід зазначити, що прогресуюче окрихчування матеріалу труби може призвести до руйнування при аварійних переміщеннях ґрунту, у якому прокладено трубу, внаслідок підмивання та зсувів.

Таким чином, показано достатню чутливість методу АЕ до змін властивостей сталі 17Г1С після тривалої експлуатації при збереженні якості оцінки стану і своєчасному попередженню про руйнування і прогнозі руйнівного навантаження.

Висновки

1. Метод АЕ показав достатню чутливість до змін властивостей сталі 17Г1С після тривалої експлуатації. Практично всі параметри АЕ, що аналізувалися, реагують якісно і кількісно на вказані зміни. Отримати відповідні якісні та кількісні показники вдалося, порівнюючи результати випробувань зразків з аварійного запасу на статичний розтяг з реєстрацією параметрів АЕ з результатами випробувань зразків аналогічної конфігурації, вирізаних з магістрального газопроводу після 15-ти років експлуатації.

2. Безперервний вплив на матеріал труби газу, що транспортується, призводить до істотної зміни низки властивостей матеріалу (див., зокрема, [4, 5]). Найсильніше змінюється пластичність, що в експерименті проявляється зменшенням часу наростання подій АЕ до максимуму, зменшенням загальної кількості подій АЕ при значному збільшенні відсотка подій з високими амплітудами. На практиці зменшення пластичності призводить до крихкості матеріалу труби та до небезпеки руйнування при виникненні аварійних переміщень труби в ґрунті.

3. Проведені випробування дозволили отримати дані про вплив попередніх, протягом 15-ти років, навантажень під час експлуатації труби зі сталі 17Г1С на зміну властивостей цього матеріалу, що проявилось у суттєвій кількісній та якісній зміні низки параметрів АЕ.

Список літератури/References

- Junyu, Chen, Yunwen, Feng, Cheng, Lu, Chengwei, Fei (2021) Fusion Fault Diagnosis Approach to Rolling Bearing with Vibrational and Acoustic Emission Signals. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 129(2), 1013–1027. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmcs.2021.016980>
- Amirabbas, Haidarpour, Kong, Fah Tee (2020) Finite Element Model Updating for Structural Health Monitoring. *Structural Durability & Health Monitoring*, 14(1), 1–17. DOI: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2020.08792>
- Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій*. Науково-технічний посібник. У 3-х томах. Київ, Наукова думка.
- Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) *Acoustic emission diagnostics of structural elements*. Sci.-Tekhn. Manual. In: 3 Vol., Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: Учебное пособие*. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures: Manual*. 5th Ed. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
- Недосека А.Я., Недосека С.А. (2021) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: Учебное пособие*. Глава 7. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures: Manual*, Chapt. 7. 5th Ed. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
- Недосека С.А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–9. Nedoseka, S.A. (2007) Forecasting the fracture by the data of acoustic emission. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 3–9 [in Russian].

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD TO EVALUATE THE CHANGES IN THE PROPERTIES OF 17G1S STEEL AFTER LONG-TERM SERVICE

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko, O.M. Hurianov

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

17G1S steel is widely used in pipelines. Change in the physical properties of this material with time depends on the conditions of gas pipeline operation and pipe environment. Material damage due to operating time by far not always leads to a change of such standard characteristics of the material as σ_t , σ_y , K1C and a number of others. At the same time, such material can be significantly damaged, but the traditional methods do not allow determining it. The objective of this work is to demonstrate the sensitivity of acoustic emission method to changes in 17G1S steel properties after 15 years of the main gas pipeline operation. Testing results show that the analyzed acoustic emission parameters change essentially under the impact of operating time, and they can be the characteristics for evaluation of the current state of the damaged material. 6 Ref., 5 Fig.

Keywords: acoustic emission (AE), physical properties, AE monitoring, mechanical testing

Надійшла до редакції 07.05.2023

A PERSPECTIVE OF THE NEEDS AND OPPORTUNITIES FOR COUPLING MATERIALS SCIENCE AND NONDESTRUCTIVE EVALUATION FOR METALS-BASED ADDITIVE MANUFACTURING

ЗАТРЕБУВАНІСТЬ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОЄДНАННЯ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА НЕРУЙНІВНОЇ ОЦІНКИ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ

M.J. Quintana*†, Y. Ji*‡, P.C. Collins*†‡§

* Department of Materials Science and Engineering, Iowa State University, Ames, IA 50011, USA

† The Center for Advanced Nonferrous Structural Alloys, a joint NSF I/UCRC between Iowa State University and the Colorado School of Mines

‡ The Center for Nondestructive Evaluation, a graduated NSF I/UCRC

§ Ames Laboratory, Ames, IA 50011, USA; pcollins@iastate.edu

This paper presents a perspective of the needs and opportunities associated with the multidisciplinary problem of nondestructive evaluation (NDE) of additive manufacturing (AM). Recognizing the multidisciplinary nature of the problem, as well as the need to bridge knowledge between the different communities, the paper is structured to provide brief backgrounds and details relevant to both communities, as well as present an assessment of the state of the art. This paper, in some respects, is meant to be a primer of the different landscapes, as well as a catalyst for making future connections. At the end, it will be clear that there is much more work to be done, but that the work that is ongoing is exciting, and the potential to exploit NDE techniques for metals-based AM is very high.

У цій статті представлено перспективи, пов'язані із задоволенням потреб та можливостями, що можуть бути досягнуті на основі застосування міждисциплінарного підходу в галузі неруйнівного оцінювання (NDE) адитивного виробництва (AM). Визнаючи міждисциплінарний характер питання, а також необхідність взаємообміну знаннями між цими різними спільнотами, стаття структурована таким чином, щоб надати стислий опис основ та подробиць, що стосуються обох спільнот, а також представити оцінку сучасного стану. Ця стаття у певному розумінні може сприйматися у якості спільної основи для різних областей, а також каталізатора для створення майбутніх зв'язків. Зрештою стане зрозуміло, що попереду ще багато роботи, але робота, яка триває, є захоплюючою, і потенціал для використання методів NDE для AM металовиробів дуже високий.

Keywords: additive manufacturing, nondestructive evaluation, materials state, measurement techniques, materials physics
Ключові слова: адитивне виробництво, неруйнівна оцінка, стан матеріалів, вимірювальна техніка, фізика матеріалів

Introduction

Increasingly, there is an awareness that the paradigm-changing nature of additive manufacturing (AM) requires a reassessment of both materials science and nondestructive evaluation (NDE). Traditionally, these technical specialties/disciplines are separated, as their role in the development, manufacture, and use of parts and components in advanced technical systems, such as vehicles, aircraft, defense, and energy systems, is notably different. However, it is also becoming clear that there is a significant opportunity if these traditionally separate subject matter experts can collaborate in the area of AM.

The causes associated with why these technical experts are separated is worth a brief discussion. First, there is the typical role that these experts play in any organization. A materials scientist plays important roles in the development and optimization of new materials, often long before those materials are qualified and become part of the design and manufacturing ecosystem. A ma-

terials engineer may then be highly involved in certain aspects of the manufacturing ecosystem, providing subject matter expertise related to process controls and destructive testing to assure specific metrics of quality (for example, mechanical testing or microscopy). The NDE experts often receive a handoff of parts and components, and then apply their skill sets to ensure that the quality of parts is known to an acceptable degree of uncertainty, monitoring parts over their lifetime in service. In certain organizations, the NDE experts can play a role in the design of the parts if philosophies such as design for inspectability are part of the organization's culture. Second, there are the types of data these different subject matter experts typically manage. For the materials scientist or engineer, the spatial domain dominates the characterization techniques, enabling the direct observation of grains, texture, precipitates, and defects. For the NDE expert, the tools invariably rely upon measurements involving time, and are thus in the frequency domain, which can be converted into the spatial domain using

various techniques. Lastly, the NDE experts are trained to use statistics (that is, probability of detection) to pursue rare events and are, by their occupation, risk averse. Conversely, the research of many materials scientists is primarily focused on the initial stages of new materials development, where it is not uncommon to imagine in an almost unbridled sense the possibilities of the new materials under study.

AM is, without question, a new manufacturing paradigm. In its most unconstrained, futuristic sense

(see Figure 1), AM is capable of producing net or near-net shapes:

- whose features span across length scales (Zhou et al. 2015; Riveiro et al. 2019; Kumar and Maji 2020; Marini and Corney 2020);
- whose topology may be topologically optimized or, emergently, generatively designed (Meng et al. 2020; Liu et al. 2018);
- whose local materials state¹, and thus properties/performance, may be controlled spatially by tuning

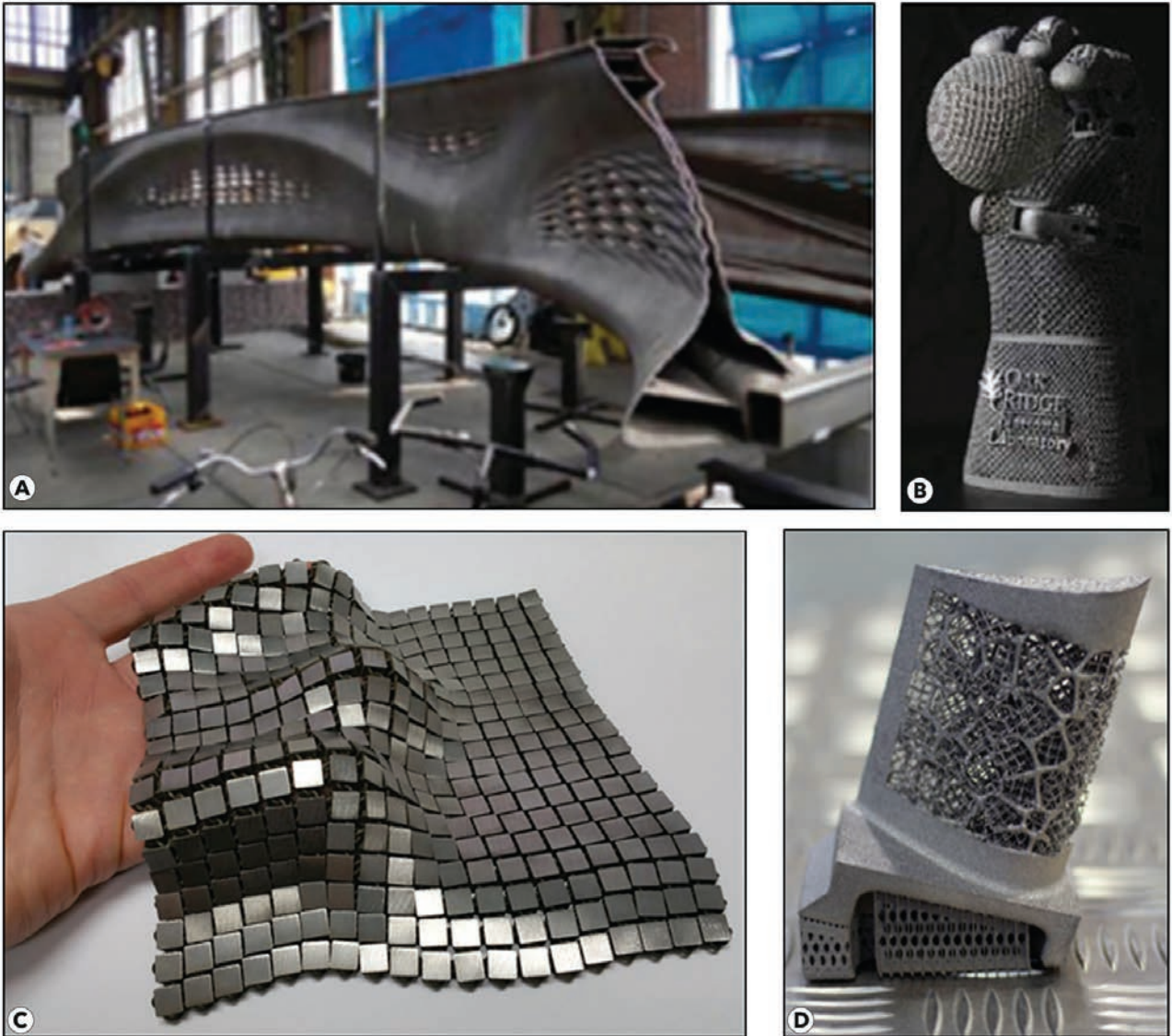


Figure 1. Wide variety of applications of AM techniques: (a) additively manufactured bridge using the wire arc additive manufacturing (WAAM) technique; (b) hydraulic hand 3D printed by Oak Ridge National Laboratory that houses electric motors and hydraulic components inside; (c) 3D-printed metallic “space fabric” designed and manufactured by NASA; and (d) AM meso-structures in a turbine blade. (Figure 1a is reprinted with permission from Feucht et al. [2020]; Figure 1b is reused from Love et al. [2013] under Creative Commons Attribution License (CC BY); Figure 1c is reused from Good and Landau [2017] under Creative Commons Attribution License (CC BY); and Figure 1d is reprinted courtesy of The University of Sheffield.)

¹ Materials state includes, but is not limited to: composition, solute distributions, microstructure (phases, their size, distribution, and correlations), crystallographic texture, and the presence of defect structures (e.g., dislocations, porosity, interfaces, cracks), across all length scales. This definition follows from materials state awareness (MSA), which is defined as “digitally enabled reliable nondestructive quantitative materials/damage characterization regardless of scale” (Buynak et al. 2008). The materials state is what a manufacturing process produces (or what evolves during service) and is also what governs the performance of the material (Buynak et al. 2008; Jacobs 2014; Aldrin and Lindgren 2018).

the process, post process, and/or composition spaces (Tammam-Williams and Todd 2017; Li et al. 2020); and

- where the local materials state may be both designed and measured during component manufacture, providing a digital record/twin that can be used to both verify/validate the process space and predict the properties/performance of the part during service.

To ensure that the material is of a sufficient quality with respect to the design metrics (such as dimensions, properties, and performance), it is necessary to develop and bring to bear new advanced metrology and evaluation tools during the manufacturing process. Among the most promising techniques are those that are based upon conventional NDE approaches, yet their applicability requires a direct connection with the materials state.

Within AM, there are new physics that operate, which scientists and engineers (and companies/organizations) need to understand. For example, as most AM techniques are fusionbased processes, the composition of the as-deposited material may be different than the composition of the starting powder or wire, through either the preferential loss of some volatile elements or the gettering of other elements from the surrounding atmosphere (Carroll et al. 2015; Sato and Kuwana 1995; Semiatin et al. 2004). And, while much is known about the dynamic nature of the AM process, other research is leading to new insights into the formation and evolution of defects (Kenney et al. 2021; Quintana et al. 2021), the importance of fluid dynamics (Tammam-Williams et al. 2015; Hojjatzadeh et al. 2019) on the molten pool and presence of any keyhole, and the competition between molecular flow of gas and the vaporization of elemental species and their combined effect on the proximal powder (Yoder et al. 2021; Ahsan and Ladani 2020). These new physics are being discovered in sophisticated experimental facilities, including high-energy beam lines, where both high spatial and temporal data can be obtained (micrometer and microsecond). The state-of-the-art measurements are beginning to be correlated with some NDE approaches, as these are promising methods to correlate the physical mechanisms associated with AM with signals that can be measured during the AM process.

It is clear that for both the realization of many of the promises of AM as well as the determination of different physical domains that the NDE approach has an important role to play. This paper consists of two primary components. First, it provides a brief review of some of what is known about the composition–process–materials state–performance relationships in AM. Elements of this first section will include some aspects of NDE techniques, as relevant. New connections between aspects of the materials state and NDE techniques will be presented. Second,

it provides a review of the applicability of different NDE techniques for both ex situ and in situ assessments of the materials state, and by extension, initial metrics of the quality of the as-manufactured materials and components.

A Review of Additive Manufacturing

Jim Williams, an internationally renowned expert on titanium, physical metallurgy, and microstructure-property relationships, as well as a former dean at both Carnegie Mellon University and Ohio State University, once provided the most pithy yet useful definition of AM: “It is the opposite of subtractive manufacturing.” In addition to its brevity, this “definition” is useful for two reasons. First, it is implicitly broad, as it does not invoke any of the prototypical details that are typically invoked yet constrict our perspective, such as the heat source (such as laser), geometries of the material that is added (such as molten pool), or incoming material type (such as powder). Second, it implies a capability that is important for the NDE community: the addition of volumes of material means that those volumes can be probed in a manner paralleling (following) the AM technique itself, providing a highly detailed perspective of the materials state.

The intellectual property history of AM can most clearly be understood based upon this definition. From a certain perspective, civilization’s earliest methods of manufacturing involved AM, as exemplified by coil pots, which permitted individuals to make clay pottery prior to the advent of the potter’s wheel. However, from a modern perspective, the earliest technical basis for metal-based AM is found in a 1920 patent by Ralph Baker (1920), who patented a method to produce decorative articles using electric arc welding to deposit beads of material onto previously deposited beads of the same metal. While this method was cited in other welding techniques in the 1960s, the next notable patent came in 1979 from Brown et al. (1979) while working at the United Technologies Corp. on a US Navy–funded project. In 1979, the inventors disclosed a process for the subsequent deposition of metallic layers that would be capable of producing bulk, rapidly solidified metals. In their work, they termed this technique “LAYERGLAZE,” and in their patent, they included the possibilities of multiple heat sources (including both electron beams and lasers) and of multiple material forms (including both powder and wire). While this was not pursued fully at the time, there is a direct connection between this patent and Sandia National Laboratories’ work on a directed energy deposition system with a powder-blown delivery system and a laser energy source known as Laser Engineered Net Shaping (LENS™), which resulted in

the first commercial company for metals-based AM, Optomec, and the first commercial sale in 1998 to Ohio State University. Other key technology patents in the 1980s that have benefited the AM community are rooted in polymeric materials, including the work of Hideo Kodama in 1981 (Kodama 1998), Charles Hull's work in stereolithography in 1984 (Hull 1984), and Charles Hull's first 3D printer in 1987 (3D Systems 2021). In the earliest days of metals-based AM using LENS systems, there were simultaneous efforts to understand the processing-property space, including the first appearance of metrics that combined key "feed and speed" parameters into energy density terms (Yin and Felicelli 2010; Hofmeister et al. 2001); understand the composition-microstructure-property space, including the use of elemental blends (Schwender et al. 2001; AlMangour et al. 2017); and produce the initial work into producing compositionally graded structures (Zhang and Bandyopadhyay 2019; Bandyopadhyay and Heer 2018; Obielodan and Stucker 2013; Balla et al. 2009). Industries and agencies began to fund work to develop the first processing-structure-property databases and began to place AM metallic parts into service (Collins et al. 2014, 2016). Within the past decade, there have been sustained efforts in developing and integrating computational tools to predict the geometry (including distortion and residual stress), microstructure, properties, and performance of AM parts (Smith et al. 2016a; King et al. 2015). The level of sophistication and availability of machines is now sufficiently robust that in 2019, it was even shown that it was possible to 3D print and "fly" a certain superhero suit (All3DP 2021).

