

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
International Association «Welding»

Збірка тез доповідей науково-технічних семінарів

3D ДРУК МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

27 травня 2025 р., м. Київ

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

28 травня 2025 р., м. Київ

Київ, Міжнародний виставковий центр

Collection of abstracts of scientific and technical seminars

3D PRINTING OF METAL PRODUCTS

May 27, 2025, Kyiv

NON-DESTRUCTIVE TESTING AND MONITORING OF TECHNICAL STATE

May 28, 2025, Kyiv

Kyiv, International Exhibition Center

3D друк металевих виробів. Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану: Зб. тез доповідей наук.-техн. семінарів. Під ред. О.Т. Зельніченка. Київ, Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2025. — 55 с. Електронне видання. ISBN 978-966-96309-3-3.

В збірці представлено 30 тез доповідей науково-технічних семінарів «3D друк металевих виробів» та «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану», які були проведені 27 та 28 травня 2025 р., м. Київ, МВЦ.

Наведені останні досягнення та практичні результати в галузях:

- 3D друку металевих виробів, що базуються на зварювальних технологіях;
- неруйнівного контролю та технічної діагностики відповідальних конструкцій.

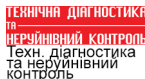
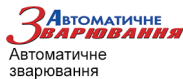
3D printing of metal products. Non-destructive testing and monitoring of technical condition: Collection of abstracts scientific and technical seminars. Edited by O.T. Zelnichenko. Kyiv, International Association “Welding”, 2025. —55 p. Electronic edition. ISBN 978-966-96309-3-3.

The collection presents 30 abstracts of the scientific and technical seminars “3D printing of metal products” and “Non-destructive testing and monitoring of technical condition”, which were held on May 27 and 28, 2025, Kyiv, IEC.

The latest achievements and practical results are presented in the fields:

- 3D printing of metal products based on welding technologies;
- non-destructive testing and technical diagnostics of critical structures.

Інформаційна підтримка конференції



Спонсори семінарів:

- ТОВ «НВФ Діагностичні прилади», м. Київ;
- ТОВ «Фроніус Україна», Київська обл., с. Княжичі

Видавничий проект *О.Т. Зельніченко*

Комп'ютерна верстка *Т.Ю. Снегірєва*

Свідоцтво серія ДК, № 3497 від 4 червня 2009 р.

Тези публікуються в авторській редакції

© Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2025

ЗМІСТ

3D ДРУК МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ	5
<i>Аджамський С.В., Балаханова Т.В., Подольський Р.В., Барановська О.Є. Аналіз впливу просторового розташування зразків на платформі побудови на геометричні характеристики ванни розплаву в процесі LPBF</i>	<i>5</i>
<i>Ань Тяньчен, Берднікова О. Ремонтне відновлення лопаток парових турбін методом лазерного наплавлення</i>	<i>6</i>
<i>Бондаренко В.Л. WAAM з адаптованими процесами Fronius MIG/MAG AC</i>	<i>8</i>
<i>Закорко В.О., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Глушак С.О., Федченко В.В. Адитивні технології в Космосі</i>	<i>9</i>
<i>Квасницький В.В., Лагодзінський І.М., Чорний А.В., Черній В.О., Квасницький А.В. Визначення впливу способів WAAM наплавлення, складу присадних матеріалів і захисних газових середовищ на формування структури металу та геометричні характеристики просторових виробів</i>	<i>11</i>
<i>Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Ілляшенко Є.В., Вдовиченко Д.М., Вдовиченко І.М., Божок О.Є., Терещенко О.С. Досвід та перспективи 3D друку виробів із металевих сплавів методом плазмово-дугового адитивного наплавлення</i>	<i>13</i>
<i>Матвійчук В.А. Адитивні електронно-променеві технології виготовлення металевих виробів методом пошарового наплавлення із застосуванням порошкових матеріалів</i>	<i>14</i>
<i>Степанов Д.В., Чвертко Є.П., Мінаков С.М., Мінаков А.С., Стреленко Н.М., Вдовиченко І.М., Вдовиченко Д.М. Технологічні особливості багатошарового дугового наплавлення тонкостінних тіл обертання</i>	<i>16</i>
<i>Томко Д., Мотруніч С. Вплив параметрів адитивної дугової технології 3D друку на механічні властивості нікелевого сплаву Inconel 625</i>	<i>17</i>
НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ	19
<i>Галаненко Д., Міщенко В., Паренюк А. Швидкісна система комплексної діагностики рейкової колії OKOSCAN-73 HS</i>	<i>19</i>
<i>Глабець С.М. Ультразвуковий контроль стикових зварних з'єднань поліетиленових труб</i>	<i>20</i>
<i>Глуховський В.Ю., Литвиненко В.А. Статистична оцінка даних та порогова ідентифікація дефектів при діагностуванні промислових об'єктів та виробів тепловізійним методом</i>	<i>21</i>
<i>Дядін В.П., Тороп В.М., Давидов Є.О. Оцінка ризиків крихкого руйнування конструкційної сталі М16С та зварних з'єднань головних повздовжніх балок мосту Патона</i>	<i>22</i>
<i>Карманов М.М., Михайлов С.Р., Шалаєв В.А. Прецизійні рентгенівські сканери на основі міні-сенсорів</i>	<i>27</i>
<i>Карманов М.М., Михайлов С.Р., Шалаєв В.А. Цифрові системи рентгенотелевізійного неруйнівного контролю</i>	<i>28</i>
<i>Козін О.М. Актуальні дефектоскопи серії UNIVERSAL ACY</i>	<i>29</i>
<i>Лобанов Л.М., Знова В.Я., Джавадова І.І., Шуткевич О.П., Киянець І.В., Шкурат І.Л., Шиян К.В., Стельмах Д.І., Савицький В.В. Адаптація методу широкоточності для виявлення мікро-дефектів в алюмінієвих зварних з'єднаннях та тонкостінних композитах</i>	<i>31</i>
<i>Лобанов Л.М., Стельмах Д.І., Шуткевич О.П., Шкурат І.Л., Савицький В.В. Smart-діагностика великогабаритних конструкцій з допомогою безпілотних літальних апаратів, методу фотограмметрії та штучного інтелекту</i>	<i>32</i>

<i>Лобанов Л.М., Шкурат І. Л., Шуткевич О.П., Стельмах Д.І., Савицький В.В.</i> Автоматизація ширографічного контролю якості матеріалів за допомогою штучного інтелекту та синтетично згенерованих даних	33
<i>Мінаков С.М., Учанін В.М., Чвертко Є.П., Вдовиченко Д.М., Вдовиченко І.М., Мінаков А.С., Степанов Д.В., Стреленко Н.М.</i> Магнітоанізотропний контроль напруженого стану металоконструкцій	34
<i>Павлій О.В.</i> Витратні матеріали для магнітопорошкової дефектоскопії MR-Chemie (ФРН)	35
<i>Павлій О.В.</i> Приклад застосування системи GO-SCAN для дефектоскопії зварювання трубопровода	36
<i>Павлій О.В.</i> Радіаційні методи неруйнівного контролю. Класична радіографія. Сучасний стан та перспективи	37
<i>Посипайко Ю.</i> Нові стандарти дефектоскопії металопродукції методами проникаючих речовин	38
<i>Росляков О.С., Стринадко М.Т., Єрмоленко С.Б., Решетник С.І., Шух Я.В.</i> Поляризаційне спектрально-селективне картографування мікродефектів у композитах	40
<i>Созонов С.В., Ковтун С.І., Богачев І.В., Декуша О.Л., Куц Ю.В.</i> Дослідження магнітострикційного методу ультразвукового контролю	42
<i>Троїцький В.О.</i> Вдосконалення сертифікації спеціалістів і атестації лабораторій неруйнівного контролю в атомній енергетиці та інших галузях промисловості	45
<i>Троїцький В.О.</i> Моніторинг стану промислових об'єктів у воєнний час	47
<i>Шекеро А.Л.</i> Особливості ультразвукового контролю аустенітних зварних швів	52
<i>Яременко М.А., Недосека С.А., Овсієнко М.А.</i> Застосування ае технології для оцінки технічного стану відповідальних промислових об'єктів	53
CONTENTS	54

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРОСТОРОВОГО РОЗТАШУВАННЯ ЗРАЗКІВ НА ПЛАТФОРМІ ПОБУДОВИ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАННИ РОЗПЛАВУ В ПРОЦЕСІ LPBF

Аджемський С.В.^{1,2}, Балаханова Т.В.³, Подольський Р.В.^{1,3}, Барановська О.Є.³

¹ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Дніпро

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро

У процесі лазерного сплавлення порошкових матеріалів (LPBF) взаємодія лазера з матеріалом призводить до утворення ванни розплаву, яка є основою формування заданої геометрії шляхом поширюваного нарощування. Якість кінцевого виробу безпосередньо залежить від перебігу цього процесу. Якщо кількість розплаву недостатня або підведення тепла надмірне, можуть виникати дефекти, такі як непровари або пористість за типом «замкової щілини». Висока нестабільність рідинної динаміки у ванні розплаву може сприяти розбризкуванню, утворенню кульок або нерівностей, що негативно впливає на міцність і цілісність матеріалу. Тому детальне вивчення лазерно-матеріальної взаємодії на рівні ванни розплаву та її впливу на поверхню відіграє ключову роль у вдосконаленні технології. Таким чином, можна відзначити суттєвий вплив великої кількості параметрів лазерного наплавлення, а також складність і різноманітність факторів, що визначають цей процес. Окрім впливу окремих параметрів як самостійних величин, існує також їхня взаємодія, яка вивчена меншою мірою, оскільки потребує проведення масштабних експериментальних досліджень із мінімальною похибкою.

Вплив потужності та швидкості сканування на ширину й глибину ванни розплаву вивчений найдетальніше. Як уже було показано, існують докладні карти залежності «потужність-швидкість», а щільність енергії має кілька визначень залежно від контексту застосування. У зв'язку з цим існує потреба у проведенні комплексних досліджень багатопараметричного керування процесом. У цьому дослідженні розглянуто вплив основних параметрів друку на процеси формування ванни розплаву, зокрема розташування виробів на платформі побудови та їхні структурні особливості.

В даному дослідженні проаналізовано процес LPBF сталі 316L та особливості формування ванни розплаву, пористість та якість отриманих треків. Окрема увага приділена впливу основних параметрів процесу — потужності лазера, швидкості сканування, а також розташуванню зразків на платформі побудови. Дослідження проведено із застосуванням повного факторного аналізу для оптимізації параметрів друку.

Визначено, що вплив потужності лазера та швидкості сканування на якість треків варіюється залежно від місця розташування на платформі. Найбільша нестабільність спостерігається в зонах, близьких до виходу газового потоку. Оскільки такий вплив розташування зразків може бути обумовлений не тільки залежністю від газового потоку, то надалі треба виключити можливий вплив інших чинників, як то вплив особливостей будови машини та камери на рівномірність теплообміну, рівномірність розподілу порошку, тиск повітря, помилки проєктування процесу тощо.

Показано, що потужність лазера та швидкість сканування значною мірою визначають глибину та ширину ванни розплаву. Надто висока або низька енергія може спричинити дефекти, зокрема пористість або нестабільність треків.

Не виявлено значного впливу на геометричні параметри ванни розплаву треків і якість їх формування зміни відхилення променя лазера від його нормального положення.

РЕМОНТНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ПАРОВИХ ТУРБІН МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Ань Тяньчен, Берднікова Олена

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

У сучасній промисловості в таких галузях, як електроенергетика, нафтохімічна промисловість тощо широко застосовуються потужні турбінні установки. Це, у свою чергу, вимагає високого комплексу експлуатаційних властивостей матеріалів, що використовуються в енергетичних турбінних агрегатах та відповідно механічних характеристик їх зварних з'єднань. Серед матеріалів, що застосовуються в енергетичній промисловості в низькотемпературних частинах турбомашин, а також у газових турбінах широке використання знайшли високоміцні мартенситні нержавіючі сталі. Однак, актуальною є проблема зносу поверхні виробів та водної ерозії лопаток турбін, що працюють в екстремальних умовах під впливом високошвидкісних пароводяних сумішей.