It is difficult to bound the variations of AM systems. The scale of the systems ranges from aerosol jet-like processes, which have submicrometer resolution and are used to manufacture functional devices, to large-area AM, which produces parts with dimensions of multiple meters (Lim et al. 2012; Williams et al. 2016). While most metals-relevant AM systems involve fusion (pools of liquid metal), there are other innovative AM techniques that are solid state (such as the MELDprocess [Yoder et al. 2021; Griffiths et al. 2019, 2021]) and rely upon frictional or ultrasonic methods of joining. The heat sources for fusion-based techniques include lasers, electron beams, plasma sources, and, most recently, resistance-based techniques (such as Joule heating [Huang et al. 2014; Batista et al. 2020]). The incoming material to be added is prototypically wire or powder, but can also include thin sheet or ribbon (Kobryn et al. 2022; Hascoet et al. 2014). The atmospheres can be equally varied, ranging from vacuum to inert shield gas to deposition in controlled atmosphere glove boxes. This variability has an impact on the compo-

sition of the as-deposited materials in fusion-based systems. AM systems can be additive only, or hybrid involving the recursive operation of both additive and subtractive (machining), or other techniques, such as laser peening for local control of the residual stress (Hackkel et al. 2018; Madireddy et al. 2019). Systems can be equipped to deliver material from a single feed source or from multiple feed sources to enable the spatial control of the composition in a preprogrammed manner (Kelly et al. 2021; Schwartz and Boydston 2019). The as-deposited structures can be free form or supported using lattice structures such as in powder beds (Collins et al. 2016; Davis et al. 2009; Zalameda et al. 2013; Vaissier et al. 2019; Hussein et al. 2013). Similarly, the architectures can be designed to be fully dense, lattices, or with variations of controlled internal cavities (Juechter et al. 2018; Wang et al. 2018; Tao 2016; Gardan and Schneider 2015). Figure 1 provides a broad overview of the types of structures, systems, and processes that exist. Considering these capabilities in aggregate, and imagining future systems where the "material effectors" are selectable to achieve a particular materials state with a particular function in a particular location (a logical fusion of concepts found in AM and metamorphic manufacturing [Xie et al. 2016; Daehn and Taub 2018; Feucht et al. 2020; Love et al. 2013; Good and Landau 2017]), one can begin to conceive of new materials and desirable topologies across a range of length scales.

In general, the types of physical processes of fusion-based AM techniques involve:

- the transfer of energy from the heat source into the material, which includes consideration of the material's reflectivity to the particular energy wavelength and adjusted for particular configurations that correspond to the efficiency and redundancy of energy-impingement events;
- the heat-transfer mechanisms within the part, including radiation, conduction, and convection (Raghavan et al. 2013; Gutowski et al. 2017);
- the heat-transfer mechanisms associated with the material's thermodynamics, including phase transformations and any attending enthalpy of mixing of different species (Kumara et al. 2020; Zhang et al. 2019b; Kenel et al. 2017);
- the fluid dynamics of the liquid, including Marangoni convection, buoyancy, gravity, and other complex melt-pool dynamics (Hojjatzadeh et al. 2019; Gan et al. 2017; Khairallah et al. 2016);
- possible secondary processes in proximity to the molten pool, including capillarity, wetting, sintering, and thermal grooving (Blank et al. 2019; Mullins 1957, 1958);
- dynamics mediated by the liquid/vapor interface, including volatilization or gettering of elemental

species, and the gas dynamics, including kinetic motion of molecules (Sato and Kuwana 1995; Semiatin et al. 2004; Collins et al. 2014);

- physical processes at the liquid/solid interface, including melting and solidification;
- solid-state phase transformations; and
- the current evolution (and retention) of elastic-plastic deformation processes induced by either phase transformations, phase evolution, or transients in thermal gradients.

These processes are further complicated by the motion of the heat source, inducing so-called thermal gyrations into the part whose magnitude and frequency are functions of the part geometry and the build scan strategies (G-code). Each of these is sufficiently complex so as to merit their own treatment, and as such lies beyond the scope of this paper. However, an understanding of such broad categorizations is helpful to understand the types of measurements that will be useful in understanding key metrics of the materials state that influence the properties and performance of the material. Table 1 provides correlations between these general types of physical processes and a hierarchy of materials state parameters that govern the properties and performance of materials. For some materials, these correlations have been quantified, and the most important factors have been determined.

Important Materials State Factors

From the perspective of failure in most metallic systems (assuming a reasonable level of ductility), the principal aim is to understand the presence of defects and damage and their evolution during service. Thus, concepts such as fatigue and fracture go hand in hand with materials state awareness and any

attempt to link NDE methods with AM, whether ex situ or in situ. In AM materials, the dominant macroscopic defects include porosity, lack of fusion (LOF), cracking/tearing, and balling.

After the macroscopic defects are considered, two other variables demand our attention. The first variable, residual stress, can couple with defects, leading to unexpected failure. Explicitly, it is necessary to state that residual stress is the gradient in the local density of dislocations, which are the atomic-scaled line defects responsible for an alloy’s ductility, and which can lead to considerable strengthening of the material. Thus, a material can have a low average dislocation density but a high residual stress (large gradients), a high dislocation density but a low residual stress (small gradients), or other permutations. The second variable involves grains, their size, and any preferential crystallographic orientation, also known as texture. Texture is increasingly recognized as having an important role on the properties and performance of materials. Texture is very common in AM materials, owing to the steep thermal gradients and rapid solidification (Quintana et al. 2020; Saville et al. 2021; Kamath et al. 2021; Kunze et al. 2015; Dinda et al. 2012; Song et al. 2014), though it can be controlled through processing. The presence of periodic texture has been linked with some challenges in inspectability.

The final two broad categories, materials composition (both average and local) and the “rest” of the microstructure (typically phases, their size and distribution) are critically important to setting the baseline mechanical properties of engineering alloys (such as strength, ductility, and fracture toughness). At a minimum, there are local compositional fluctuations in AM components (Kenney et al. 2021; Collins 2004;

Table 1. Materials state variables linked to different physical processes related to AM

Physical process	Materials state variables					
	Composition		Phases (size, fraction)	Grain size/ texture	Defects (pores, cracks, lack of fusion, balling)	Residual stress
	Average	Local				
Heat input		×	×	×		
Macroscopic heat transfer			×	×		
Materials thermodynamics		×			×	
Fluid dynamics within the molten pool					×	
Fluid processes adjacent to the molten pool	×	×			×	
Liquid/vapor interface processes		×		×	×	×
Liquid/solid interface processes			×			×
Solid-state phase transformations				×	×	×
Elastic and plastic deformation, gradients		×	×	×	×	×
Thermomechanical gyrations				×	×	×
Euclidean deposition (i.e., G-code) effects		×	×	×		

Hayes et al. 2017), which can lead to variations in the elastic stiffness tensor (C_{ij}), and thus should be relevant for the NDE community.

These five categories of variables are described briefly in the following sections. Interestingly, there is a coupling between these variables that provides potential strategies to better identify them using NDE techniques. Some examples of coupling between variables will be introduced.

Defects

There are at least five types of macroscopic defects associated with a volumetric variation of some sort: spherical porosity, LOF porosity, balling, cracking or hot tearing, and fish scaling (Zhou et al. 2015; Tammam-Williams et al. 2015; Pogson et al. 2004; Sochalski-Kolbus et al. 2015). Figure 2 provides examples of these four types of macroscopic defects.

Often and erroneously, spherical porosity (Figure 2a) is assumed to indicate an existing gas pore. The correct interpretation is that the pore formed when it consisted of a gaseous species inside the pore. However, there are two sources for such gas. The first source is gaseous elements, such as argon, that are contained in some powder particles prior to deposition or that are captured by liquid dynamics from the surrounding atmosphere. These elemental species will remain in the pores and are unlikely to be healed permanently through other post-deposition processing steps (Kenney et al. 2021; Collins et al. 2016; Collins 2004; Zhang et al. 2019a; Chlebus et al. 2015). The second source is alloying elements that are vaporized and create a keyhole (Kenney et al. 2021; Hojjatzadeh et al. 2019; Collins et al. 2016; Petrov et al. 1998; King et al. 2014). These elements have surface Rayleigh instabilities whose dynamics can result in spherical pockets of vapors of the constituent metal elements that behave as a gas, resulting in spherical pores, and which then condense on the surface of the pore, leading to a pore that is under vacuum. The thermophysical properties, including density, of these two types of spherical pores will differ. There is emerging work that is using high-energy X-rays to image experiments that emulate powder bed systems to study the origins of these defects (Menasche et al. 2021; Xavier et al. 2020; Jop et al. 2020), while other work is studying the importance of Marangoni convection on the capture and retention of these particles in molten pools with an extended tail (Hojjatzadeh et al. 2019; Gan et al. 2017; Khairallah et al. 2016). Such work is in alignment with evidence that raster scan powder bed strategies are more likely to contain these spherical pores that arise from alloy constituent vaporization, while spot-scan strategies are less likely.

LOF defects (Figure 2b) are features caused by partial melting of the material by insufficient heat and

can be classified by poor overlap within layers, inadequate wetting, or shallow melt pools that do not interact with previous layers (Polonsky et al. 2020; Calta 2019; Martin et al. 2019; Cunningham et al. 2019). Scanning strategies play an important role in the creation of this type of defect. LOF defects are common in linear raster strategies, especially in those locations when the heat source reduces speed to make turns, making the zones near the edges particularly common places to observe these defects (Zhou et al. 2015). This points to the need to better understand—and potentially measure—signals of the depth of penetration of the molten pool, as opposed to the current method, which is commonly a preprogrammed function related to power and acceleration/deceleration speeds. Such information would better represent the process physics. The formation of LOF defects can also be responsible for “turbulence events” that hinder fluid flow and can promote even more heterogeneities in chemistry. Furthermore, the local cooling rates can be related to the shape of LOF defects or be identified as the cause of their formation (Kenney et al. 2021; Bayat et al. 2019; Wolff et al. 2017). NDE techniques, such as X-ray computed tomography, can be very powerful tools to first determine if LOF defects are present in the part and also their location and approximate sizes, depending upon the resolution of the technique, the depth of penetration, and other shape factors.

Excessive heat can form other defects such as those associated with the “balling phenomenon” (Figure 2c) in which liquid droplets of metal are ejected from the melt pool, cool rapidly, and then land on the melt pool (potentially becoming incorporated) or other regions of the part (Khairallah et al. 2016; Gunenthiram et al. 2018; Haghdadi et al. 2021). These droplets once they cool and if they are captured, may effectively modify the local properties (topological, mechanical, chemical, texture, thermal, etc.) and influence subsequent layers.

Cracking (Figure 2d) is a dynamic process where the rates of heat transfer and the concurrent stresses and strains due to thermal expansion/contraction, or phase transformations, compete with the ability of the material to accommodate the strains, typically defined by the ductility of the material. The problems associated with cracking are well known in the welding community and are often associated with concepts such as the “brittle range” (the temperature range that a material will still have strength but without any measurable ductility) and the nil ductility temperature. Such cracking problems exist for AM materials for two reasons. First, AM is effectively a spatially controlled welding process, with the same physics, although with different degrees of severity. Second, the 3D nature of the builds often results in thermal cool-

ing differentials, where the base plates are at a colder temperature and result in higher heat extraction rates and degrees of thermal cycling for the first layers of a build, which reduces as the builds get to be larger/taller, and further removed from a “cold” substrate relative to the molten pool. In addition to these conventionally understood cracks, differences in the local material’s state and porosity levels (whether intentional or not) will result in changes in heat flow and will lead to gradients in stresses and strains that can lead to local cracking, even in otherwise ductile material.

The final defect discussed in this review is the so-called “fish scaling” (Figures 2e and 2f). This defect is observed in the planes parallel to the build direction and are a result of variations in solute concentrations or chemical variations in the melt pool, or variations in precipitate formation and morphology (Sochalski-Kolbus et al. 2015; Tang et al. 2015; Brandl et al. 2012). This is typically a result of solidification processes, such as solute rejection in columnar and/or dendritic solidification, and/or solute trapping for fast-moving solid-liquid interfaces. During destructive metallographic analysis, this fish scaling can be used to distinguish individual melt pools. This defect is also a discontinuity in properties such as the local elastic stiffness tensor (C_{ij}), density, composition, and other aspects of the material’s state. The ability to measure these using any NDE method will be limited in many respects, as the wavelength of the measurement devices is much larger than these local variations.

Texture

In polycrystalline materials, texture is a phenomenon where there is a preferential bias in how the crys-

tal structures (that is, atomic planes and directions) of each individual grain are arranged. Crystallographic texture has long been known to exist in traditional manufacturing processes, including deformation processes, casting/solidification, and welding. For those crystallographic textures whose origins are due to solidification, the literature is full of data and models that show a preferential growth of grains where certain crystallographic directions are parallel to the maximum thermal gradients, effectively balancing both the growth rates of the crystals and the heat transfer. Classically, solidification models and data show the [001] grain growth is parallel to the maximum thermal gradient for cubic alloys, though it can be influenced by anisotropy parameters and other crystallographic variables related to grain growth, which can even occur in the [110] direction (Chalmers 1964; Morris and Winegard 1969; Ferry 2006; Liu et al. 2013; Boettinger et al. 2000; Henry 1943; Henry and Rappaz 2000).

In AM, the process parameters such as melt-pool size, scanning strategy, and layer height influence the maximum thermal gradient, and thus are mainly responsible for texture and grain morphology, which can result in equiaxed grains (Figure 3a) or elongated columnar grains (Figure 3b) (Haghdadi et al. 2021). The [001] growth can have deviations up to $\sim 10^\circ$ to 20° from the build direction as a result of the spatially varying heat source that modifies the thermal gradient, and this texture persists with subsequent layers (Quintana et al. 2020; Saville et al. 2021; Kamath et al. 2021; Stephenson et al. 2020; Haghdadi et al. 2020; Shao et al. 2020; DeMott et al. 2021; Kumar et al.

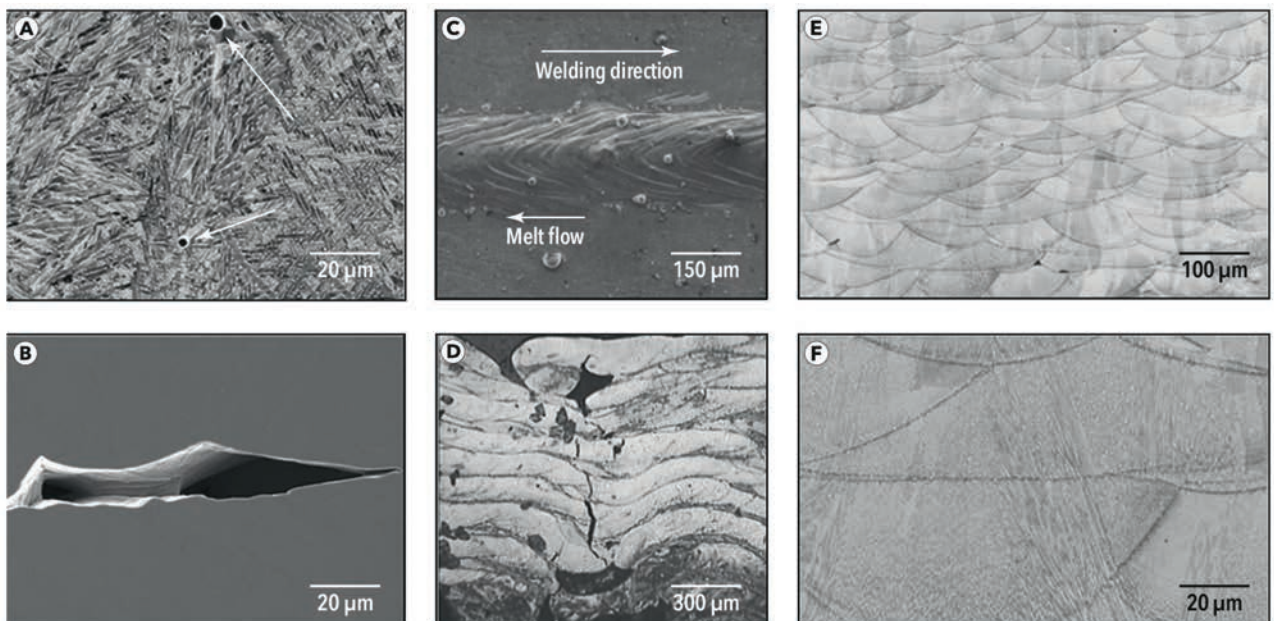


Figure 2. Defects commonly observed in AM: (a) spherical porosity (indicated by arrows); (b) lack of fusion caused by insufficient energy input to melt the stock material; (c) balling; (d) hot tearing caused by excessive energy input, creating ejecta of material and thermal stresses; and (e) and (f) fish scaling, at two different magnifications. (Figure 2a is reused from Tammas-Williams et al. [2015] under Creative Commons Attribution License (CC BY); Figure 2c is reprinted with permission from Zhou et al. [2015]; Figure 2d is reprinted with permission from Pogson et al. [2004]; and Figures 2e and 2f are reprinted with permission from Sochalski-Kolbus et al. [2015]).

2021). Texture in AM parts has been reported for alloys such as titanium-based (Bermingham et al. 2015; Vilaro et al. 2011; Wu et al. 2002; Qiu et al. 2015), nickel-based (Kunze et al. 2015; Dinda et al. 2012; Bi et al. 2014), and aluminum-based high-entropy alloys (Joseph et al. 2015; Sun et al. 2014), among others (Song et al. 2014; Zecevic et al. 2015). As texture is directly related to heat flow, the presence of defects such as spherical pores or LOF (Kenney et al. 2021) can modify the heat vector and the orientation of the columnar grain growth and in some cases, the columnar grains can stop at the “floors” of these defects. This local disruption is an example of a correlated microstructural feature that may help to identify defects—even those that are subsurface—in AM components.

Residual Stress

During AM processing, parts can experience cyclic expansion/ contraction during the thermal gyrations of heating/cooling, which can result in inhomogeneous and anisotropic stresses that can result in permanent microscopic domains of plastic deformation. This is known as residual stress. To be specific, residual stress refers to gradients in the dislocation densities (which accommodate stresses and lead to strains). Such residual stresses can lead to distortions, cracking, and failure (Cottam et al. 2014). Within AM deposited parts, residual stresses can vary within a layer. They have been reported to be different at the bottom of a layer to the top (Denlinger et al. 2014, 2015; Michaleris 2014; Mercelis and Kruth 2006), and have been reported to reach magnitudes such as ~400 to 800 MPa in nickel-based superalloys (Denlinger et al. 2014; Vilaro et al. 2012) or as low as ~25 MPa for aluminum alloys (Brice and Hofmeister 2013). Not surprisingly, given the gradient nature of the local stress/strain states and the typical balancing of stress states, these stresses can be either compressive or tensile in nature, depending upon location (Denlinger et al. 2015; Brice and Hofmeister 2013). Roberts et al. (2009) reported that residual stresses are directly related to thermal gradients in the melt pool, and thus can be controlled by thermal gradients by modifying the printing parameters and scanning

strategy. Such residual stresses would be potentially suitable for nonlinear NDE techniques post deposition, although it may be possible to use image-based techniques and machine learning to predict the local residual stress of a component.

Compositional Variations

In AM, compositional variations can be induced either intentionally (such as through controlled modification of the incoming material feed) or unintentionally (such as through volatility of an elemental species in the presence of a vacuum and exposed to significant superheats). In addition to these macroscopic changes in composition of the local melt pool or its surface, the complex fluid flow can convey the different compositional domains (often at flow rates of 0.1 to 1.0 m/s). In addition, for powder bed processes, it has recently been shown that the fluid dynamics are coupled with the convective forces within the molten pool, which can have a considerable influence on the local composition of the solidified material. These fluid dynamics are a function of thermal gradients in the liquid pools and are thus a function of the scan strategies (for example, raster or spot scan strategies). Of the competing fluid-flow mechanisms, Marangoni convection has been shown to be the dominant factor in raster melt pools, as it is driven by temperature gradients. Hojjatzadeh et al. (2019) defined three distinct regions in the raster melt pool: circulation, transition, and laser interaction. In comparison, spot melting melt pools would have only laser interaction regions. This difference explains why gas bubbles more easily escape the melt pool in spot melting strategies and can remain entrapped (and form pores) in raster strategies (Kenney et al. 2021; Quintana et al. 2021). In addition, this coupled effect between defects (gas pores) and compositional fields has been recently confirmed (Kenney et al. 2021), providing another possibility to relate two defects that may be interpretable using different measurement modalities.

Fluid flow, in combination with preferential elemental vaporization, is also responsible for a phe-

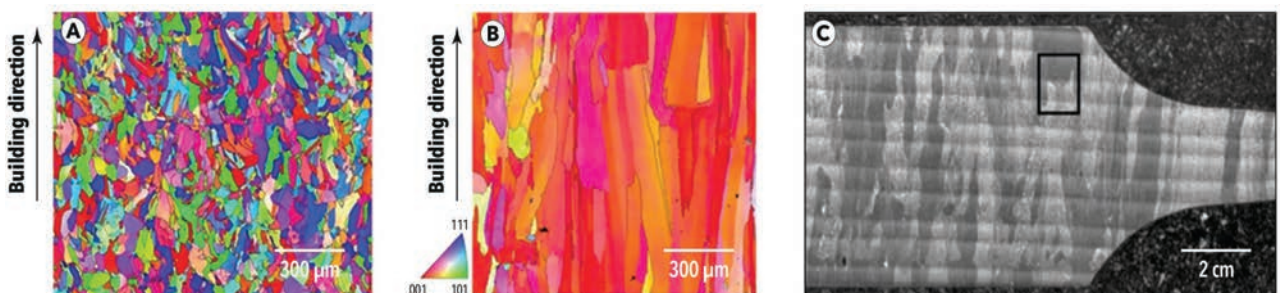


Figure 3. Texture in AM alloys: (a) inverse pole figure (IPF) plots of 316L stainless steel using 150 W laser power; (b) IPF plots of 316L stainless steel using 1000 W laser power; and (c) columnar growth and banding in a Ti-6Al-4V tensile coupon. (Figure 3a is reprinted with permission from Laleh et al. [2019]; Figure 3b is reprinted with permission from Niendorf et al. [2013]; and Figure 3c is reprinted with permission from Carroll et al. [2015].)

nomenon known as banding (Figure 3c) and can be observed in optical microscopy (usually as light and dark bands perpendicular to the build direction) and energy dispersive spectroscopy (capturing bands and chemical turbulent signatures in the presence of defects).

Phases

Structural, multicomponent engineering alloys often rely on second phases (or phase transformations) for strengthening purposes. Such alloys include $\gamma - \gamma'$ nickel-based superalloys, precipitate hardened steels, precipitate hardened aluminum alloys, and $\alpha + \beta$ and β titanium alloys. While in traditional manufacturing processes, materials experience a specific sequence of temperature excursions to optimize the phase transformations sequence and evolution of the second phase precipitates, the nature of AM forces the alloys to experience an externally governed number of thermal cycles (through the slicing algorithm) of a rather extensive range of possible temperatures, ranging from remelting to “optimal phase transformation windows” to lower temperature heating/coarsening, all of which influence crystallographic texture, grain size, formation–dissolution–formation of precipitates, phase fraction, and formation of nonequilibrium phases, including noncrystalline phases in some cases. Traditional phase transformation models are not fully valid for AM systems and require modification to incorporate these thermal cycles and their influence in the already printed layers. Compositional variations and banding can also be related to different phases in different locations within a layer, as different chemistry can be related to different regions in a phase diagram. The presence of certain phases, morphologies, phase distributions, or phase fractions can be achieved in some cases only by post-deposition heat treatments. This domain is, on the one hand, perceived as the most difficult to couple with NDE modalities because it is the least mature, and due to the size/ scale of the precipitates. However, it may be that indirect methods can be used to assess phase formation, as the precipitation of one phase will change the crystal chemistry of the parent phase, resulting in changes in the local elastic stiffness tensor, a property that is determinable using NDE techniques.

A Review of the Application of NDE Techniques for Additive Manufacturing

NDE is a collection of qualitative and quantitative testing methods that are used to evaluate certain characteristics of the subject under test without permanent damage or alteration. NDE can provide critical information regarding certain material properties, which plays an important part of providing confidence for qualification and better quality control of the material being used or produced. NDE can also

be used on a routine basis to continuously monitor mission-critical (high-value) parts and systems over their lifespans. Rigorously speaking, nondestructive evaluation (NDE), nondestructive testing (NDT), and nondestructive inspection (NDI) do not correspond to the exact same concept, but it has become an acceptable practice to use these three terms interchangeably. NDE techniques rely on electromagnetic radiation, electromagnetic wave, electromagnetic diffusion process, mechanical wave, visible and invisible light, or a combination of those physical phenomena (for example, laser induced phased array [LIPA] and electromagnetic acoustic transducer [EMAT]) to indirectly or directly examine samples. It is worth noting that NDE is much more than just “detecting cracks,” as it is very common to use NDE techniques to evaluate the properties of perfectly working subjects at the micro-, meso-, and macroscale. Based on specific physical processes and principles, NDE techniques can be broadly divided into six modalities: visual testing (VT), ultrasonic testing (UT), acoustic emission testing (AE), electromagnetic testing (ET), radiographic testing (RT), and thermal/infrared testing (IR).

Each of these modalities has different strengths and weaknesses, and their performance is bounded by their respective physical basis. In the potential application of NDE techniques in AM, there are two resolutions to consider: spatial resolution and temporal resolution. This paper considers only the first, given its immediate translatability and greater disparity between the materials science and engineering/additive manufacturing (MSE/AM) processing needs (micro- to mesoscale) and NDE possibilities. Interestingly, the temporal resolution is far more likely to have a match between the MSE/AM needs and NDE possibilities. Considering spatial resolution, for VT and UT (both wave propagation methods), the Rayleigh criteria determines their resolution limit due to diffraction limits. For VT, expected resolution will be no better than $\sim 0.2 \mu\text{m}$ for optimized optics, and this number is 0.2 mm for UT in most cases. There are intrinsic tradeoffs between metrics. For example, there is a tradeoff between resolution and depth of focus for VT, and there is a tradeoff between spatial and temporal resolution for UT. For ET, RT, and IR, the resolution limit of these modalities is mainly empirically determined by the equipment, mechanical setup, and testing samples. For ET methods, spatial resolution is no better than 0.2 mm ; for IR, this number is $20 \mu\text{m}$ (Ida and Meyendorf 2019).

Since the quality of AM parts is very sensitive to process windows and complex and competing physics, there is an obvious need for NDE on AM. It is imperative to include NDE in the AM process loop (whether in situ or ex situ) so that feedback information from NDE techniques can not only improve the

process but also play an important role in the overall quality assurance paradigm. Table 2 (Taheri et al. 2017) summarizes the maturity of NDE techniques on AM in 2017 and their evolution in the following four years.

Given that there have been significant efforts extended on the general subject of AM NDE, the remaining section of this paper will cover the latest developments regarding NDE application on AM, and the reasons why the information in Table 2 was updated.

Visual Testing

VT techniques include, but are not limited to, contour mapping, fringe projection (structured light), laser profilometry, digital image correlation, and optical imaging and tomography. These techniques are mainly used to evaluate geometric accuracy, surface roughness, and residual stress (Sharratt 2015), although there are ongoing efforts to correlate these types of data with other volumetric defects determined following completion of the depositions. One way to determine residual stresses by compar-

ing the build before and after removal from the substrate is by using a coordinate measurement machine (CMM) or other type of high-accuracy 3D scanning technology (Denlinger et al. 2014). Recent progress in computer vision may also provide another way of measuring residual stress by Eulerian video magnification (Wu et al. 2012), which is relatively low in cost because it is camera based. VT (camera based) techniques are useful for in situ AM process monitoring due to their low cost, ease of use, and numerous software support packages (such as computer vision and machine learning). The basic application of camera-based techniques in AM process monitoring is flaw detection. LOF defects can be identified from optical data by correlating multiple images with different lighting conditions and from multiple layers (Abdelrahman et al. 2017).

With the help of supervised machine learning, it is also possible to extend the detection capability of cameras beyond LOF defects (Gobert et al. 2018), although it remains difficult to differentiate LOF, porosity, cracks, and inclusions. Mechanical properties

Table 2. Comparison of potential and capabilities for application of NDE methods for defect detection and materials evaluation for finished AM parts, and the changes to these techniques in the last four years

NDE method	Proposity		Crack		Microstructural anomalies		Geometrical anomalies		Mechanical properties		Electromagnetic properties		Residual stress	
	2017	2021	2017	2021	2017	2021	2017	2021	2017	2021	2017	2021	2017	2021
	Visual	C	B ¹	C	B ¹	A		A		N		N		N
Ultrasonic	A		A		A		B		A		N		B	
Electromagnetic	B		A		D		B		N		A		C	
Radiography	A		A		C		A		N		N		A	
Thermal/infrared	D	B ⁵	B		D		B		N		N		N	

Note: A = applicable; B = possible/needs development for use in AM; C = low probability of successful application to AM; D = not applicable to AM; N = not applicable

¹ Gobert et al. 2018; ² Lu et al. 2019; ³ Sharratt 2015; ⁴ Wu et al. 2012; ⁵ McNeil et al. 2020

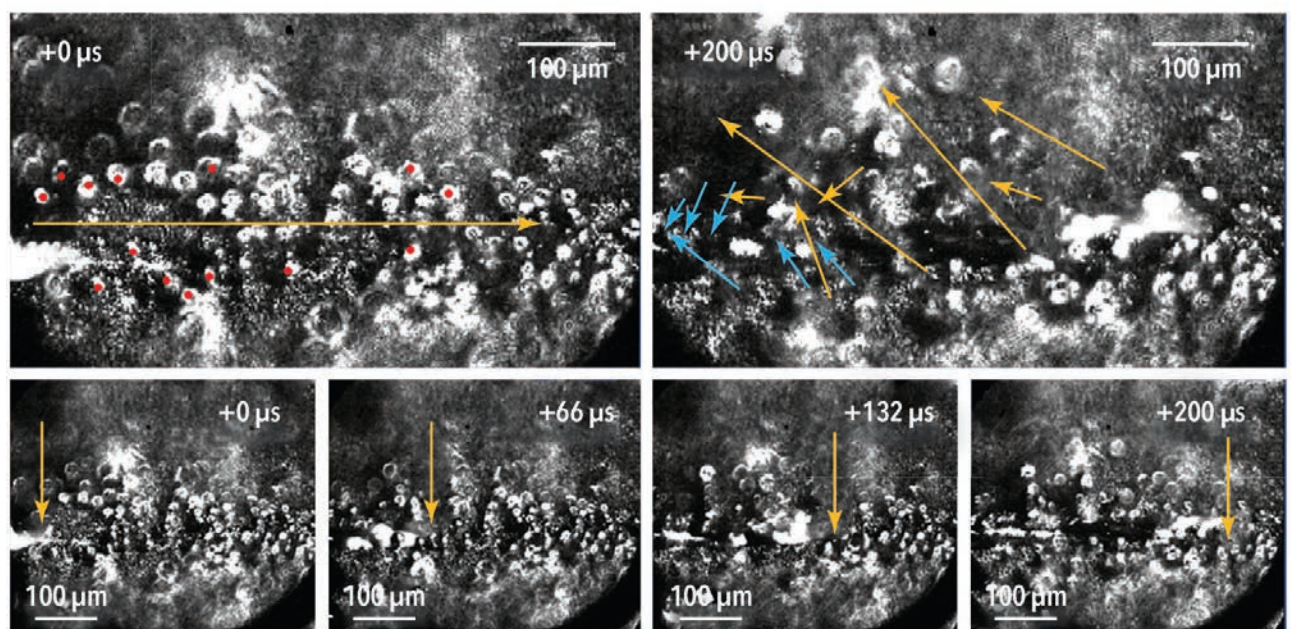


Figure 4. High-speed imaging of melt track progression and powder movement under the influence of hot vapor Bernoulli effect (reused from Matthews et al. [2016] under Creative Commons Attribution License [CC BY]).

such as density and ultimate and yield strengths can also be inferred by optical images captured during in situ monitoring of the selective laser melting (SLM) process (Lu et al. 2019).

Besides measuring material properties, optical imaging can also provide new insight into the physical phenomena that occur during the AM process. High-speed imaging with microsecond resolution can help in establishing new understandings of the competition between the volatilization of elemental species and the surrounding gas flow to regulate the dynamics of powder motion in powder bed systems away from the molten pool (Matthews et al. 2016), as shown in Figure 4. Research has demonstrated that by including spatters as the process signature driver, a significant increase in the capability to detect under-melting and over-melting conditions is possible (Repossini et al. 2017).

Ultrasonic Testing

UT is widely used for materials characterization and can be used to evaluate material characteristics such as grain size and the presence and quantity of inclusions and porosity, along with material properties such as elastic modulus and (directly or indirectly) the material’s hardness, strength, and fracture toughness (Nanekar and Shah 2003). Wave speed, attenuation, backscatter amplitude, and critical angles are commonly used metrics in UT. In the context of AM, porosity can be correlated with ultrasonic wave speeds, and the resolution limit of such a method is ~0.5% (Slotwinski et al. 2014). This presents certain difficulties for the materials scientist, where accurate measurement of porosity fractions below 0.5% may be desired. Laser ultrasound is a noncontact UT technique that induces a laser-induced thermal stress that is sufficient to generate ultrasonic waves within a sample. Laser ultrasonic methods are suitable to perform in situ or in the online inspection of parts with very complex geometry in a high-temperature

environment (Levesque et al. 2016). Recent progress in laser induced phased arrays (LIPA) (Pieris et al. 2020) has demonstrated that LIPA is a viable remote, nondestructive, UT technique capable of being implemented as part of an online inspection of AM as seen in Figure 5. It is worth noting that the LIPA system described by Pieris et al. (2020) had some difficulty sizing the defects, but that the positional accuracy was quite good. This issue of sizing may be improved by either optimizing the shear wave frequency or through more sophisticated data processing, perhaps through models that can handle multiple modalities.

Spatially resolved acoustic spectroscopy (SRAS) is an acoustic technique that uses surface acoustic waves to map the grain structure of a material (Smith et al. 2014), including local crystallographic orientation and texture. The use of surface acoustic waves has been correlated with build quality of SLM parts (Smith et al. 2016b). In some respects, SRAS results provide a high spatial assessment of the material’s state, and thus can serve as so-called ground truth when other (cheaper) NDE methods are used and, potentially, fused. Figure 6 provides an example of SRAS grain size and orientation measurement.