У даній роботі наведено результати щодо ремонту лопаток турбін низького тиску, пошкоджених ерозією (рис. 1, а), виготовлених зі сталі ХМ-25 (хімічний склад, ваг. %: 15,00...17,50 Cr; 5,00...7,00 Ni; 1,25...1,75 Cu; 0,05...0,1 Mo; $\leq 0,05C$; $\leq 1,0Mn$; $\leq 0,03P$; $\leq 0,03S$; $\leq 1,0Si$; $\leq 8Nb$; Fe — осн.). Для відновлення лопаток застосовували метод багатшарового лазерного наплавлення (рис. 1, б), який дозволяє створювати на поверхні виробу плакувальні шари (рис. 1, в) з порошкового матеріалу аналогічного складу. Показано, що лопатки зі сталі ХМ-25, відновлені цим методом, після витримки при температурі 480 °С протягом 4 годин, демонструють задовільні характеристики та відповідають експлуатаційним вимогам. Дослідження структури, хімічного складу матеріалу наплавлень та основного металу, фрактографічний аналіз поверхонь руйнування проводили методами світлової та електронної растрової мікроскопії. Дослідженнями встановлено особливості формування фазового складу, мікроструктури, мікротвердість, характер руйнування зварних з'єднань сталі ХМ-25 після лазерного наплавлення. Встановлено, що основний метал, зона термічного впливу та наплавлений метал мають мартенситну структуру. В наплавленому металі розмір пакетів мартенситу подрібнюється (в середньому у 1,4 рази, до 15...20 мкм) у порівнянні з основним металом.

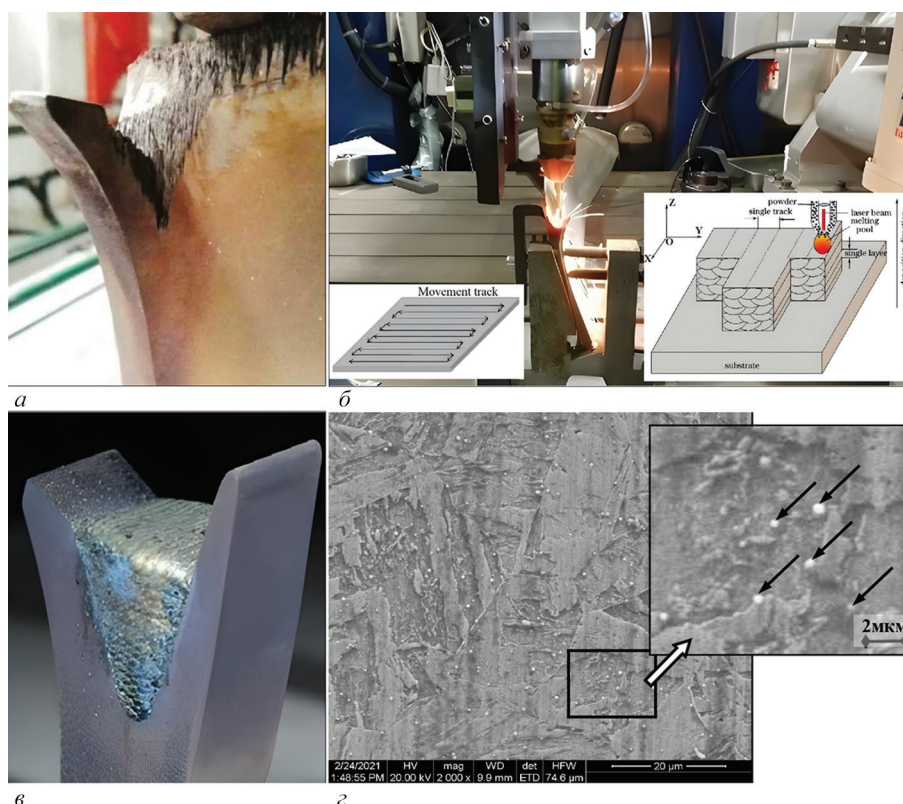


Рис. 1. Пошкоджена лопатка парової турбіни (а), лазерне наплавлення (б) плакувальних шарів (в) та мікроструктура наплавленого металу (г)

Метал наплавлених шарів містить карбідні та карбонітридні частинки фазових виділень розміром до 1 мкм (позначені стрілками на рис. 1, з). Мікротвердість металу наплавлення та зони термічного впливу ЗТВ становить $HV_{0,2} = 420 \dots 440$ та $HV_{0,2} = 425 \dots 438$, відповідно, при твердості основного металу $HV_{0,2} = 410 \dots 415$. Механічні випробування на розтяг показали підвищену міцність ($\sigma_b > 1260$ МПа) та межу пластичності ($\sigma_{0,02} > 1050$ МПа), що відповідає інженерним вимогам. На зламах зразків переважно в'язкий характер руйнування та локальні ділянки рельєфу квазікрихкого типу з невеликою часткою вторинних мікротріщин. Формування дрібної мартенситної структури при наявності дисперсних карбідних та карбонітридних частинок фаз, рівномірний рівень мікротвердості та в'язкий характер руйнування забезпечують високий рівень міцності та тріщиностійкість металу при ремонтному відновленні лопаток парових турбін методом лазерного наплавлення.

WAAM З АДАПТОВАНИМИ ПРОЦЕСАМИ FRONIUS MIG/MAG AC

Бондаренко В.Л.

ТОВ «Фроніус», Київська обл., с. Княжичі

WAAM — Wire Arc Additive Manufacturing.

WAAM доволі новий метод виготовлення деталей чи виробів, і одне з перших та головних запитань що до WAAM в даний час: це наскільки актуальними є реальне використання даного процесу в виробничих умовах та його перспективи. У вільному доступу є декілька прикладів такого використання, які можуть надати варіанти відповідей що до актуальності такого використання.

<https://www.relativityspace.com/> Відкрита інформація з сайту компанії Relativity Space , що спеціалізується в області космонавтики. На відео: фрагменти виготовлення особливо відповідальних конструкцій (елементи корпусів ступеней...) методом WAAM. На відео візуально можна побачити зварювальне обладнання Fronius типу TPS та TPSi, та визначити процес зварювання: це CMT процес.

CMT (Cold Metal Transfer) — ідеальний процес GMAW для WAAM, який розроблений та запатентований компанією Fronius International і базується на крапельному переносі з додатковим інтелектуальним механічним відведенням присадкового дроту при перенесенні кожної каплі металу в зварювальну ванну. Така технологія дає можливість регулювання та контролю за тепло вкладенням , його мінімізації, та додатково створює високо стабільний перенос металу, навіть в CO₂, практично без розбризкування.

Процес CMT, створений в 2004 році, постійно розвивається та вдосконалюється як за рахунок технологічних вимог (CMT Advance), так і за рахунок інтелектуального мікропроцесорного управління.

Нова лінійка обладнання типу TPSi та iWave дала можливість підняти і так практично бездоганний процес CMT на новий рівень можливостей: CMT AC, зробивши цей процес ще більш керованим, точним, та простішим для інтеграції з роботизованими системами для WAAM.