Acoustic Emission Testing

Acoustic emission testing (AE) is an NDE method that measures the elastic energy released in the form of acoustic waves in materials that undergo some type of change (such as plastic deformation, cracking, or rupture) (Ida and Meyendorf 2019). Passive monitoring of acoustic signatures has been performed for a directed energy process, showing variations in acoustic emission signatures that correlate with varying process parameters. Because the technique is passive, little modification is required for integration with AM systems, while exhibiting good sensitivity

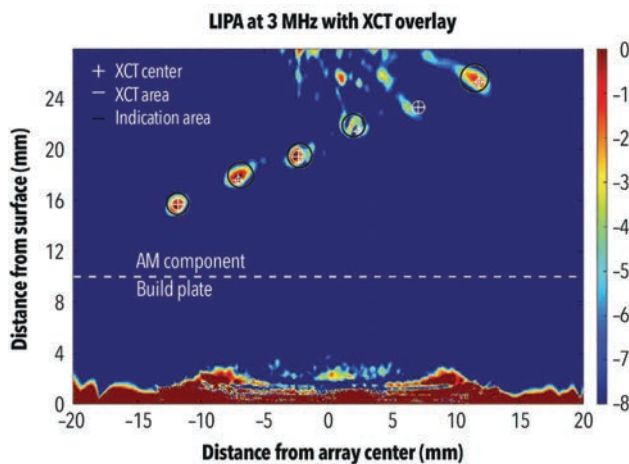


Figure 5. Normalized TFM image using shear–shear wave arrival (reused from Pieris et al. [2020] under Creative Commons Attribution License [CC BY]).

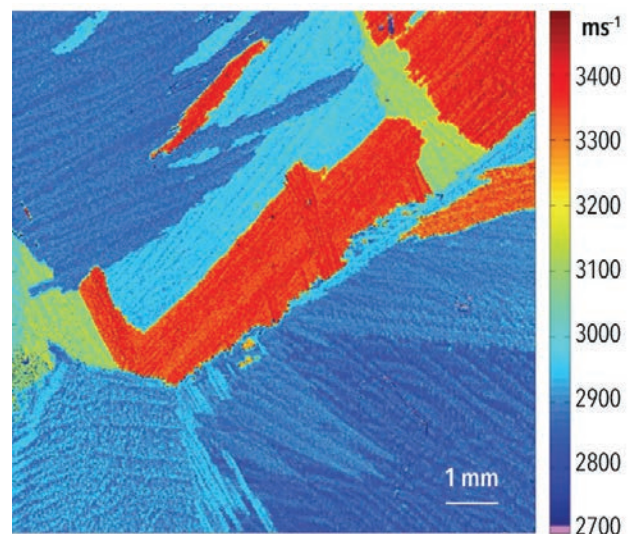


Figure 6. Image of TiLG685 showing the internal structure within the large grains. The crystallites are clearly visible, and spatial resolution is about 50 μm (reused from Smith et al. [2014] under Creative Commons Attribution License [CC BY]).

to crack-like events (Koester et al. 2018). One of the exciting demonstrations of the application of UT to AM involves the assessment of a type of hybrid AM, where the material state has been tuned through the nonuniform application of a secondary peening process (Sotelo et al. 2021). This work shows that UT can be used to spatially assess differences in the material state, providing a promising pathway for future efforts where the composition and material state may change within a single unitized structure. The attenuation map shown in Figures 7a and 7b suggests that the microstructure of these samples is mostly homogeneous, despite the known heterogeneity introduced by the AM process, and Figure 7c exhibits a pronounced cyclic behavior, which is primarily attributed to microstructural changes imparted by the hybrid process.

Electromagnetic Testing

From low frequency to high frequency, this family of NDE techniques comprises alternative current potential drop (ACPD), eddy current testing (ECT), and microwave and millimeter wave techniques as well as Terahertz measurement technology. ECT is arguably the most promising technique of these four candidates for metal powder-based AM processes because it offers a noncontact and high-speed way to inspect surface and near-surface features of samples under test. Due to the skin effect that depends on the working frequency and the material’s electrical properties, it is very difficult for ECT to probe deep features (for example, 20 mm deep cracks) for ferromagnetic materials. However, such depth measurements are possible for nonferromagnetic materials if a special coil design is used (Janousek et al. 2005). Traditional coil-based ECT systems have been proven applicable for surface and nearsurface (depth = 1.2 mm, minimum length = 0.2 mm, material = Ti64) cracks in an AM

manufacturing environment (Du et al. 2018). Advancement in magnetometer technology has helped to improve the performance of ECT in terms of minimum detectable defect size. A heterodyne ECT system based on a magnetoresistive sensor has been shown to be able to detect surface defects in the order of 100 μm (Ehlers et al. 2020), as seen in Figure 8.

Eddy current in array form (ECA) has recently been used for AM process monitoring due to its superior performance compared to its single-channel counterparts. ECA techniques can detect discontinuities, surface irregularities, and undesirable metallurgical phase transformations in magnetic and nonmagnetic conductive materials additively manufactured using laser powder bed fusion (Todorov et al. 2018).

Electromagnetic techniques in general are sensitive to bulk electrical properties of the samples under testing, which, based upon current work, makes them unsuitable for evaluating microstructural anomalies as well as mechanical properties.

Radiographic Testing

X-ray imaging (2D) and X-ray computed tomography (CT) (3D) are very powerful tools for detecting internal defects embedded inside of the sample for both in situ and ex situ scenarios. The output results

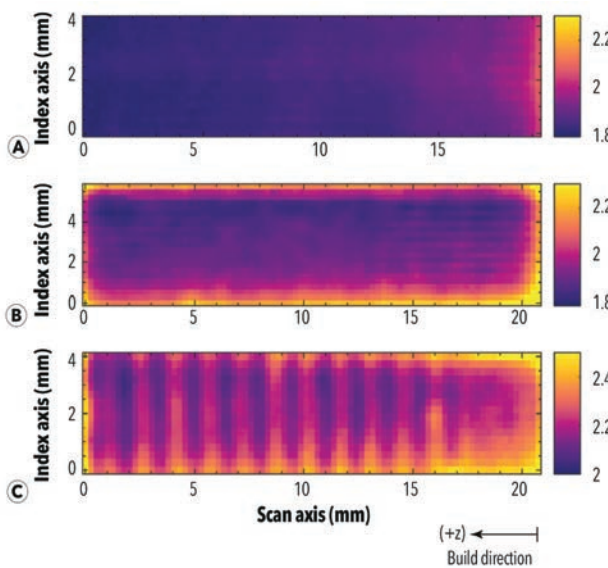


Figure 7. Attenuation, α (Np/m), maps for: (a) wrought; (b) AM; and (c) hybrid AM samples. Note the differences in scale (reprinted with permission from Sotelo et al. [2021]).

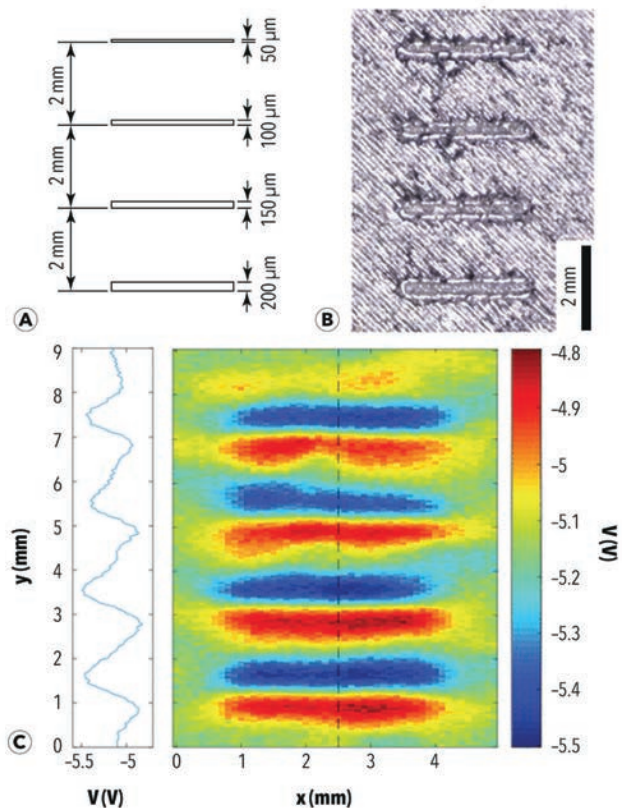


Figure 8. Heterodyne ECT system based on a magnetoresistive sensor: (a) CAD drawing of desired defect geometry (depth 200 μm); (b) microscopic picture of artificial surface defects; and (c) ET data of artificial surface defects (reused from Ehlers et al. [2020] under Creative Commons Attribution License [CC BY]).

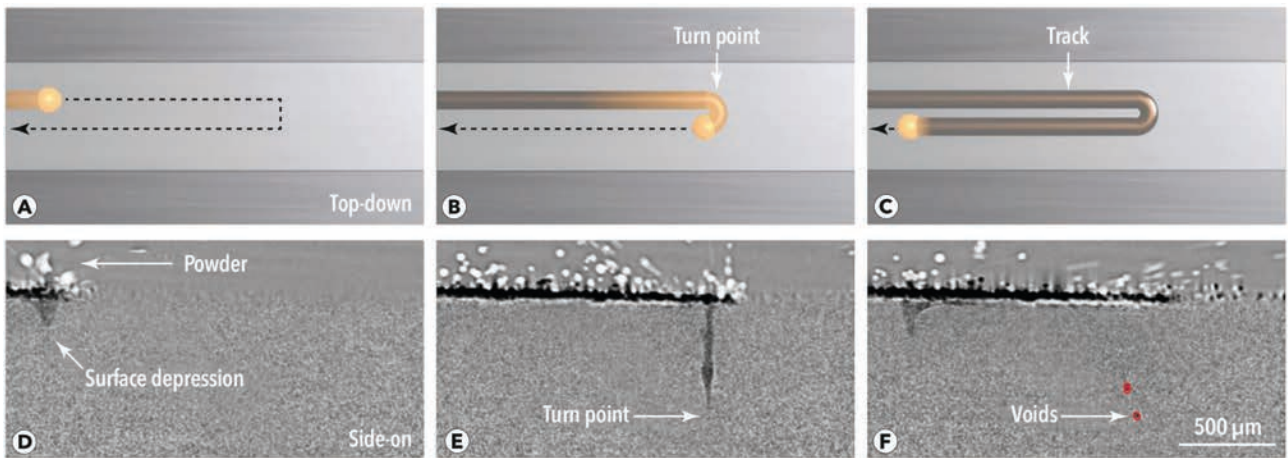


Figure 9. Illustration of the experimental geometry for laser turn point experiments: (a–c) illustration of the laser turnaround point studied here; (d–f) time difference X-ray images of a turnaround in Ti-6Al-4V performed at a laser power of 200 W and set scan speed of 1000 mm/s; (d) laser scanning from the left to right with spatter and powder above a melt depression due to vapor recoil below; (e) laser entering the turn point region and the vapor depression digs deep into the substrate; (f) laser moving right to left after the turnaround. Keyhole voids at the turnaround location are highlighted in red. (Figure is reused from Calta et al. [2019] under Creative Commons Attribution License [CC BY].)

are usually intuitive visualizations of the inspected volume, making data interpretation a relatively easy task compared with other modalities.

With its high spatial resolution, micro CT has been demonstrated to be able to detect low volume fractions of porosity (du Plessis et al. 2015), LOF, and inclusions, making micro CT an ideal tool for developing AM process improvements and ensuring the quality of certain high-value components.

The combination of the resolution and penetration depth of X-ray imaging makes it an ideal technique to image and scientifically study the subsurface physical phenomena associated with the dynamic behavior of the laser powder bed fusion process. Subsurface melt-pool dynamics, including keyhole dynamics and collapse, vapor bubble formation and motion, and the effect of laser turnaround parameters on the depth of the molten pool and associated generated defects can all be observed using imaging using X-rays (or other high-energy particle techniques, such as neutron or protons), which permits some fundamental studies to be conducted that are otherwise exceptionally difficult, if not impossible, for surface-sensitive process monitoring tools (Calta et al. 2019). Figure 9 demonstrates the possibility of using in situ X-ray imaging to observe the dynamics of pore formation at the laser turnpoint, which is helpful for designing an effective mitigation strategy.

Similar work has been done by Hojjatzadeh et al. (2019), where direct observation and quantification of melt-pool variation during the laser powder bed fusion AM process under constant input energy density is done by in situ high-speed, high-energy X-ray imaging. The results, shown in Figure 10, are important for understanding the laser powder bed fusion AM process and guiding the development of better metrics for processing parameter design.

Thermal/Infrared Testing (IR)

IR is an imaging technique that uses the thermal radiation of an object to determine its characteristics (Ida and Meyendorf 2019). Compared with other NDE methods such as UT and RT, IR is fast and can be used to inspect large areas simultaneously (in other words, scanning is not required). The measured surface radiation can reveal the existence of disconti-

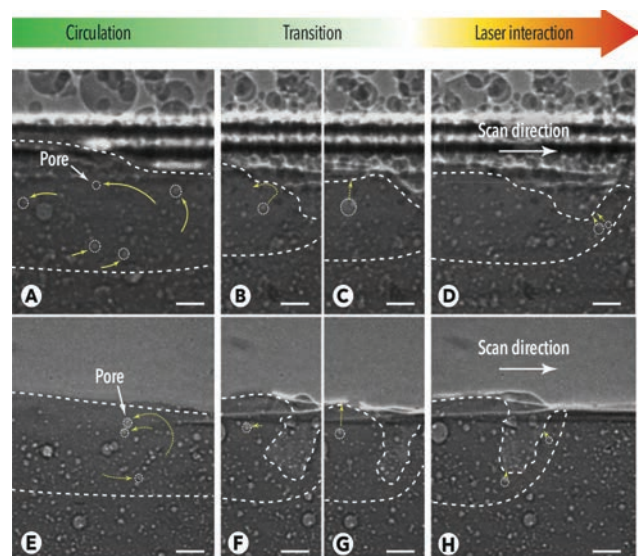


Figure 10. Single-pulse X-ray images showing pore motion within melt pools: (a–d) pore dynamics during the laser powder bed fusion process; and (e–h) pore dynamics during melting of a bare substrate. Pores follow circular patterns during circulation (10a and 10e); they present irregular movement during transition (toward the surface and escaping) (10c and 10g); or circulating in the melt pool (10b and 10f). They move toward the depression zone and escape the melt pool during the laser interaction (10d and 10h). The dotted arrows (10b, 10c, 10d, 10g, and 10h) show the future trajectories of the pores, while the solid arrows (10a, 10e, and 10f) indicate the history of the trajectories. The dashed line indicates the boundaries of the melt pool and the depression zone in 10d and 10h. (Figure reused from Hojjatzadeh et al. [2019] under Creative Commons Attribution License [CC BY].)

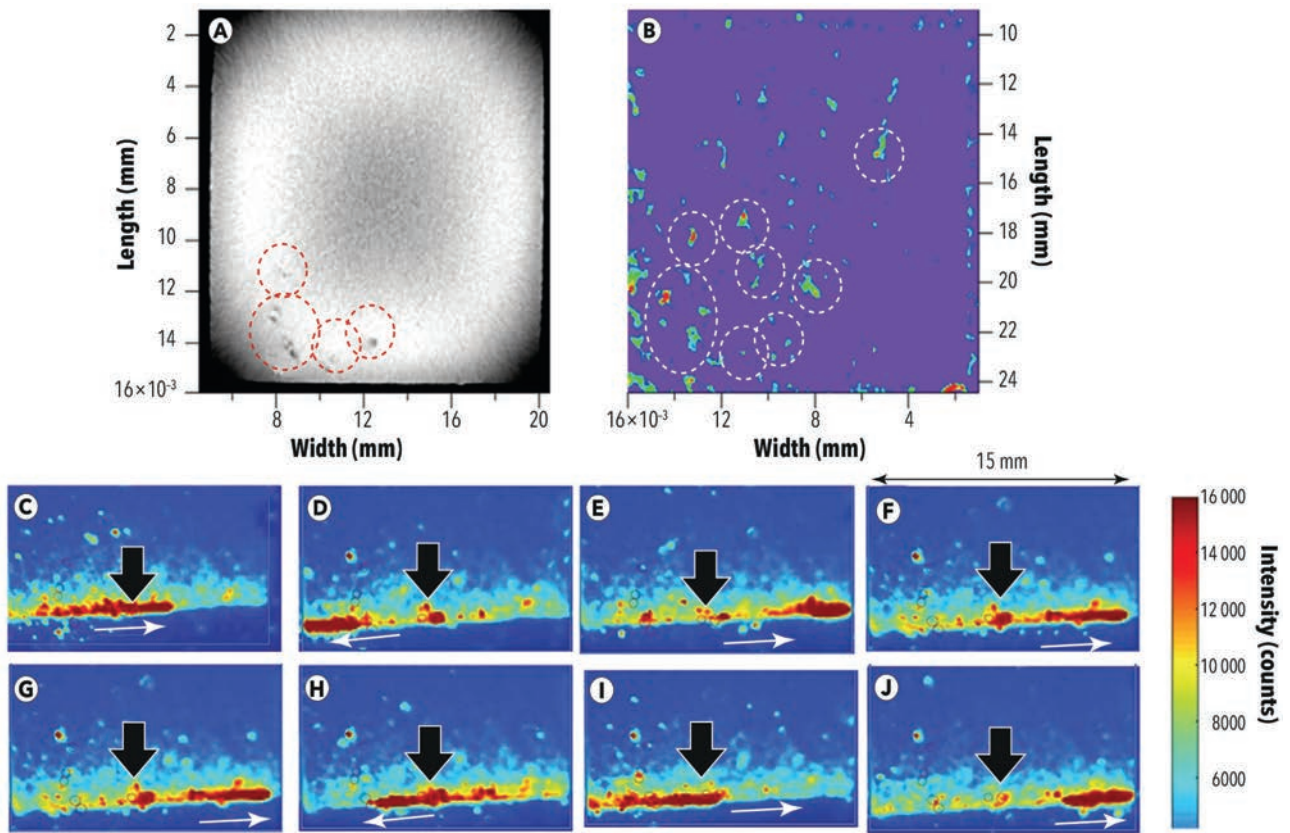


Figure 11. X-ray computed tomography (XCT) is used as an ex situ characterization technique to provide the cross comparison with data acquired by in situ techniques such as thermal/infrared testing (IR) and optical imaging: (a) ex situ XCT data for layer 309; (b) in situ optical images from the same location showing contrast, which is related to surface irregularities; (c-f) in situ IR frames from the same layer within the defect location shown in Figure 11a, captured when the laser completes the raster. (Figure reprinted with permission from McNeil et al. [2020].)