Оновлений CMT AC базується на включенні в процес CMT ще однієї додаткової складової для регулювання процесу: **AC-Power Balance**: зміну полярності на дроті.

Завдяки цій зміні полярності , та широким межам такого регулювання , генерується низький тепловий вплив при збереженні високої швидкості плавлення, та забезпечується ще більш точне контрольоване введення тепла.

Така технологія CMT AC в поєднанні з вдосконаленими допоміжними асистентами роботизованого використання і спеціальним інтерфейсом системи iWave має назву **CMT AC Additive** і надає нові можливості для адитивного виробництва WAAM.

Більш детально про CMT AC Additive:

<https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnohiiyi/informatsiya-pro-produkt/fronius-additive>

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ В КОСМОСІ

Закорко В.О., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Глушак С.О., Федченко В.В.

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

Ремонт космічних апаратів безпосередньо у відкритому космосі є однією з найскладніших задач сучасної космонавтики. Ефективність і надійність таких операцій мають велике значення для забезпечення довговічності та функціональних можливостей космічних об'єктів. Одним із перспективних методів відновлення пошкоджень функціонуючих космічних об'єктів є електронно-променеве багатопланове адитивне наплавлення.

В даний час багато уваги приділяється питанню освоєння Місяця. При будівництві та експлуатації постійно діючих споруд і обладнання на поверхні Місяця необхідно створювати трубопроводи і оболонкові конструкції, тому створення адаптованого до космічних умов обладнання для виконання робіт по 3D принтингу та розробка технології електронно-променевого 3D принтингу елементів із алюмінієвих, титанових та інтерметалідних сплавів є актуальною.

На сьогоднішній день метод шарового наплавлення матеріалів, що розплавляються і формуються електронним променем Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM) «Пряме виробництво електронно-променевим пучком» є найдосконалішим серед інших технологій 3D – друку. При цьому методі використовується високоенергетичний електронний промінь, для якого космічні умови з глибоким вакуумом є природним середовищем.

Умови космічного простору висувають надзвичайно високі вимоги до технологій відновлення: високий вакуум, значні температурні перепади та відсутність гравітації створюють проблеми, які неможливо подолати традиційними методами. Електронно-променеве адитивне наплавлення дозволяє відновлювати структуру корпусів космічних апаратів з високою точністю, завдяки використанню висококонцентрованого електронного променя.

Майбутнє космічних досліджень залежить від технологій, які максимізують витривалість і самодостатність місій. З віддаленням місій від Землі логістика постачання не може врахувати ймовірність виходу з ладу компонентів і невизначеність щодо того, який саме компонент може вийти з ладу. Тому, крім виконання ремонтно-відновлювальних робіт, адитивні технології у космосі доцільно використовувати при виготовленні запасних деталей безпосередньо на орбіті.

Перспективне рішення полягає в тому, щоб інтегрувати в космічну місію технології ремонту і виробництва, що забезпечать можливості адаптації до непередбачуваних ситуацій на вимогу.

Впровадження технологій зварювання та адитивного виробництва (АВ) в космічному середовищі може докорінно змінити підходи до проектування, виготовлення та збирання орбітальних платформ.

В аерокосмічному апаробудуванні для виготовлення деталей та вузлів космічної техніки в основному використовують алюмінієві сплави типу 5456, 2219 та ін. Багато розробників, в тому числі і в ІЄЗ вже займаються розробкою технології електронно-променевого адитивного наплавлення з використанням алюмінієвого дроту та вирішили технологічні проблеми, які виникали на цьому шляху.

Але відділ «Космічних технологій» розробляє обладнання і технології, які планується застосовувати в космічних умовах. Фізичні умови космосу сильно відрізняються від земних. Наявність невагомості, різка зміна температур від +120 до -120 °С, а також схильність до пороутворення, що доказано експериментами, які були проведені при електронно-променевому зварюванні в умовах космосу. Відомо, що космічні умови вимагають спеціального обладнання та технологічних процесів.

У відділі «Космічних технологій» в даний час розробляється адитивна технологія електронно-променевого наплавлення алюмінієвого сплаву для виконання ремонтно-відновлювальних робіт в космічних умовах.

Для виконання експериментальних робіт по створенню технології багатопланового адитивного наплавлення наявна електронно-променева гармата була доукомплектована механізмом подавання присадного дроту та фокусуєчо-відхиляючою системою яка дозволяє одержати електронний пучок діаметром не більше 1 мм (при напрузі прискорення 10 кВ) на відстані 50...150 мм.

Розроблена емісійна система формує електронний пучок, достатній для здійснення електронно-променевого адитивного багатопланового наплавлення з подаванням присадного дроту.

Проведено відпрацювання елементів технології по електронно-променевому адитивному наплавленню багатопарових швів алюмінієвим дротом 5456.

Електронно-променева багатопарова адитивна технологія наплавлення для ремонту пробоїн, тріщин і інших дефектів корпусів і конструктивних елементів космічних апаратів є інноваційним методом відновлення об'єктів в умовах космічного вакууму. Вона забезпечує високу надійність і довговічність відновлених конструкцій, сприяючи ефективному використанню ресурсів космічної програми. Завдяки цьому методу можливо значно підвищити оперативність та економічність ремонтних робіт у космосі, що робить його перспективним напрямом розвитку космічних технологій.

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ СПОСОБІВ WAAM НАПЛАВЛЕННЯ, СКЛАДУ ПРИСАДНИХ МАТЕРІАЛІВ І ЗАХИСНИХ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ТА ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОСТОРОВИХ ВИРОБІВ

Квасницький В.В.^{1,2}, Лагодзінський І.М.¹,
Чорний А.В.¹, Черній В.О.¹, Квасницький А.В.^{1,2}

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Зростаюча потреба у автоматизації серійного виробництва, скорочення витрат часу та матеріальних ресурсів, забезпечення сталої високої якості готової продукції вимагають впровадження інноваційних технологічних рішень. Ця потреба є особливо актуальною в таких високотехнологічних галузях як авіабудування, автомобілебудування, енергетика, газотурбобудування та медицина, де зростає попит на виготовлення деталей складної геометричної форми, які неможливо або економічно недоцільно виробляти традиційними методами обробки. Одним із перспективних підходів до вирішення цієї задачі є використання адитивного дугового наплавлення, зокрема технології WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), яка має низку переваг: досить високу продуктивність процесу адитивного вирощування (від 1...9 кг/год.), відносно низьку вартість обладнання для пошарового наплавлення з використанням готових промислових рішень та практичну відсутність обмежень габаритів адитивно синтезованих просторових виробів.