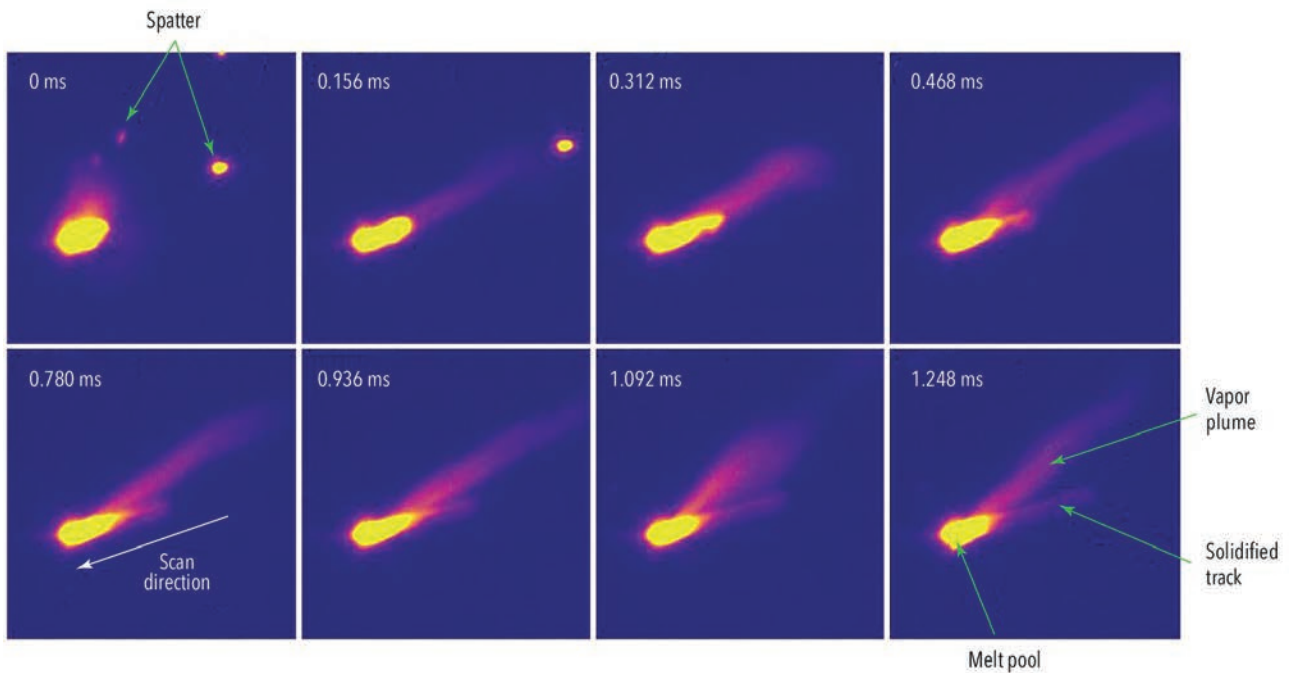


Figure 12. High-speed thermal images collected by the melt pool monitoring camera at LLNL (reused from Calta et al. [2019] under Creative Commons Attribution License [CC BY]).

nities that affect heat conduction in metal AM parts since surface temperature and its distribution depend on the thermal diffusion of the material as well as the

geometry and location of the discontinuities (Mandache 2019). Analyzing layer-by-layer thermal images in terms of the spatial and temporal variations of

thermal signatures (for example, peak intensity, decay, and number of gyrations) can be used as a surrogate for defect formation tendency during laser powder bed fusion processing (McNeil et al. 2020). Further, Figure 11 demonstrated that the in situ conclusions can be crossverified by ex situ X-ray CT (XCT) measurement results (McNeil et al. 2020).

If high-speed thermal cameras are used, it is possible to closely observe the behavior of the melt pool in a time-based series, which could provide invaluable information that helps to understand the AM process. Recent research (Calta et al. 2019) demonstrates that high-speed camera images can be used to resolve thermal emission from spatter events, fluctuations in the melt pool itself, the vapor plume, and the solidified track as it cools, as seen in Figure 12.

Conclusions

This paper has given an overview of both the materials science aspects of AM, as well as the prospects of NDE techniques to provide key information regarding the process. The fundamental physics associated with AM are complex, and the relevant length scales range from nanometers to centimeters, while the time scales range from sub-microsecond to many seconds. Relevant velocities include not only the obvious “travel speeds” of the AM process, but also the velocity of the solid-liquid interface and the convective flow within the liquid state. Each of these parameters is associated with details of the process and phase transformations that govern the materials state, including deposited composition, grain structure, texture, defects, and residual stress. While it will be impossible to directly measure all of these parameters, there is the prospect that some multilength scale processes will have measurable signatures that can be probed using NDE techniques. A variety of methods and techniques, ranging from visual, ultrasonic, and radiographic (wave-based methods) to electromagnetic and thermographic (diffusion based) have been presented, and have all been shown to offer some benefit, whether it is to understand process variations

or make discrete measurements of the materials state. This field remains active.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the support of the Center for Advanced Non-Ferrous Structural Alloys (CANFSA), an NSF Industry/University Cooperative Research Center (I/UCRC) between Iowa State University and The Colorado School of Mines, as well as the support from Center for Nondestructive Evaluation (CNDE), a graduated NSF I/UCRC.

Background expertise and related materials have been developed under multiple programs. Currently ongoing programs include research that is sponsored by the Department of the Navy, Office of Naval Research under ONR award number N00014-18-1-2794. Any opinions, findings, conclusions, or recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the Office of Naval Research. In this work and for the generation of specimens, access to the additive manufacturing equipment at Oak Ridge National Laboratory’s Manufacturing Demonstration Facility (MDF) was facilitated by the US Department of Energy’s Strategic Partnership Projects (SPP) mechanism. More information can be found at <https://science.energy.gov/lp/strategic-partnership-projects>. Research was sponsored by the US Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, under contract DE-AC05-00OR22725 with UT-Battelle LLC.

In addition, materials manufactured using LHW AM materials were produced and tested under ONR contract N00014-18-C-1026 (“Robotic Laser Additive Manufacturing System with Comprehensive Quality Assurance Framework”).

References

155 items, see <https://doi.org/10.32548/2022.me-04256>

From *Materials Evaluation* Vol. 80, No 4: 45–63

<https://doi.org/10.32548/2022.me-04256>

Copyright © 2022 by The American Society for Nondestructive Testing Inc. Reprinted with permission 01.05.2023

Асоціація "ОКО"
 OKOndt GROUP УЛЬТРАЗВУКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ. СЕРІЙНІ ТА ЗА СПЕЦЗАМОВЛЕННЯМ.

(044) 531 37 26 (27) | sales@ndt.com.ua | www.ndt.com.ua | ProNDTSolutions

XIII ЄВРОПЕЙСЬКА КОНФЕРЕНЦІЯ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

З 3 по 7 липня 2023 року у Лісабоні відбулась XIII Європейська Конференція з Неруйнівного Контролю (ECNDT 2023). Ця традиційна подія зібрала експертів, дослідників, представників промисловості та академічного середовища з усього світу, щоб обмінятися знаннями, поділитися інсайтами та обговорити останні досягнення у сфері неруйнівного контролю (НК). Конференцію відвідали понад 1200 фахівців з різних країн і більше 580 доповідачів. Учасники конференції подали 358 матеріалів, з яких 332 відібрано для усного представлення та 26 в якості стендових доповідей і презентацій на 8-ми паралельних секціях. У рамках конференції традиційно проходила виставка сучасних приладів і систем НК, у якій взяла участь 135 підприємств.

Після урочистого відкриття конференції наставала черга пленарних презентацій. Мабуть найцікавішою була доповідь Мохамеда Елькармоті (Mohamed Mohy Elkarmoty) з Каїрського університету, в якій подано результати дослідження внутрішньої структури Великої піраміди різними методами НК. Використовувались, зокрема, муографія (застосування ядерно-емульсійної плівки), георадар, ультразвукова томографія та електрична резистивна томографія. Дослідження виконувалось групою фахівців із багатьох країн, серед яких було приємно знайти українську дослідницю Ольгу Попович. У результаті комплексних досліджень виявлено дві невідомі рани-

ше аномалії: великий порожнистий простір над Великою галереєю та аномалію на північному фасаді піраміди. Дослідження демонструє можливість та обмеження кожного з використаних методів НК та їх важливість для аналізу структури піраміди.

Доповідь Тельмо Сантоса (Telmo G. Santos) зі Школи науки і технологій Лісабонського університету NOVA стосувалась останніх досягнень в НК, серед яких варто відмітити біологічний НК (bio-inspired NDT) з використанням бактеріальних клітин. Доповідь Тельмо Сантоса пояснювала цінність адаптації різних фізичних явищ для створення інновацій у сфері НК, поєднання концепцій числового моделювання та експериментів.

Тенденції і перспективні напрямки розвитку НК були розглянуті Йоханнесом Враном (Johannes Vrana). Автор звернув увагу на практичний досвід застосування інноваційних технологій і методик НК, зокрема в сфері цифрової трансформації і штучного інтелекту, та підкреслив важливість впровадження таких рішень з метою покращення ефективності та якості діагностики матеріалів і конструкцій. Пізніше Йоханнес Врана провів презентацію довідника «Неруйнівні методи оцінювання 4.0» (Non Destructive Evaluation 4.0), що нещодавно вийшов з друку. Під час нашого знайомства отримано пропозицію підготувати розділ до наступного видання цього довідника. Зазначимо, що на цій конференції технології майбутнього,



Церемонія відкриття



Виставкова зала



Співголови секції «Характеризування матеріалів» Valentyn Uchanin та Christophe Rebound

які можна віднести до НК 4.0, вперше розглядались на окремій секції.

Пленарні презентації задали тон конференції і спонукали учасників до активних дискусій. Конференція створила платформу для представників промисловості, щоб поділитися своїми останніми напрацюваннями та досвідом у галузі НК. Основні орієнтири провідних компаній зосереджені на автоматизації і портативності пристроїв НК, компактності та універсальності рішень для спрощення виїзних робіт з діагностики та оптимізації часу на виконання контролю. Також варто відзначити, що основний акцент наукових досліджень у доповідях був зосереджений на автоматизації процесів неруйнівного контролю, роботизацію діагностики та застосування елементів штучного інтелекту для аналізу результатів і прийняття рішень.

У рамках конференції відбулися засідання Міжнародної Академії НК (Academia International Research Day), Європейський Форум національних авіаційних рад з НК, комітетів зі стандартизації у галузі НК, а також засідання Світового і Європейських комітетів НК.

Засідання Міжнародної Академії НК відкрив її президент Петер Трампус (Peter Trampus), який також зробив окрему доповідь щодо перспектив Академії. Але найцікавішою, на нашу думку, була пленарна доповідь «NDE and Deep Learning: Fashion Trend or the Future» Романа Маєва (Roman Maev) з Віндзорського університету (University of Windsor) (Канада). У якості яскравого прикладу застосування штучного інтелекту на практиці автор представив технологію ультразвукового моніторингу процесу точкового зварювання. Тут цікавою була сама ключова ідея розробленої технології, коли ультразвуковий давач вмонтовується безпосередньо в зварювальну головку. Не менш



Члени Міжнародної Академії НК (зліва направо - Yoshikazu Ohara, Telmo Santos, Peter Trampus, Valentyn Uchanin, Shant Kenderian, Reza Zoughi, Serge Dos Santos, Michele Carboni, Uwe Zscherpel, Elena Jasiuniene, Dr. Sajeesh Kumar Babu)

ефективним є використання штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, для аналізу великого масиву даних, які надходять неперервно під час реалізації процесів точкового зварювання. Ці розробки захищено, зокрема, американськими патентами № 7516022 та № 9296062, які є у вільному доступі.

Міжнародна Академія НК вислухала низку доповідей, присвячених покращенню освіти в галузі НК. На секції «International Forum on NDT Education at Universities» свій досвід представили представники Міжнародного університету Дрездена (Dresden International University, Німеччина), Університету Саарланду (Saarland University, Німеччина), Університету Ле Мана (Le Mans University, Франція), Національного інституту на-



Учасники конференції з України: М.Л. Козакевич, В.П. Міщенко, Т.М. Луценко, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко

укових досліджень в регіоні Вал де Луара (INSA Centre Val de Loire, Франція), Університету Цзінхуа (Tsinghua University, Китай), Дослідницького центру неруйнівного контролю Великої Британії (United Kingdom Research Centre for NDE, Велика Британія), Університету Штату Айова (IOWA State University, США), Національного інституту наукових досліджень (INSA, Франція), Індійського інституту технологій (ІІТ, Індія). Було обговорено досвід створення та розвитку міжнародних магістерських освітніх програм з НК, розглянуто стратегії розвитку програм навчання в різних країнах, діяльності організацій і розвитку навчання з НК на університетському рівні. Загалом було визнано, що існуючі освітні програми є недостатніми для покриття потреби в якісних і компетентних кадрах для сучасної промисловості та технічного сектору. Враховуючи постійний науково-технічний прогрес і розвиток суспільства, важливість НК зростає, оскільки це – необхідна складова частини забезпечення безпеки та надійності матеріалів, конструкцій, техніки та пристроїв.

На виставці обладнання були представлені сучасні засоби, пристрої та методики контролю. Провідні компанії у галузі НК (Rohmann, Olympus, Evident, ETherNDE, Trac, Eddyfi Technologies, Karl Deutsch) представили найновіші розробки, надаючи учасникам можливість ознайомитися з інноваційними рішеннями та взяти участь в інтерактивних демонстраціях. Україну на виставці представляла група фахівців ПАТ Асоціація «ОКО» (Oko NDT Group) на чолі з Луценко Т.М. Виставка створювала також умови для обговорення можливої співпраці. Зокрема, така можливість обговорювалась нами з представниками фірми EXTENDE, яка має суттєві досягнення з моделювання задач НК. Йшлося, зокрема, про моделювання за допомогою програми CIVА вихрострумівих перетворювачів подвійного диференціювання та імпульсного варіанту вихрострумівого методу.

Науковців України на конференції представляли автори цього матеріалу Учанін В.М. (Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України) та Лисенко Ю.Ю. (Київський політехнічного інститут імені Ігоря Сікорського), які завдяки підтримці колег з Італії і Болгарії знайшли ресурси для участі в конференції незважаючи на військовий стан і фінансові реалії. Українське Товариство НК та технічної діагностики офіційно представляв Казакевич М.Л. Протягом усієї конференції науковці від України демонстрували високу активність, намагаючись компенсувати нечисленність нашої делегації.

Учанін В.М. виступив з доповіддю «Eddy Current False Indications in Austenitic Steel and Titanium Alloys Heat Exchanger Tubes Activated by Stress» (співавтори Дж. Нардоні, Д. Нардоні та М. Ферольді). Доповідь було заслухано на секції «Materials Characterization», де Учанін В.М. виконував за сумісництвом функцію головуючого та модератора. У роботі міжнародного колективу проведено аналіз хибних індикації під час вихрострумівого контролю труб теплообмінників із аустенітної сталі та титанових сплавів, які пов'язані з магнітними включеннями різного типу. Показано, що додатковим джерелом таких включень є мартенситні перетворення, які можуть мати місце в аустенітних сталях і деяких титанових сплавах. Такі мартенситні включення мають магнітні властивості на відміну від матеріалу в стані постачання. Запропоновано методичні процедури, які дозволять розпізнавати сигнали від реальних дефектів і сигналів, пов'язаних з допустимими магнітними включеннями. Крім того, представлено оригінальну технологію виявлення тріщин в трубках складної форми, коли мартенситні включення в пластичній зоні вершини тріщини є ознакою дефекту та можуть бути виявлені з високою селективністю на основі гармонічного аналізу вихрострумівого сигналу.

Лисенко Ю.Ю. представила доповідь «Analysis of formation processes of informative features in eddy current probes with pulsed excitation mode» (співавтори Куц Ю.В., Учанін В.М. і Протасов А.Г.), у якій на основі моделювання розглянуто умови формування осциляційного режиму імпульсного вихрострумівого контролю та можливість виділення з отриманих сигналів інформаційних ознак, пов'язаних з різними характеристиками об'єкта контролю.

Казакевич М.Л. представив доповідь «Creation and Non-Destructive Control of Electric Heating Elements of the Aircraft Icing Prevention System» (співавтори Семенець О.І., Казакевич В.М., Кондратюк А.С., Чирва О.О., Шестаков О.О. та Кутко Г.А.), у якій розглянув питання створення електричних нагрівальних елементів для запобігання обледеніння авіаційних конструкцій та особливості їх НК.

Конференція в Лісабоні продемонструвала останні досягнення НК і тенденції його розвитку, сприяла обміну знаннями та формуванню нових творчих проектів, метою яких є забезпечення високої якості продукції у різних галузях промисловості та підвищення надійності експлуатації критичних об'єктів сучасної техніки.

Наступна XIV Європейська конференція з НК відбудеться у Вероні в 2026 році.

Матеріал підготували В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко



ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ МУЗЕЙ імені БОРИСА ПАТОНА (до 25-річчя заснування)

Державний політехнічний музей імені Бориса Патона (ДПМ) при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ) – єдиний загальнотехнічний музей в Україні.

Музеї науково-технічного профілю з'явилися в Україні наприкінці XIX століття (Педагогічний музей у Києві, Музей в університеті Св. Володимира та ін.). У 1902 р. було створено Інженерний музей при КПІ.

У 1981 р. в Переяслав-Хмельницькому державному історико-культурному заповіднику було створено Музей видатного вітчизняного винахідника М.М. Бенардоса, в якому один з 6-ти залів – зал «Історія зварювання» площею 100 м² – наповнено переважно обладнанням і зразками продукції, отриманими від ІЕЗ. Сюди за сприянням міністра монтажних і спеціальних будівельних робіт В.З. Борисовського було перенесено конструкції Паркового мосту з Петровської алеї (побудованого у Києві за проектом Є.О. Патона у 1912 р.). З 1982 р. секція пам'яток науки і техніки (керівник О.М. Корнієнко) Українського товариства охорони пам'яток історії та культури (УТОПІК) почала розміщувати прилади та зразки техніки в краєзнавчих міських і районних музеях, в музеях Історії Другої світової війни (у Києві), Історії України. В Музеї історії Києва у

1982-83 рр. співробітниками ІЕЗ було оформлено окремий зал науки площею 40 м².

У 1991 р. секція УТОПІК за рішенням Державного комітету України з питань науки і технологій отримала грант у конкурсі «Розбудова України» і виконала проект «Розробка концепції і тематико-експозиційного плану Музею науки і техніки України». Ідея та матеріали зі створення комплексу науково-технічних музеїв України були схвалені державною комісією. Президент Академії наук України (тепер Національна академія наук України) Б.Є. Патон розглянув концепцію та підтримав пропозицію створити Центр пам'яткознавства (ЦП) АН України і УТОПІК для розвитку музеєзнавства, наукового супроводу та керівництва створенням комплексу, здійснення досліджень у галузі пам'яткознавства та охорони культурної спадщини України. Цю пропозицію було затверджено 23 травня 1991 року спільною постановою № 151 Академії наук України і Українського товариства охорони пам'яток історії та культури. На вимогу УТОПІК Постановою Ради Міністрів УРСР № 176 від 9 липня 1990 р. ливарному крилу шостого корпусу КПІ, де ще збереглася вагранка 1905 р., було надано статус «Пам'ятка історії України». За обладнанням цей музей був єдиним в Україні і другим в Європі (після Угорщини). Проте робота з перетворення його на



повноцінний музей не починалася, відвідувачів не приймали.

ЦП підготував необхідні документи та звернувся до Президента України з пропозицією про створення комплексу музеїв у складі Переяславського заповідника і галузевих музеїв у відповідних регіонах України. Водночас академік Г.С. Писаренко у травні 1993 р. надсилає листа про необхідність заснування Національного політехнічного музею України. Ні НАНУ, ні міська влада не змогли знайти приміщення під такий музей. Поки вирішувалось питання, міністр освіти та науки України М.З. Згуровський (з квітня 1992 р. — ректор КПІ) пропонує надати під експозицію музею шостий учбовий корпус КПІ, де вже був Ливарний музей. Положення про ДПМ при НТУУ «КПІ» було затверджене 29 січня 1996 р. Створення музею було забезпечено необхідним фінансуванням. Відкриття ДПМ було заплановано на святкування 100-річчя КПІ.

Директором і науковим керівником ДПМ за пропозицією Б.Є. Патона було призначено доцента зварювального факультета КПІ Є.О. Коршенка. Ще студентом він цікавився історією техніки. А у 1980-х роках, окрім роботи на кафедрі зварювання, читав лекції на кафедрі історії науки і техніки (декани: член-кореспондент АН УРСР Г.В. Самсонов, з 1982 р. — к.т.н. О.М. Корнієнко) у Київському університеті науково-технічного прогресу. Є.О. Коршенко з ініціативою, уважно поставився до роботи в музеї. Б.Є. Патон, ознайомившись із тематико-експозиційним планом, вніс у перелік основних напрямів науково-технічного прогресу і свої пропозиції. Згідно з сучасними вимогами музеєзнавства, відповідно до пропозицій Б.Є. Патона та напрацюваннями ЦП було створено методологічну основу, розроблено концепцію розвитку музею і положення про музей. Доповідь Є.О. Коршенка було заслухано та схвалено на засіданні вченої ради НТУУ «КПІ» 4 грудня 1995 р. Підрозділи КПІ зобов'язали взяти участь у збиранні музейних експонатів. Б.Є. Патон розпорядився забезпечити експонатами установи академії. В ІЕЗ заступник директора академік Л.М. Лобанов керував створенням розділів зварювання та електрометалургії.

Державний політехнічний музей налічує сім розділів з історії КПІ та тринадцять напрямків техніки, а саме: авіація і космонавтика, електроніка, електрозварювання, енергетика, інформатика, корисні копалини, машинобудування, металургія, приладобудування, промислові технології, радіотехніка, телекомунікації, транспорт. Історії КПІ присвячені експозиції двох залів. Тут розмішені матеріали з проектування та перших будівельних робіт, «генеалогічне древо КПІ».

В експозиції про видатних вчених, які вчилися і працювали в КПІ, зокрема змістовно показана діяльність академіка Євгена Оскаровича Патона. Він закінчив інженерно-будівельний факультет Саксонської королівської академії (Дрезден, Німеччина) (1894 р.) і Санкт-Петербурзький інститут інженерів шляхів сполучення (1896 р.). Є.О. Патон у тому ж 1896 р. почав викладацьку діяльність у рідному інституті та одночасно працювати у технічному відділі казенних залізниць, де проектує мости та металеві перекриття. Його оригінальні проекти отримали високу оцінку спеціалістів і замовників. З весни 1989 р. Є.О. Патон працює в Московському інженерному училищі шляхів сполучення. У 1904 р. професор Є.О. Патон був запрошений до КПІ, де у 1905 р. очолив кафедру мостів. Через рік він був обраний деканом інженерно-будівельного факультету. Особливо слід відзначити плідну роботу Євгена Оскаровича зі створення у КПІ інженерного музею, де були зібрані проекти мостів, цінні експонати і документи, фотопортрети видатних учених та інженерів. В КПІ Є.О. Патон виконав велику роботу з реорганізації навчального процесу, вдосконалення навчальних програм і планів, створення лабораторій і кабінету мостів. Є.О. Патон залучав до творчої роботи з проектування реальних споруд своїх студентів. Ряд його учнів стали відомими вченими та інженерами, керівниками промисловості. Є.О. Патон вважається засновником школи мостобудування в Україні. У 1929 р. академік Є.О. Патон організує в системі Всеукраїнської академії наук (ВУАН) кафедру інженерних споруд, електрозварювальну лабораторію та електрозварювальний комітет, на базі яких у 1934 р. створив у складі ВУАН Інститут електрозварювання — перший в світі спеціалізований науковий заклад такого профілю. А в 1935 р. він засновує в КПІ зварювальний факультет.

Великий зал музею розміщено під склепінням колишніх Механічних майстерень КПІ. Основна ідея експозиції — якомога ширше представити технічну сферу України в її сучасному стані та історичному перерізї. У музеї можна знайти відповіді на питання: коли виникли перші технічні пристрої та корисні машини, хто був їх творцями, сучасний стан техніки.

В одній з найбільших експозицій представлено історію та досягнення науки про зварювання та зварювальне виробництво. Серед експонатів ІЕЗ є праці вчених, авторські свідоцтва на винаходи, пам'ятні медалі, зразки деталей та вузлів, виконаних у різний спосіб зварювання, наплавлення, паяння. Дугове зварювання представлено зварювальним трактором і установкою для мікроплазмового зварювання, контактне зварювання — ма-



Основна експозиція займає частину шостого корпусу КПП (корпус 6А), експозиція відділу авіації та космонавтики розташована в будівлі авіаційних майстерень поруч (корпус 6Б)

кетом внутрішньотубної зварювальної машини К-700, розробленої для будівництва магістральних трубопроводів. Привертає увагу дубль апарату «Вулкан», на якому 1969 р. вперше у світі космонавтом В.М. Кубасовим проведено експерименти зі зварювання в космічних умовах на борту космічного корабля, макет випарника для ремонту космічних конструкцій, на якому у 1979 р. вперше в світі працювали космонавти В.В. Рюмін і В.О. Ляхов. У розділі «Електрометалургія» є діючий макет пічі для електрошлакового переплаву. В експозиції музею представлено розробки й інші інститутів НАНУ, зокрема Інституту механіки, Інституту проблем міцності. ІЕЗ разом з Інститутом зв'язку та управління демонструє складну параболічну антену, яка може встановлюватися у важкодоступних місцях та може застосовуватися у мобільних засобах зв'язку.

У ДПМ представлено макети суден, побудованих на верфях України. У розділі «Корисні копалини» є колекція декоративного і коштовного каміння, макети торфозбиральних агрегатів, дизельна машина МТК-13 для зварювання арматури і машина для глибокого дренажування. Багато експонатів представлено в інших відповідних розділах основного залу, у тому числі є фрагмент дерев'яного водогону, що експлуатувався на київському Подолі у XVII ст., перша в Києві телефонна станція (1886 р.), один з перших радіоприймачів М.О. Бонч-Бруевича, перші телевизор та магнітофон, електронно-обчислювальні машини С.О. Лебедева та В.М. Глушкова, планер О.К. Антонова, електронний мікроскоп, модель Хмельницької атомної станції, перший у світі п'єзодвигун (1963 р.), авіадвигуни «Мотор Січ», клістрон випускниці КПП З.М. Пасічник, акумулятори Дніпропетровського акумуляторного заводу, харківський елек-



Найбільша із залів музею займає приміщення механічних майстерень, в якій ззовні і частково всередині збереглися елементи промислової архітектури кінця 19 – початку 20 століть тромобіль на акумуляторному живленні та багато іншого. В окремому залі експонується колекція стрілецької зброї. Поруч із головним корпусом є павільйон авіаційної та ракетної техніки. На прилеглій до музею території розміщено паротяг 1954 р. випуску, танк Т-34, гармата, гвинтокрил.

З ініціативи президента Національної академії наук України Б.Є. Патона на базі Державного політехнічного музею з 25 жовтня 2001 р. розпочато цикл наукових читань «Видатні конструктори України». Наукові читання проводяться з метою збереження історичної пам'яті про визначні вітчизняні здобутки науково-технічної та інженерно-конструкторської думки, створення цілісної історичної картини розвитку науки і техніки в Україні, ознайомлення громадськості з видатними вітчизняними першопрохідниками в різних галузях науки та техніки, виховання студентської молоді на прикладах високих досягнень попередніх поколінь інженерів і науковців. Перші наукові читання були присвячені М.М. Бенардосу, Є.О. Патону, Д.К. Лоренцу (конструктору вагонів, першому, хто впровадив автоматичне зварювання під флюсом), конструкторам танка Т-34 та історії його зварювання, засновнику металургійної школи КПП В.П. Іжевському, конструкторам електротранспорту, літаків О.К. Антонову і гвинтокрилів І.І. Сікорському. Читання проводяться щоквартально, їх матеріали видаються.

Музей перетворився на визнаний науковий центр з досліджень у галузі історії техніки та технічного музеєзнавства. У музеї проходять екскурсії для всіх бажаючих. Учні шкіл та професійно-технічних училищ, студентська молодь отримують наглядну інформацію про різні галузі техніки. У музеї відбуваються виставки, деякі разом із закордонними музеями.

<https://kpi.ua/museum>
О.М. Корнієнко

МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ 2023

З 30 травня по 1 червня 2023 р. на території Міжнародного виставкового центру відбувся XXI Міжнародний промисловий форум (МПФ) — найбільший індустріальний захід в Україні, присвячений машинобудуванню. У рамках форуму пройшли виставки: Металообробка, УкрВторТех, УкрЛитво, УкрЗварювання, Гідравліка, Пневматика, Підшипники, Автоматизація і робототехніка, Підйомно-транспортне, складське обладнання, Зразки, стандарти, еталони, прилади, Безпека виробництва. Крім того, одночасно з Міжнародним промисловим форумом пройшли Міжнародні спеціалізовані виставки: PLAST EXPO UA (сировина, технології і обладнання для переробки полімерів та каучуку); ADDIT EXPO 3D (технології, обладнання та матеріали для адитивного виробництва та 3D друку). Цього року виставкові заходи, що об'єднали учасників та відвідувачів з усієї України під дахом МВЦ, стали символом непереможності, непохитності, рішучості та незламності українців та наших партнерів.

Виставки — це важливий «інструмент» відновлення та розвитку бізнесу, особливо сьогодні, коли руйнуються промислові ланцюги, що налаштовувались роками. Підтримувати економіку України, забезпечувати людям роботу та мотивувати до розвитку і, безперечно, спільно працювати на перемогу — ось що важливо у проведенні виставок саме зараз. Під час війни ЗСУ захищають нас на полі бою, а бізнеси та підприємства захищають економіку

— другу найважливішу складову для підтримки та розвитку України. Ці виставки не тільки створюють можливості для бізнесу, але є і справжнім доказом нашої здатності до співпраці та об'єднання у важкі часи. Через спільні зусилля фахівців та бізнесменів на виставкових майданчиках ми рухаємося вперед до перемог в усіх боях на всіх фронтах.

Загальна площа, на якій розмістились виставкові заходи, склала понад 7000 м²; загальна кількість спеціалістів, які відвідали виставкові заходи — 8837 чол.; загальна кількість учасників комплексу технічних виставкових заходів — 147 компаній. Була представлена продукція з 26 країн — з Австрії, Болгарії, Великої Британії, Греції, Грузії, Данії, Ізраїлю, Іспанії, Італії, Китаю, Нідерландів, Німеччини, Південної Кореї, Польщі, Сербії, Словаччини, США, Тайваню, Туреччини, Фінляндії, Франції, Чехії, Швейцарії, Японії, України. Географія компаній учасників: 95,24 % — учасники з України; 4,76 % — учасники з інших країн. По виду діяльності компаній учасників 77,72 % — імпортери, дистриб'ютори, дилери; 22,28 % — виробники.

Міжнародний промисловий форум — це завжди очікувана та визначна подія, що привертає увагу провідних промислових компаній та експертів. Цього року, незважаючи на війну, Промислового форуму вдалося зібрати провідних гравців українського машинобудівного ринку, що представили інноваційне обладнання та технології українських





та іноземних виробників. Сьогодні МПФ дав зрозуміти не лише українцям, а також нашим закордонним партнерам, що ми не просто працюємо, а покращуємо, розвиваємо, модернізуємо та адаптуємо технології під умови воєнного часу. Разом ми сила, яка здатна успішно взаємодіяти, досягати угод та долати виклики сучасності. Особливо приємно, що на МПФ були підписані угоди про продаж сучасного обладнання, яке прямо з виставки поїхало до своїх нових власників. А учасники і відвідувачі повернулись додому з новими ідеями, партнерами, замовленнями та вірою, що все буде добре.

На виставці УкрЗварювання була представлена продукція українських компаній виробників та постачальників зварювального обладнання (ТОВ «Патон Інтернешнл», ТОВ «Фроніус Україна», ТОВ «Червона Хвиля», ОДО «Зонт», ТОВ «Араміс», ТОВ «Тріада Лтд і Ко») та виробників зварювальних електродів та дротів (ПрАТ «Дніпрометиз», ТОВ «Суми Електрод», ТОВ «Велтек»).

Як і на багатьох попередніх заходах Міжнародного виставкового центру під час МПФ було представлено видавництво Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. На стенді

видавництва відвідувачі мали можливість ознайомитись з останніми розробками всесвітньо відомого Інституту в галузі зварювання, спеціальної металургії, неруйнівного контролю та отримати спеціально видані до виставки випуски журналів «Автоматичне зварювання» №5, «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» №1, «Сучасна електрометалургія» №1, 2023.

МПФ висловлює вдячність всім учасникам, відвідувачам та ЗСУ. Об'єднання зусиль дало неперевершений результат — проведення у військовий час Міжнародного промислового форуму та виставок PLAST EXPO UA та ADDIT EXPO 3D. Ці заходи безумовно дали поштовх до розвитку бізнес-середовища, налагодження зруйнованих війною контактів та стали рушійною силою до подальшого зростання української економіки. МПФ дякує всім причетним, висловлює величезну повагу та закликає не зупинятися і продовжувати працювати на користь нашої держави і нашу спільну Перемогу. Ми все можемо, тому що ми разом!

За матеріалами
<https://www.iec-expo.com.ua>

ПАМ'ЯТІ В.В. ПАНАСЮКА



Дирекція та колектив Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, з великим сумом сповіщають, що 17 липня цього року на 98-му році пішов із життя видатний учений в галузі теорії міцності матеріалів і конструкцій, один із засновників львівської наукової школи механіків-матеріалознавців, понад 40 років

беззмінний директор Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державних премій УРСР і СРСР у галузі науки і техніки, премій НАН України ім. О.М. Динника, Є.О. Патона і Г.В. Карпенка, член Ради Європейського товариства з проблем цілісності конструкцій, віце-президент Ради Міжнародного конгресу з проблем механіки руйнування матеріалів, член Європейської академії наук, нагороджений орденами князя Ярослава Мудрого V ступеня, «За заслуги» III, II та I ступенів, доктор технічних наук, професор, академік НАН України Володимир Васильович Панасюк.

Володимир Васильович народився 27 лютого 1926 р. у селі Красне на Холмщині (нині Польща). Після закінчення у 1951 році Львівського державного університету ім. Івана Франка почав працювати в Інституті машинознавства та автоматики АН УРСР (з 1964 р. Фізико-механічний інститут АН УРСР). Проїшов шлях від молодшого наукового співробітника до директора інституту.

Наукова діяльність В.В. Панасюка була присвячена дослідженням з проблем напружено-деформованих станів і граничної рівноваги пружно-пластичних тіл з тріщинами, теорії пружних тіл, фізико-хімічної механіки матеріалів і водневого матеріалознавства, що були покладені в основу теорії крихкого руйнування та міцності матеріалів, яка знайшла широке визнання й сприяла розвитку методів оцінювання довговічності матеріалів і конструкцій. Його оригінальні праці зробили вагомий внесок у формування та утвердження фізико-хімічної механіки руйнування матеріалів як нового напрямку в науці про матеріали та їх міцність.