Однак, дугові процеси є динамічними і залежать від багатьох змінних факторів. Важливими характеристиками якості кінцевого виробу є його відповідність заданим геометричним розмірам 3D моделі та необхідні фізико-механічні властивості наплавленого металу. Прогнозування геометричної форми та нерівномірності (хвилястості) бокових поверхонь генерованих виробів є важливим фактором при застосуванні WAAM технологій в автоматизованому адитивному виробництві. Окрім впливу параметрів режиму дугових процесів наплавлення та траєкторії руху пальника, на точність формування поверхні кінцевого виробу значно впливають дотичні фактори, зокрема хімічний склад захисного газового середовища, використання методів імпульсної подачі зварювального електричного струму або технології зварювання з короткими замиканнями CMT (Cold Metal Transfer). Відповідно, для впровадження WAAM технологій у автоматизовані системи керування виробництвом MES/ERP необхідно, як додатковий елемент, встановити закономірності впливу методу подачі струму та складу захисного газового середовища на геометричні характеристики наплавлених шарів, структуру металу з урахуванням типу присадного металу та залишкових напружень і деформацій, які виникають за умови послідовного формування виробу. Саме тому тема проведених досліджень є актуальною.

Для дослідження закономірностей зміни геометричної форми бокових поверхонь під час адитивного синтезу, використані присадні матеріали з низьковуглецевої сталі G3Si1 (Св-08Г2С) та кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 (БрКМц3) у вигляді дротів суцільного перетину, діаметром 1,2 мм. Процеси адитивного дугового наплавлення сталі досліджували із застосуванням двох марок газових сумішей: M21 (82 % об. Ar + 18 % об. CO₂) і M11 (98 % об. Ar + 2 % об. CO₂). Для наплавлення кремнієвої бронзи використовували чистий аргон. В якості зварювального джерела живлення використане FroniusTransPuls Synergic 2700 з підтримкою технології CMT та імпульсної подачі зварювального струму. З метою зіставлення фактичних результатів та визначення основних залежностей, швидкість зварювання та швидкість подачі присадних дротів складали $V_n = 600$ мм/хв та $V_{\text{под}} = 3,5$ м/хв відповідно.

Аналіз геометричних характеристик зразків свідчить, що склад захисної газової суміші має суттєвий вплив на висоту наплавлених шарів незалежно від методу наплавлення (CMT/Pulse). Особливість перебігу GMAW-CMT процесу, зокрема перенесення електродного металу з короткими замиканнями, виключає явище розбризкування металу в процесі наплавлення. При послідовному формуванні 50 шарів GMAW-CMT наплавленням у захисній газовій суміші M11 загальна висота стінок зразків складала 75 мм. Наплавлення в захисній газовій суміші M21 з більшим вмістом CO₂ призводить до зменшення загальної висоти стінок зразків до 68 мм. Ефективна ширина стінок наплавленого металу зменшується при заміні газової суміші M21 на M11 і складає ~4 та ~3,6 мм відповідно. Одночасно спостерігається збільшення величини відхилення про-

філю у середньому на 45...47 %. При GMAW-Pulse наплавленні сталі G3Si1 висота стінок є мінімальною, а їх ефективна ширина досягає максимальних значень. Заміна газової суміші з M11 на M21 призводить до зменшення ефективної ширини стінок з одночасним зменшенням відхилення профілю на ≈ 23 %.

За результатами металографічних досліджень отриманих шліфів встановлено, що в структурі металу наявні дисперсні неметалеві включення округлої форми. Ці включення представляють собою оксиди та силікати, що рівномірно розподілені по об'єму наплавленого металу. Структура металу є типовою для багатошарового наплавлення. За результатами механічних випробувань усі наплавлені зразки з G3Si1 демонструють границю міцності на рівні від 540 до 570 МПа. Наплавлений GMAW-CMT методом із застосуванням газової суміші M11 метал зразка демонструє більшу на 5...7 % (601 МПа) границю міцності у порівнянні з іншими зразками, однак має дещо меншу пластичність відносно інших варіантів наплавлень.

Дослідження із застосуванням кремнієвої бронзи дали схожі до сталі результати щодо залежності геометричних розмірів наплавлених шарів від застосованого методу (CMT/Pulse) наплавлення. Висота 50-ти наплавлених шарів зразків з кремнієвої бронзи (CuSi3Mn1), які отримані GMAW-CMT процесом на 18 % більша у порівнянні з GMAW-Pulse процесом (54,9 та 44,9 мм відповідно), а ефективна товщини отриманих стінок менша (5,9 та 8,4 мм відповідно). Бокові поверхні стінок мають чітко виражені напливи закристалізованого металу окремих шарів, що призводить до збільшення показника відхилення профілю бокових поверхонь від 0,5 до 1,13 мм. Для GMAW-Pulse методу, показник нерівномірності менший, та лежить у межах 0,72...0,82 мм. Аналіз мікроструктури металу зразків отриманих за обома технологіями наплавлення вказує на формування однофазної структури α -твердого розчину складного хімічного складу. В основному, структура наплавленого металу зразків складається із масивних зерен з різним ступенем травлення та орієнтацією, що відрізняються твердістю. Мікротвердість зерен відрізняється на різних ділянках наплавленого металу та знаходиться в межах від 876 до 1280 МПа для CMT та від 1160 до 1460 МПа для Pulse процесу.

В металі зразків наплавлених методом Pulse, на відміну від CMT процесу, після досягнення 20-го шару спостерігається виникнення тріщин, які перетинають зразок перпендикулярно напрямку наплавлення. Подальше наплавлення шарів відзначалось повторним виникненням нових тріщин. Така поведінка кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 під час пошарового наплавлення спровокована структурними перетвореннями, які спричиняють анізотропію механічних властивостей матеріалу та формуванням масивних стовпчастих зерен. Додатковим фактором є значна усадка металу при кристалізації з рідкого стану, що створює передумови накопичення значних залишкових напружень при багатошаровому наплавленні.

Методом скінченно-елементного моделювання встановлено, що формування тріщин у зразках з кремнієвої бронзи CuSi3Mn1, які були виготовлені GMAW-Pulse методом, пов'язане з більшим у порівнянні GMAW-CMT наплавленням тепловкладенням, що призводить до суттєвого зростання рівня поздовжніх напружень розтягу, які сягають межі міцності матеріалу (≥ 176 МПа) в інтервалі температур 490...550 °C.

ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ 3D ДРУКУ ВИРОБІВ ІЗ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

**Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Ілляшенко Є.В.,
Вдовиченко Д.М., Вдовиченко І.М., Божок О.Є., Терещенко О.С.**
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Зростання актуальності 3D друку готових металевих виробів в останні роки обумовлене необхідністю створення досить складних деталей, необхідних у невеликій кількості, потребою у скороченні витрат на виготовлення, механічну обробку, у зміні типорозмірів і номенклатури деталей, необхідністю отримання суцільних деталей зі складною внутрішньої геометрією. Одним з найбільш перспективних процесів 3D друку, який забезпечує широкий діапазон продуктивності (0,02...25 кг/год і більше) при можливості наплавлення стінки товщиною 2...20 мм є адитивне плазмове-дугове наплавлення (АПДН) дротами і порошковими матеріалами.

Можливості використання технологій АПДН для отримання об'ємних виробів із конструкційних, легованих і високоміцних сталей, нержавіючих сталей, жаростійких нікелевих сплавів, алюмінієвих і титанових високоміцних сплавів пов'язані із високим рівнем фізико-механічних характеристик одержуваних виробів, які переважно складають 90 % і вище від показників аналогічних матеріалів, отриманих традиційними металургійними методами. У переважній кількості випадків це задовольняє вимогам стандартів для таких матеріалів після їх термомеханічної обробки. Значна продуктивність і досить високі фізико-механічні показники одержуваного металу забезпечують високий потенціал і переваги АПДН у порівнянні із розповсюдженими дуговими WAAM методами, в тому числі CMT і TIG.

Використання АПДН забезпечує можливість створення функціонально-градієнтних матеріалів. Для цього формування просторових виробів може здійснюватися із одночасним подаванням в плазмову дугу різних типів дротів і порошкових матеріалів (наприклад, порошків конструкційних сталей, зносостійких, жароміцних сплавів, карбідів, боридів, силіцидів тощо) або з одночасним подаванням дроту і порошку (гранул). Такі матеріали є перспективними для виробництва відповідальних деталей та інструментів нового покоління, в яких, наприклад, певна частина об'єму забезпечує задані показники міцності, а інша — підвищену зносостійкість, корозійну стійкість, жаростійкість, спеціальні магнітні та електрофізичні властивості.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено низку інноваційних технологій АПДН та створено відповідне оригінальне обладнання для 3D друку крупногабаритних виробів зі сталей, алюмінієвих та титанових сплавів.

АДИТИВНІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Матвійчук В.А.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

В Україні актуальним є створення обладнання та програмного забезпечення для реалізації адитивного електронно-променевого виробництва, вільного від імпортової сировини, орієнтованого для впровадження на підприємствах авіакосмічної промисловості і турбінобудування: АТ «Мотор Січ», АТ «КБ «Прогрес», КБ «Південне», ТОВ «ЛРЗ «Мотор», ДП «Зоря»—«Машпроект». В умовах воєнного стану актуальним є забезпечення медичної галузі надійними, конкурентоспроможними вітчизняними імплантатами та протезами. Адитивні методи є найбільш ефективними для виробництва індивідуальних медичних засобів.

Метою досліджень є створення адитивного обладнання та технологій виготовлення виробів методом пошарового електронно-променевого наплавлення із застосуванням різних типів металевих порошкових матеріалів.

За результатами досліджень розроблено адитивне устаткування для виготовлення металевих виробів, створено програмно-апаратну платформу управління адитивним виробничим процесом, визначено вплив технологічних параметрів на властивості виробів.

В дослідженнях застосовані металеві порошкові матеріали із сплавів титану Ti-6Al-4V, TA15 та сплавів цирконію Zr-Ti-Nb, які виготовлені за технологією плазмового розпилення електроду, що обертається.

Для титанових сплавів Ti-6Al-4V і TA15 з точки зору формування сприятливої мікроструктури режим наплавлення з густиною енергії від 40 до 45 Дж/мм³ та кроком зміщення траєкторії 0,2 мм дозволяє отримати дисперсну мікроструктуру матеріалу в якому відсутні непроплавлення та мікропори усадки. Цей режим дозволяє набути виробам із сплаву титану TA15 вищих значень межі міцності та текучості відповідно на 27 та 24 % у порівнянні із зразками, отриманими із литого металу титанового сплаву TA15, що одержані за традиційною технологією електронно-променевої плавки. Відносно видовження матеріалу, виготовленого адитивним методом, вище у 3,2 рази у порівнянні з литим металом. Обмежена границя витривалості на базі 2 мільйонів ци-

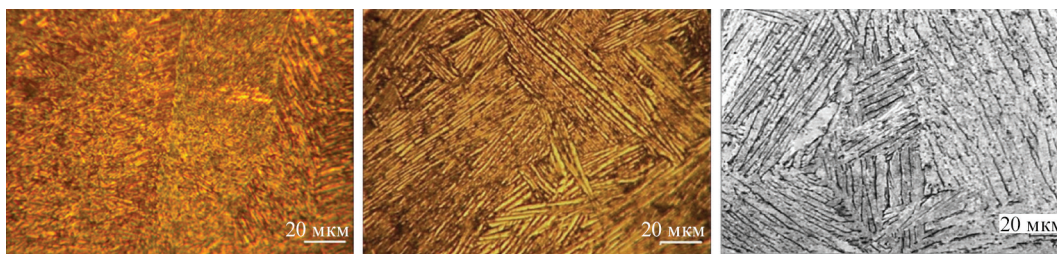
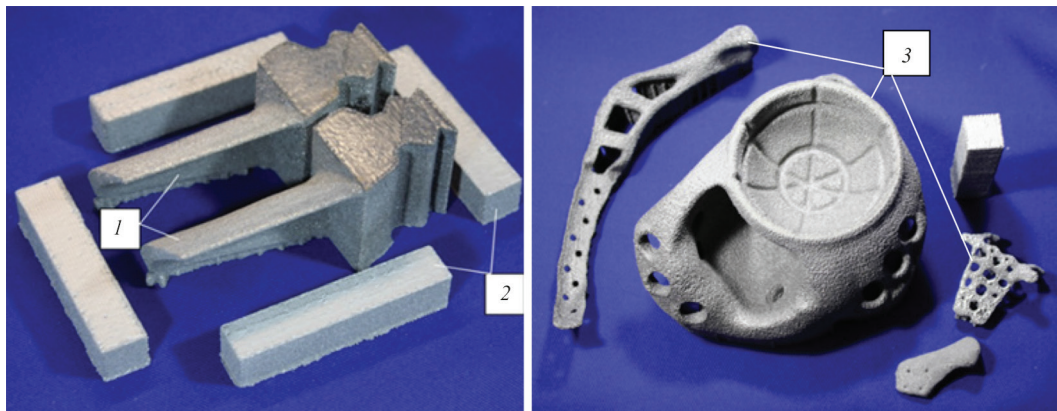