Високу оцінку вчених та спеціалістів отримали результати робіт Володимира Васильовича з визначення залишкового ресурсу найважливіших народногосподарських об'єктів, розроблення методів підвищення міцності, якості та точності виготовлення виробів у промисловості, суднобудуванні, енергетичному машинобудуванні, будівництві.

Основні наукові результати вченого висвітлено у понад 600 публікаціях, та в 19 монографіях, серед яких перша в Східній Європі монографія з проблем

механіки граничної рівноваги твердих деформованих тіл з тріщинами. Ці праці, а також його почесна лекція на 8-й Міжнародній конференції з механіки руйнування в Києві та інші наукові результати стали вагомим внеском у розвиток та утвердження механіки руйнування матеріалів як напрямку в науці про матеріали та цілісність конструкцій. Особливе місце у його діяльності посідає керівництво створенням енциклопедичного видання – дванадцятитомного довідника-монографії «Механіка руйнування і міцність матеріалів» (1988–2009 рр.) та його синтезуюча монографія, опублікована англійською мовою у 2002 році під назвою «Strength and Fracture of Solids with Cracks».

Під керівництвом В.В. Панасюка виконано комплекс експериментальних досліджень кінетики росту втомних тріщин і побудовано базові діаграми корозійної тріщиностійкості для корпусних сталей, алюмінієвих сплавів, матеріалів енергетичного обладнання. В.В. Панасюк зі своїми учнями розробляв електромагнітні методи та засоби неруйнівного контролю фізико-механічних, електрофізичних та геометричних характеристик матеріалів і виробів. У більш короткохвильовому випадку, коли дифракційні явища стають домінуючими і за певних умов можливі високочастотні резонанси, вченими під керівництвом В.В. Панасюка було запропоновано ефективні числові методи розрахунку дифрагованих електромагнітних полів. На цій основі створено нові способи і засоби електромагнітного контролю.

Очолюваний В.В. Панасюком протягом багатьох років колектив зробив значний внесок у виконання таких важливих програм, як «Енергія-Буран», «Інтеркосмос» та «РЕСУРС». За ініціативи В.В. Панасюка в інституті створено унікальний радіофізичний комплекс для діагностики космічного простору в декаметровому діапазоні, який входить у загальноакадемічну систему радіоінтерферометрів «УРАН».

В.В. Панасюк брав активну участь у науково-організаційній і громадській діяльності НАН України, міста Львова та України, був серед тих, хто спричинився до відновлення діяльності Наукового товариства імені Шевченка у Львові.

Велику увагу вчений приділяв вихованню висококваліфікованих спеціалістів. Серед його учнів понад 60 докторів та кандидатів наук.

Володимир Васильович Панасюк назавжди залишиться прикладом відданості науці, творчої цілеспрямованості, великої працездатності та служіння на благо України.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
Редколегія журналу



**НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**

члена Європейської Федерації з неруйнівного контролю
члена Міжнародного комітету з неруйнівного контролю



ОЦІНКА ЯКОСТІ БРОНЕПЛАСТИН ЗА ДОПОМОГОЮ РЕНТГЕН-ТЕЛЕВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ

В.О. Троїцький, С.Р. Михайлов

Відомі випадки пошкодження бронеплит під час бойових дій, що супроводжуються пораненням бійців через неякісні захисні пластини. Ефективність засобів захисту потребують рентгенівського контролю їх якості. Крім співробітників ІЕЗ ім. Є.О. Патона у випробуваннях брали участь Кирило Бебко та Ігор Молодан – ініціатори журналістського розслідування. Рентгеноконтроль бронеплит проводився за допомогою рентген-телевізійної системи РТВ-4. Ця портативна рентген-телевізійна система завжди до послуг Міністерства оборони України (суцільність, витончення металу, заповнення об'ємів вибухових речовин та ін.).

Система РТВ-4 дозволяє зазирнути всередину бронеплит, визначити щільність використаного матеріалу, реальну площу броні. На моніторі комп'ютера РТВ-4 відображується інформація, яку неможливо отримати іншим шляхом, крім контрольного обстрілу. Рентген-телевізійного контролю (РТК) зазнали 23 керамічні та металічні бронепласти американських, ізраїльських, українських, польських, німецьких та китайських виробників. Ре-

Найбільш шокуючий вигляд мала пластина, яку приніс один з бійців. Вона складалася з двох частин. Те, що видно у центрі (рис. 2) – кусок металу (перевірено магнітом). Фактично корисна площа захисту склала лише 1,7 дм², тоді як вага бронеплити відрізнялась від норми тільки на 10 г. Складається враження, що метал дивної форми у центрі просто для ваги, а навколо нього рихла маса без будь-якого захисту.

Часто виробники оголошують більший розмір, а реальна площа захисту менша на 10...25 %. Такі плити було виявлено як у китайських, так і у інших зразках. У Міністерстві оборони України немає процедур перевірки фактичних захисних розмірів плит.

Плити лише відстрілюються у лабораторіях з відстані не ближче 7 см до краю, тобто відстрілюється тільки центральна частина. По периметру 5...6 см від краю плити ніяк та ніким не контролюється. У цій зоні ніяких перевірок не передбачено!

Наступною проблемою, яку було виявлено, є великі зазори між керамічними пластинами дея-



Рис. 1. Зовнішній вигляд пластин та система рентген-телевізійного контролю їх якості в ІЕЗ ім. Є.О. Патона

зультати були неочікуваними та навіть шокуючими.

Зазначена фактична площа плит (ФП) і корисна площа захисного елемента (ЗЕ), що запаяні всередині. Ці параметри у різних виробників суттєво відрізняються. Чим темніше зображення, тим щільність середовища вище. Крім того, на знімках видно стикувальні зазори елементів плит, тріщини, пустоти та виробничий брак.



Рис. 2. Зовнішній вигляд (ліворуч) бронепластини та її рентген-телевізійне цифрове зображення (праворуч)

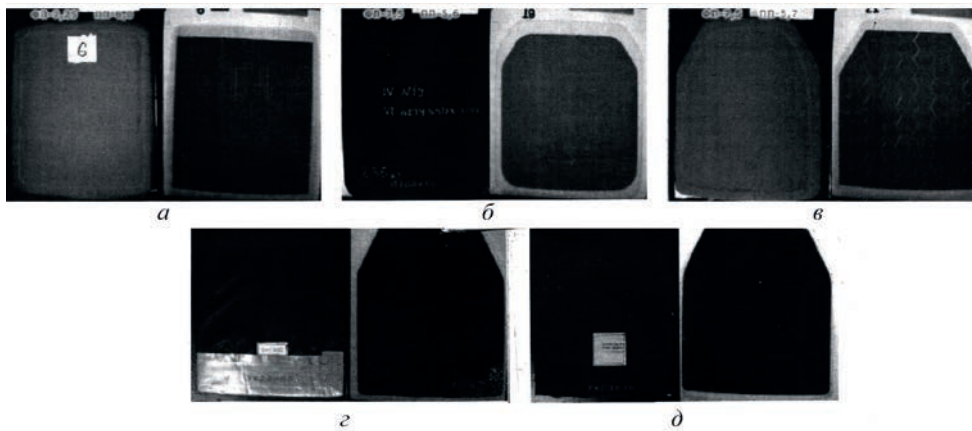


Рис. 3. Приклади рентген-телевізійних зображень бронепластин із зменшеною порівняно з оголошеною площею захисту, де виробниками є: *a, v* – Китай, *б* – Ізраїль, *z, д* – Україна

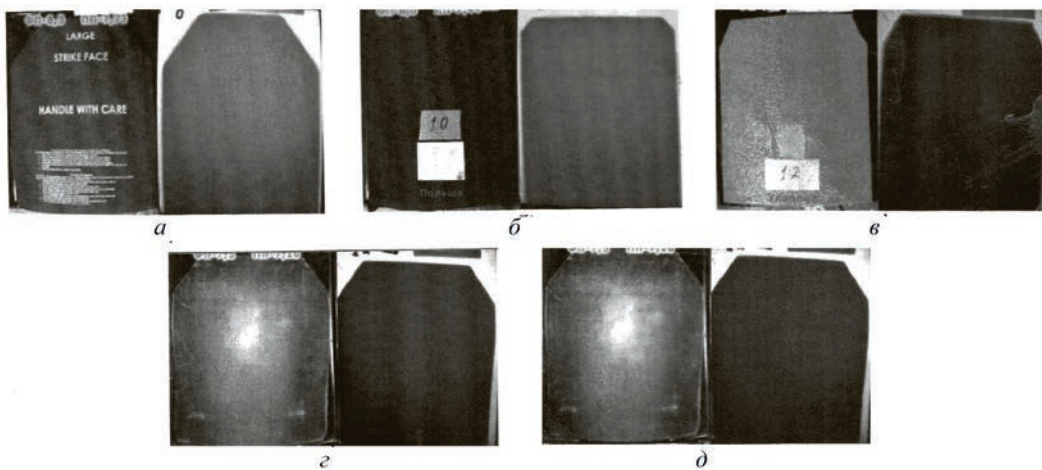


Рис. 4. Рентген-телевізійні зображення бронепластин, які відповідають замовленим параметрам, де виробниками є: *a* – США, *б* – Польща, *в* – Україна, *z* – Німеччина, *д* – Ізраїль

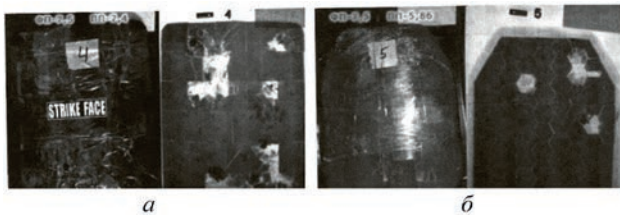


Рис. 5. Рентген-телевізійні зображення руйнувань бронепластин після контрольного відстрілу: *a* – набірна пластина з чотирикутних сегментів, *б* – набірна пластина з шестикутних сегментах

ких плит та їх неакуратне склеювання. Виявлені на рентгені зазори в деяких місцях сягали 3 мм, що є забагато для кулі калібру 5,45 мм. Такі стики куля проб'є навиліт, якщо туди потрапить. До того ж, самі пластини, при потраплянні кулі у центр можуть через зміщення елементів створювати критичні рани. Такі проблеми було виявлено у виробників кераміки; їх теж добре видно на рентгєнівських зображеннях.



МОНІТОРИНГ СТАНУ ЗРУЙНОВАНИХ СПОРУД, ОЦІНКА ШКОДИ ТА ПОШУКУ ПОСТТРАЖДАЛИХ ПІД РУЇНАМИ

В.О. Троїцький

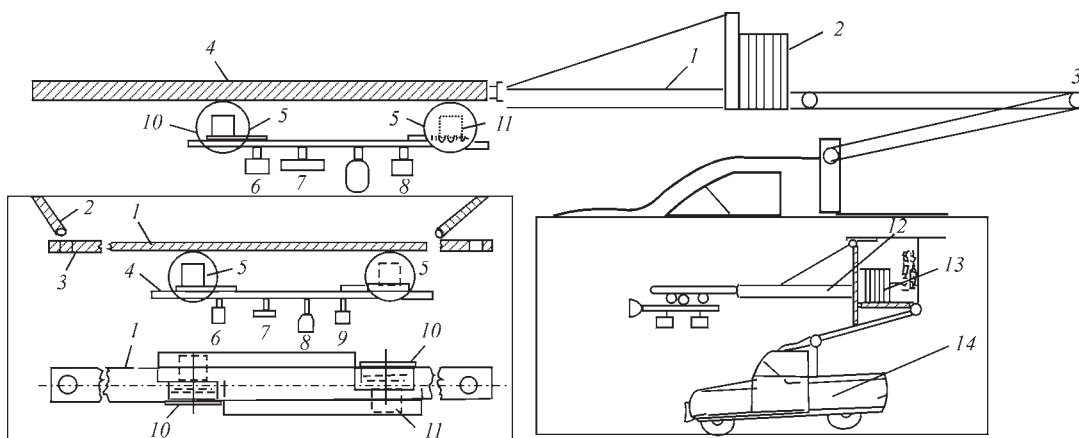
В Україні є велика кількість важкодоступних відповідальних об'єктів, що потребують регулярного моніторингу, оцінка реального фізичного стану яких має велике значення для безпеки навколишнього середовища (наприклад, магістральні трубопроводи, авіаційна техніка, морський, залізничний та автотранспорт, турбіни тощо). Їх моніторинг потрібен для запобігання критичних наслідків.

Так само вкрай важливим є ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій, що виникають в останні роки. Ці ситуації не тільки завдають величезних збитків державі, а й призводять до численної загибелі людей. Прикладом цього є останні події війни, усунення наслідків якої потребує оперативного залучення великої кількості фахівців та відповідного обладнання. Від того, наскільки швидко та оперативно надаватиметься допомога особам, які зазнали впливу небезпечних факторів надзвичайних ситуацій, наскільки своєчасно та професійно спрацюють аварійно-рятувальні підрозділи під час ліквідації бомбардування, природних катастроф, землетрусів та інших стихійних лих, залежить здоров'я і життя людей. Тому розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона прилад призначений для здійснення пошуково-рятувальних робіт за допомогою різноманітного устаткування, діагностичних пристроїв. Вони використо-

вуються в тих місцях, до яких людині дістатись вкрай важко – при обвалах будівель, техногенних катастрофах.

Рухомий прилад для моніторингу стану зруйнованих споруд, фіксації об'єму пошкоджень та пошуку постраждалих містить рухому платформу, обладнану напрямними колесами. На платформі встановлено моніторингові засоби – пошукові, дефектоскопічні, оцінювальні та трансляційні, що мають гнучкі кріплення до платформи. Колеса встановлені з можливістю вільного пересування сталеву смугою телескопічної штанги. Платформа оснащена широкозахватними пристроями. У залежності від цілей дослідження пристрій може бути обладнаний відеокамерою, мікрофоном, лазерним вимірювачем відстані та лінійних розмірів, освітлювачем, тепловізійним, магнітометричним, безконтактним ультразвуковим, електромагнітно-акустичним перетворювачами, газоаналізатором і радіаційним дозиметром, засобами трансляції інформації.

Рухома платформа з пристроями має можливість пересування над та всередині досліджуваного об'єкта, здійснення широкомасштабного моніторингу ступеню руйнувань і виявлення постраждалих (Патент України за заявкою № 202302286).



Прилад для моніторингу стану зруйнованих споруд для пошуку постраждалих з платформою та двома подвоєними магнітними колесами на сталевій смугі (куточку) на тросах (мотузках): 1 – сталеві смуги; 2 – трос (цеп, мотузка); 3 – кріплення троса; 4 – платформа з приладами; 5 – подвоєне магнітне колесо; 6 – лазерний вимірювач; 7 – тепловізор; 8 – освітлювач; 9 – газовий аналізатор; 10 – зовнішні шайби магнітних коліс; 11 – електродвигун

Пошуковий прилад з дослідними пристроями на телескопічній штанзі для зовнішнього та внутрішнього обстеження завалів пошкоджених споруд: 12 – телескопічна штанга з освітлювачем, відеокамерою, тепловізором та ін.; 13 – місце оператора; 14 – автопідйомник

ЗМЕНШЕННЯ УРАЖЕНЬ БОЙОВИХ ДРОНІВ З ІМІТАЦІЄЮ ЇХ УРАЖЕННЯ

В.О. Троїцький

Тихохідні літальні апарати часто гинуть при проходженні зони ППО противника та не досягають цілі. Проходження цієї зони для дронів – найскладніша задача.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено алгоритм вирішення цієї задачі. При перших ознаках польовання дрон (рис. 2) повинен переходити у режим хаотичного, лабіринтового руху (рис. 1). У такий режим польоту дрон переходить без команд з землі від пілота. Це робить автоматично блок захисту бортового комп'ютера, який слідує за інформацією, що поступає з відеокамер, бортових оптоелектронних датчиків на його фюзеляжі. Перехід на хаотичний лабіринтовий рух починається з вистрілу червоно-жовтого піропатрона. Починаються горизонтальні та вертикальні рухи, котрі супроводжуються димовим захистом, що імітує ураження і ускладнює попадання ракети в дрон. Димова шашка, прискорення та червоний колір

від піропатрону дезорієнтує стрілка. «Попадання» у дрон викликає задоволення стрілка. При цьому він стає розслабленим і намагається побачити місце падіння дрона, тобто є час прискорити та змінити напрямок його руху. Стрілок побачить косе падіння через виключення частини електродвигунів дрону, який продовжує свій шлях на низькій висоті. Після імітації попадання (падіння по косій з димовим і червоним піротехнічним слідом) дрон продовжує рух хаотично до заданої цілі (рис. 1).

На рис. 3 показано блок-схему взаємодії вузлів дрона, а на рис. 4 – алгоритм його керування.

Стрілок спостерігає за «падінням» та втрачає час для повторних пострілів, які могли би бути здійснені як із землі, так і додаткового літального апарату системи ППО. Аналогічний спосіб захисту діє і у випадку атаки з іншого літального апарату. Реалізація запропонованого алгоритму допоможе не тільки виконувати бойові завдання за лінією ППО, а й повертати дрони на базу іншим шляхом, де немає стрілка, координати якого зафіксовані дроном (Патент України за заявкою 2023 00931).

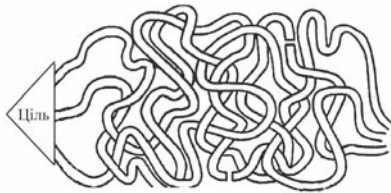


Рис. 1. Три приклади хаотичного руху до цілі



Рис. 2. Дрон MJX D16 Pro, оснащений великим набором датчиків, відеокамерою, бортовим комп'ютером та ін.



Рис. 3. Блок-схема взаємодії вузлів дрона

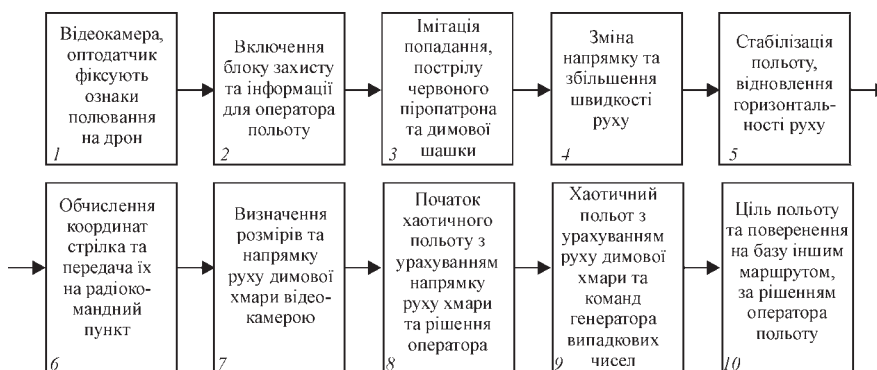


Рис. 4. Алгоритм керування дроном

ПРОПОЗИЦІЯ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПОШУКУ МІННИХ ПОЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗЙОМКИ З БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ (БПЛА)

В.О. Троїцький

Оригінальні пропозиції в ІЕЗ ім. Є.О. Патона запропоновані задля ведення повітряної розвідки місць розташування мін, зокрема на великих сільськогосподарських угіддях, за допомогою щонайменше одного безпілотного літального апарату (дрона), який містить систему відеоспостереження, тепловізор, портативні прилади фіксації мін, блок зв'язку з пунктом керування польотом та ємність з позначальною фарбою. Отриману розвідувальну інформацію передають з борту дрона на командний пункт (Патент України UA 148677U за заявкою 2023 00932).

На першому етапі повітряної розвідки виявляють загальні порівняльні картини оптичних і теплових аномалій поверхні землі в місцях ймовірних закладок мін. Перший етап – проліт на великій висоті над зоною розвідки та порівняльне покадрове фотографування з широким охоптом топографічної картини місцевості. У разі виявлення аномалій теплової картини і топографії слідів від вірогідної діяльності мінувальників здійснюють другий етап розвідки та кадрове тепловізійне та оптичне дискретне фотографування цих зон на низькій висоті з вищою роздільною здатністю приладів та у збільшених масштабах.

Після цього за допомогою програмних блоків комп'ютера порівнюють оптичні та тепловізійні кадри, відзняті на різних висотах і під різними ракурсами, та роблять остаточний висновок щодо місця закладання мін. Ці місця позначають люмінесцентною фарбою, у яку додають речовину, яка відлякує тварин. У разі невпевненості в результатах отриманої інформації перед фіксацією координат виявленого місця ймовірного закладання мін з командного пункту здійснюють його вивчення на

наявність металу за допомогою бортового портативного тепловізора, індуктора, радара, щупа. Команду на фіксацію координат і розмітки фарбою дає керуючий оператор. Розмінування роблять сапери за координатами від дрона. Дотримання безпеки та високої результативності пошуку значно важливіше за витрати. Ця методика дозволяє знаходити мінні поля та координати окремих мін, уточнює контур металу під ґрунтом за допомогою пінпойтера та щупа.

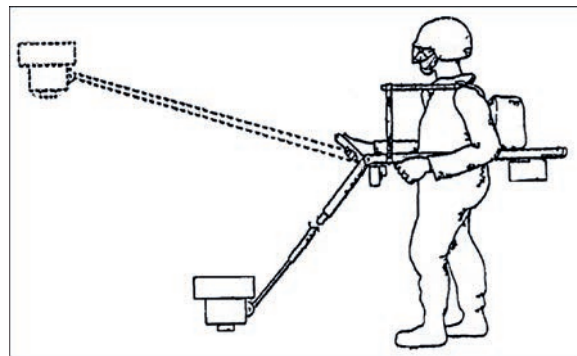


Рис. 2. Напівавтоматичний пошук мін



Рис. 3. Пінпойтер для визначення контурів металу

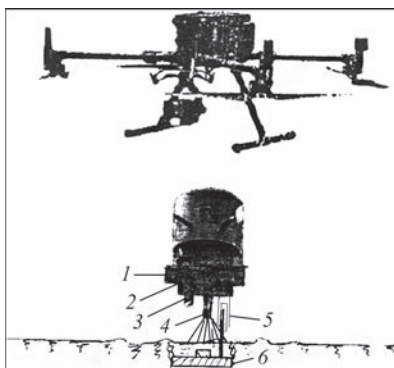


Рис. 1. Пошуковий дрон з блоком керування (1), індуктором (2), відеокамерою і тепловізором (3), фарбовідмітником (4); телескопічним щупом (5) над міною (6)

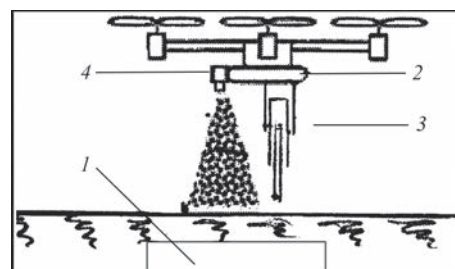


Рис. 4. Квадрокоптер (дрон) над міною (1) з індуктором і пінпойтером (2), телескопічним щупом (3), фарбовідмітником (4)

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК «МОНІТОРИНГ СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ (ВВЕДЕННЯ В ПРОФЕСІЮ)»

Видавництво НВФ «Інтерсервіс», форма А4, 962 кольорових ілюстрацій



Перша частина книги присвячена основам дефектоскопії, вона цікава починаючим фахівцям, а інші – являють собою навчальні плакати та оригінальні статті, запозичені з провідних професійних журналів США, Англії, Німеччини та інших країн.

Представлено багато матеріалів за новими технологіями НК. В останні роки почав широко застосовуватися рухомий рентген-телевізійний контроль (РТК). Дефектоскопісти України навчилися виготовляти недорогі, портативні, дистанційно керовані РТК-перетворювачі, за допомогою яких

можливо виконувати моніторинг технічного стану будь-яких об'єктів, виготовлених з будь-яких матеріалів. Портативні РТК-перетворювачі можуть бути створені на основі мініатюрних ПЗЗ-матриць або на основі флюороскопічних екранів та оптоелектроніки високої роздільної здатності, яка використовується в астрономії. Обидва рішення дозволять виконувати НК у реальному часі без затратних матеріалів. Такі РТК-технології з часом зменшать застосування УЗК і повністю витіснять плівкову радіографію. У книзі описані оригінальні рішення з магнітного, капілярного та інших методів неруйнівного контролю.

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

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

Під керівництвом проф. В.О.Троїцького, завідувача відділу ІЕЗ ім. Є.О. Патона, виконано чимало робіт з оцінки якості різних споруд, розроблено багато методик радіаційних та інших методів оцінки стану матеріалів.

Приймаються заявки на замовлення книги: ndt@paton.kiev.ua, larimart@ukr.net, usndt@ukr.net



ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (відділ №4) виконує роботи з моніторингу технічного стану об'єктів (металоконструкцій, трубопроводів, бронезилетів, резервуарів для зберігання палива, прокату та заготовок для виготовлення деталей військової техніки) із застосуванням ультразвукового, магнітопорошкового, рентген-телевізійного, капілярного методів контролю та надає послуги з ремонту зварних з'єднань, дефектоскопічної та зварної техніки різного призначення.

E-mail: ndt@paton.kiev.ua, usndt@ukr.net



ГЕНЕРАЛЬНА АСАМБЛЕЯ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ФЕДЕРАЦІЇ З НК В ЛІСАБОНІ

4 липня 2023 року в рамках XIII Європейської конференції з неруйнівного контролю в Лісабоні відбулося засідання Генеральної асамблеї Європейської федерації з неруйнівного контролю (EFNDT). Було повідомлено, що російське товариство НКТД було відсторонено від участі в засіданнях EFNDT і позбавлене права голосу у зв'язку із запровадженими щодо РФ європейськими санкціями. Напередодні засідання було отримано електронний лист від РОНКТД про відмову від членства в EFNDT.

Президент EFNDT Fermin Gomez (Португалія) представив звіт Ради директорів Федерації, повідомив про відставку віце-президента EFNDT Александра Мулліна (РФ), Pavel Mazal (Чехія), закінчення повноважень Peter Trampus (Угорщина), а також запропонував створити новий форум цифрового будівництва та конструкцій.

Відбулася дискусія щодо робочих груп і нового Статуту організації, веб-сайту і електронної газети EFNDT, угоди про співпрацю з фінансових питань з TIC – міжнародною асоціацією, що представляє незалежні компанії з випробувань, перевірки та сертифікації.

Peter Trampus підбив підсумки виконання Європейського проекту RIMA (Robotics for Inspection and Maintenance), спрямованого на створення мережі центрів цифрових інновацій і галузевих асоціацій для підтримки впровадження робототехніки та допомоги малим і середнім ком-

паніям, розробки нових рішень для різних галузей промисловості.

Etienne Martin (Франція) розповів про взаємовідносини EFNDT з ENIQ (European network for inspection and qualification).

Rene Klieber (бухгалтер EFNDT, Швейцарія) і Casper Wassink (аудитор EFNDT, Нідерланди) пояснили питання бюджету EFNDT на 2023 рік.

Thomas Wenzel (Німеччина), Bento Alves (Португалія) і David Gilbert (Велика Британія) взяли участь в обговоренні питання сертифікації персоналу, зазначивши, зокрема, що системи сертифікації товариств з НК їхніх країн вже перейшли на випуск цифрових сертифікатів з QR-кодом, завдяки якому кожен сертифікат можна перевірити за кілька секунд.

Відбулися вибори президента, віце-президента та членів Ради директорів EFNDT. Нижче наведено список обраних членів Ради директорів:

Президент: Fermin Gomez (Іспанія)

Віце-президент: Ezio Tuberosa (Італія)

Члени: Bento Ottone Alves (Португалія), Gerald Idinger (Австрія), Thomas Wenzel (Німеччина), David Gilbert (Велика Британія), Peter Fisch (Швейцарія), Tomasz Chady (Польща), Frederic Schaditzki (Франція).

В останній день конференції відбулися Генеральна асамблея EFNDT з загальних питань та спільний семінар EFNDT-ICNDT за темою «Навчання, кваліфікація та сертифікація – нова редакція стандарту 9712». Постпринти доповідей





М.Л. Казакевич (віце-президент УТНКТД), В.М. Учанін, (заступник гол. редактора журналу ТДНК), Серж дос Сантос (віце-президент Міжнародної академії НК)

конференції можна найти в її архіві. Офіційна публікація доповідей запланована в серпні цього року.

Важливою подією міжнародної зустрічі був День наукових досліджень Міжнародної академії НК (ANDTI). Українське товариство НКТД було у витоків заснування АКОТІ, почесним членом якої у свій час було обрано академіка Б.Є. Патона. У ході засідання діючий Президент Академії Пітер Трампс доповів про перспективи розвитку Академії, а екс-президент та засновник ANDTI Джузеппе Нардоні розповів про можливості залучення законів квантової фізики для розвитку дефектоскопії.

Дійсний член Академії Девід Гілберт (Британський Інститут НК) запропонував інтегрувану Програму підготовки з NDT, яку підтримав Пітер Трампс у доповіді щодо створення курсу про вищу освіту, який оформлено у вигляді пілотного проекту «NDT, Інженерія цілісності». Він пропонує включити кваліфікацію «NDT» до переліку спеціальностей вищої освіти, пропагувати та вважати одним з пріоритетів діяльності ANDTI. Це важлива професія, яка спрямована на розробку матеріалів, методів і технологій НК та оцінку працездатності конструкцій на базі матеріалознавства, механіки руйнування та інших наук, що гарантують безпеку в індустрії.

Необхідно зазначити, що роботи українських вчених з наукового потенціалу не уступають кращим результатам іноземних досліджень, які було продемонстровано під час конференції. Так, наприклад, одна з небагатьох робіт зі створення екологічно безпечних водних технологій для поверхневих методів НК (PT & MPI) повторює те, що вже 20 років тому було розроблено, впроваджене



но то серійно виготовлялось в ДП «КОЛОРАН» НАН України. А портативні скануючі рентгенотелевізійні системи, які було розроблено в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, затребувані у Європі та США, але дотепер використовуються тільки в Україні.

Одним з організаторів Європейської Конференції в Лісабоні був Португальський інститут якості (Instituto Portugues da Qualidade – IPQ). Сумісно з цією організацією в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України було реалізовано кілька науково-технічних програм. Працюють в Португалії й фахівці, навчені та атестовані у Києві. Разом із Португальським інститутом якості готувалися проекти спільних робіт, один із яких стосувався неруйнівного контролю якості зварних з'єднань для Чорнобильського укриття. Сподіваємось на подальший розвиток співпраці з європейськими колегами.

На завершення засідання його учасникам була представлена відеопрезентація, присвячена наступній Європейській конференції з НК, яка відбудеться в 2026 році у Вероні (Італія).

*Казакевич М.Л.
віце-президент УТНКТД*

КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ І ВИСТАВОК З НКТД

10–11 жовтня 2023	США, Хьюстон	World Conference for Inspection and Maintenance Robotics 2023 (Всесвітня конференція з інспекції та технічного обслуговування робототехніки)	Global I&M robotics community
10–11 жовтня 2023	США, Хьюстон	ASNT 2023: The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
5–8 листопада 2023	Південна Корея, Бусан	14 th International Symposium on NDT in Aerospace (AeroNDT2023) (XIV міжнародний симпозиум з НК в аерокосмічній галузі)	Pusan National University
14–16 листопада 2023	Чехія, Требіч	53 rd Defektoskopie / NDE for Safety (Щорічна міжнародна конференція і виставка Чеського товариства з НК)	Czech Society for NDT
28–30 листопада 2023	Італія, Брешія	ART23 (Неруйнівний контроль у сфері культурної спадщини)	Italian Society for NDT
7–9 грудня 2023	Індія, Пуне	33 rd Annual Conference & Exhibition on Non-Destructive Evaluation (NDE 2023) (Щорічна конференція та виставка з оцінки неруйнівними методами)	Indian Society for NDT
23–26 квітня 2024	Німеччина, Штутгарт	36 th Control – Trade Fair for Quality Assurance (Торговий ярмарок із забезпечення якості)	P.E. Schall GmbH & Co. KG
27–31 травня 2024	Південна Корея, Інчхон	20 th World Conference on Non-Destructive Testing (20 th WCNDT) (XX Всесвітня конференція з НК)	Korean Society for NDT
10–13 червня 2024	Німеччина, Потсдам	11 th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024) (Європейський семінар з моніторингу структурного здоров'я)	German Society for NDT
11–13 червня 2024	Канада, Оттава	NDT in Canada 2024 (Щорічна конференція Канадського інституту НК)	Canadian Institute for NDE
15–18 жовтня 2024	Китай, Пекін	The 3 rd World Congress on Condition Monitoring - WCCM 2023 (III Всесвітній конгрес з моніторингу технічного стану)	Chinese Society for NDT and China SEI Institute
11–14 листопада 2024	США, Лас Вегас	ASNT 2024 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
9–12 червня 2025	Канада, Онтаріо	Pan-American Conference for Nondestructive Testing (VIII PANNDT) (Панамериканська конференція з неруйнівного контролю)	Canadian Institute for NDE
6–9 жовтня 2025	США, Лас Вегас	ASNT 2025 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
11–14 травня 2026	США, Гаваї	17 th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (XVII Азіатсько-Тихоокеанська конференція з неруйнівного контролю)	American Society for NDT
15–19 червня 2026	Італія, Верона	The 14 th European Conference on Non-Destructive Testing (14 th ECNDT) (XIV Європейська конференція з НК)	Italian Society for NDT



Центр сертифікації при Українському товаристві
неруйнівного контролю та технічної діагностики

Атестаційний центр неруйнівного контролю
при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона

ЗАПРОШУЮТЬ СПЕЦІАЛІСТІВ

що працюють в сфері неруйнівного контролю
пройти підготовку, атестацію та сертифікацію
з різних методів неруйнівного контролю:

рентгенографічного (RT)	магнітного (MT)
ультразвукового (UT)	капілярного (PT)
акустико-емісійного (AT)	контролю герметичності (LT)
теплого (TT)	візуального (VT)
вібродіагностичного (VA)	вихрострумове (ET)

Ми здійснюємо підготовку, атестацію та сертифікацію спеціалістів, що працюють в галузі неруйнівного контролю, на 1, 2 і 3 рівні кваліфікації у відповідності до вимог національних та міжнародних стандартів:

- ДСТУ EN ISO 9712 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу НК»,
- SNT-TC-1A "Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing",
- НПАОП 0.00-1.63-13 "Правила сертифікації фахівців з неруйнівного контролю"

в 12 виробничих секторах:

сектори за типом продукції: литво, поковки, зварні вироби, труби та трубопроводи, прокат.

промислові сектори: виробництво та оброблення металів, контроль перед введенням та в процесі експлуатації, залізничний транспорт та обладнання для нього, авіакосмічна продукція, продукція суднобудування, обладнання для атомної енергетики, бурове обладнання.

**Ви отримаєте сертифікат компетентності фахівця від Центру сертифікації
Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики**

Три кроки до сертифікату:

1. На сайті www.usndt.com.ua в розділі «Сертифікація→Форми» знайдіть, заповніть і надішліть на e-mail: usndt@ukr.net і acnk@ukr.net форми «Заявка на сертифікацію» та «Особова карта фахівця»;
2. Ми підготуємо проект договору про надання послуг з підготовки (за необхідності), атестації і сертифікації;
3. Після підписання договору з боку Замовника ми погодимо з Вами терміни підготовки, екзаменів, а також інші питання стосовно сертифікації.

м. Київ, вул. Казимира Малевича, 23 (корпус 6 ІЕЗ ім. Є.О. Патона)

м. Київ-38, 03038, а.с. 20 (для листування)

тел. (044) 205-22-49, 200-81-40; e-mail: usndt@ukr.net, acnk@ukr.net