Рис. 1. Мікроструктура зразків із сплаву TA15, які виготовлені методами: *a* — електронно-променевого друку; *б* — електронно-променевої плавки; *в* — електронно-променевої плавки з термодформаційною обробкою



Вироби з TA15: 1 — роторна лопатка ГТД; 2 — дослідні зразки; 3 — індивідуальні медичні імплантати

клів друкованого металу на 32 та 11% перевищує відповідні показники для литого та деформованого металу. Це пов'язано з формуванням більш дисперсної мікроструктури зразків, отриманих за технологією 3D друку (рис. 1).

Для сплаву цирконію системи Zr–Ti–Nb режим друку із швидкістю променя 500 мм/с та густиною енергії 40 Дж/мм³ дозволив сформувати в матеріалі зразків дисперсну мікроструктуру та поверхню без дефектів. Механічні властивості зразків за показниками міцності та пластичності наближені до сплаву титану Ti–6Al–4V. При цьому значення модуля пружності до двох разів нижче, ніж у титанових, і більш наближений до властивостей кісток людини.

За результатами досліджень розроблено оптимізовані цифрові моделі, за якими з титанового сплаву TA15 надруковані лопатки ГТД, індивідуальні медичні імпланти та зразки, властивості яких були досліджені.

Визначено, що структура металу дослідних зразків є тонкопластинчастою та двофазною з розміром голчастих кристалітів α' -фази до 1,8 мкм, твердість становить біля 40 HRC, а пористість не перевищує 0,45 %.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ БАГАТОШАРОВОГО ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ

Степанов Д.В.¹, Чвертко Є.П.¹, Мінаков С.М.¹, Мінаков А.С.¹, Стреленко Н.М.¹,
Вдовиченко І.М.², Вдовиченко Д.М.²

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Дугові адитивні технології — відносно новий тип споріднених технологій зварювання. Застосування класичних технологічних прийомів при дуговому адитивному виробництві потребує корекції з огляду на особливості реалізації цих технологій. Зокрема, при багатошаровому тонкостінному наплавленні тіл обертання типу фланець, а саме наплавлення в нижньому положенні зі зміщенням пальника в ту чи іншу сторону, або в зеніті не дозволяє реалізовувати поставлену задачу через погіршення формування наплавленого валика починаючи з 3 проходу.

Дану проблему вдалося вирішити зміною відносного розміщення пальника та тіла обертання (в дослідженнях основою були труби різного діаметру). Пальник було розміщено перпендикулярно до вертикальної осі труби зі сторони протилежної обертанню.

Експерименти щодо реалізації технології здійснювались за допомогою експериментальної установки розробленої на кафедрі зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського. Установку детально описано у журналі Автоматичне зварювання [1].

Реалізація процесу здійснювалась при використанні мови програмування Python, яка генерувала G-коди, за допомогою яких здійснювалось управління процесом, а саме запуск установки, регулювання швидкості обертання в ході наплавлення, переміщення пальника тощо.

Формування наплавлених швів за описаною схемо відбувалось рівномірно, без збурень та порушення формування. Однак спостерігався певний перегрів наплавленого металу після 4 проходу. Дослідження тривають.

1. Мінаков С.М., Мінаков А.С., Степанов Д.В. та ін. (2025) Системи переміщення для дугового адитивного виробництва на базі типового устаткування. *Автоматичне зварювання*, **1**, 45–49. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2025.01.07>

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ АДИТИВНОЇ ДУГОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ 3D ДРУКУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ Inconel 625

Томко Д.¹, Мотруніч С.²

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Inconel 625 — це нікель-хром-молібденовий сплав із високим вмістом нікелю (58–69 %), в порівнянні з іншими сплавами Inconel. Він має високу температуру плавлення, міцність і стійкість до високих температур. Крім того, він володіє високими антикорозійними та антиокислювальними властивостями. Це робить його широко використовуваним в ядерних реакторах, авіації та морській техніці. Форми більшості елементів та конструкцій в цих галузях мають складну форму, що робить їх виготовлення дуже дорогим традиційними методами, через необхідність інтенсивної механічної обробки. Наприклад, літературний огляд показав, що виготовлення ребер жорсткості шасі літаків за дуговими аддитивними технологіями (WAAM) дозволяє зекономити до 78 % вартості сировини порівняно з іншими традиційними процесами послідовної механічної обробки. Також показано, що показники міцності елементів конструкцій отриманих методом WAAM мають співставні з литими деталями з Inconel 625.

В рамках експериментального дослідження для дугового адитивного 3D друку, використовували джерело живлення Fronius TPS 5000. Як присадковий матеріал застосовувався сертифікований матеріал INCONEL Filler Metal 625 (UNS N06625, ISO 15156-3) діаметром 1,2 мм, для дугового зварювання в середовищі захисних газів, використовувався для WAAM. Процедuru наплавлення металу реалізувалася за допомогою роботизованої руки ABB2600. Режим зварювання наплавленням було прийнято як оптимальний відповідно до специфікації Fronius для конкретних зварювальних витратних матеріалів і представлено в табл. 1.

Геометричні параметри отриманого елемента стінки склали 150×70×15 мм. ехнологія передбачала контрольоване охолодження: кожен наступний шар накладався після досягнення попереднім температури не вище 100 °С. Маршрут сканування та виготовлений елемент стіни схематично показані на рис. 1, а. Для комплексного дослідження механічних властивостей було виготовлено серію циліндричних зразків для випробувань на одновісний розтяг. Зразки вирізалися як вздовж напрямку нарощування «стінки», так і в поперечному напрямку у верхній, середній та нижній частинах надрукованої конструкції для оцінки анізотропії властивостей (рис. 1, б).

Таблиця 1. Технологічні параметри 3Д друку сплаву Inconel 625

№	Швидкість зварювання, мм/с	Швидкість подачі дроту, м/хв	Захисний газ	Подача газу, л/хв	Зварювальний струм, А	Зварювальна напруга, В
1	10	4.3	Ar, 99,99 %	15	107	15,9
2			Ar + 2,5 % CO		92	10,3

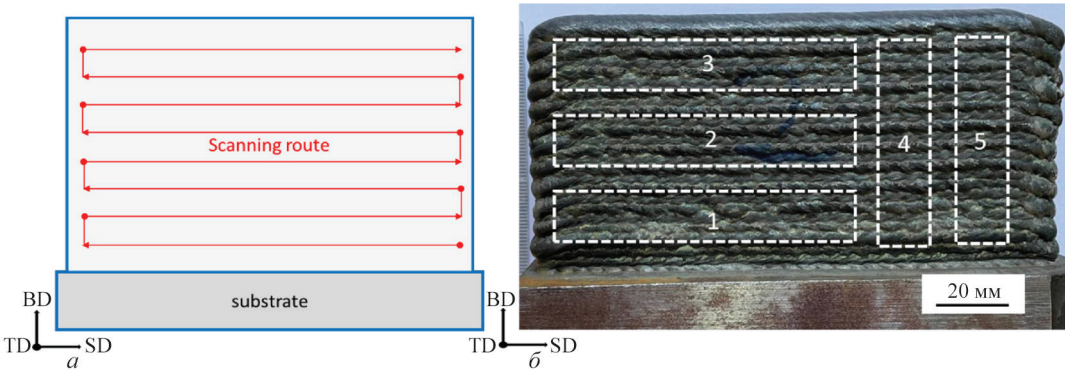


Рис. 1. Схематичне зображення процесу 3D друку (а) та виготовленого елемента стінки (б); BD — напрямок по висоті 3D друку; SD — напрямок сканування; TD — поперечний напрямок

Таблиця 2. Механічні властивості досліджуваних зразків із сплаву Inconel 625

Технологія	Місце вирізки зразка	$R_{0,2}$, МПа	R_m , МПа	A_5 , %	Z , %
1 (Ag, 99,99 %)	SD (низ)	383,1	712,1	27	56
	SD (середина)	384,5	688,6	26	59
	SD (верх)	370,5	671,4	25	53
	TD (по висоті)	371,9	661,5	28	76
2 (Ag + 2,5 % CO)	SD (низ)	400,7	701,1	31	60
	SD (середина)	394,9	686,1	35	59
	SD (верх)	390,2	679,3	34	62
	TD (по висоті)	399,6	677,4	34	78

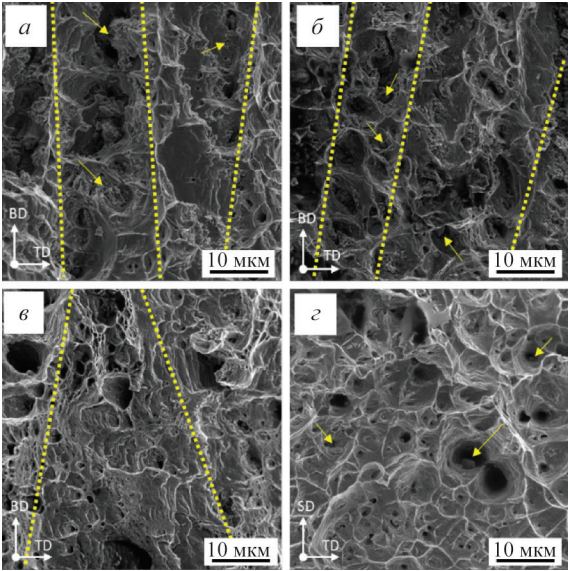


Рис. 2. Поверхня зламів зразків елемента Inconel 625: нижня (а), середня (б), верхня (в) по висоті (z)

Випробування на розтяг проводили при кімнатній температурі відповідно до ДСТУ EN ISO 6892-1:2022 «Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури» (EN ISO 6892-1:2019, IDT; ISO 6892-1:2019, IDT) та визначали основні механічні властивості металу зразків: границю міцності (R_m), умовну границю плинності ($R_{0,2}$) та характеристики пластичності (A_5 — рівномірне видовження після розриву та Z — відносне звуження). З заготовок виготовляли циліндричні зразки з діаметром робочої частини 6 мм (тип II відповідно до ISO 6892-1). Випробування на розтяг проводили на універсальному сервогідравлічному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН.

Результати випробувань на одновісний розтяг наведені в табл. 2. Показано, що 1-й режим 3D друку (Ag, 99,99 %) має дещо нижчі показники пластичності чим 2-й технологічний режим (Ag + 2,5 % CO). Проте 1-й режим має дещо вищі показники міцності. Рівномірний розподіл значень видовження спостерігається для всіх досліджуваних технологічних режимів, що свідчить про однорідну структуру зразків. Така закономірність механічних властивостей визначається особливостями структуроутворення при багатошаровому наплавленні.

Відповідні фрактограми для зразків на розтяг представлені на рис. 2 пунктирними лініями виділено положення дендритних плечей. Загальний характер руйнування пластичний зі змішаною морфологією для горизонтальних зразків (рис. 2, а, б), а саме одночасне існування зон з ямками невеликого розміру, а також великими ямками, переважно міждендритними. Вертикальний (по висоті) зразок (рис. 2, в) має різну морфологію, без явних слідів дендритної структури, а ямочки однорідні та розподілені однорідно. Це пояснюється підвищеним рівнем пластичності у вертикальному (поперечному) напрямку елемента «стілки». Такий характер поверхонь зламу добре узгоджується з даними механічних випробувань.

ШВИДКІСНА СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЇ ДІАГНОСТИКИ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ OKOSCAN-73 HS

Галаненко Д., Міщенко В., Паренюк А.
OKOndt GROUP, Київ

Для проведення швидкісного етапу ультразвукового контролю рейок було розроблено високошвидкісні системи OKOSCAN-73HS. Такі системи можуть виконуватися на базі залізничних вагонів та транспортних засобів (автомобілів на комбінованому ході). Залізничні вагони або спеціалізовані вантажівки з обладнаними кабінами створюють оптимальні умови для проведення інспекційних робіт на довгих ділянках залізничних колій. Вони забезпечують просторе робоче середовище, в якому можна розмістити великогабаритні дисплеї та створюють комфортні умови для операторів, що дозволяє підтримувати їхню працездатність і концентрацію протягом тривалих змін. Вантажівки мають універсальне застосування, адже дозволяють починати та завершувати перевірки на будь-якому переїзді, що значно полегшує логістику в зонах з інтенсивним рухом. Позашляхові пікапи — економічне рішення для огляду розрізнених або важкодоступних ділянок. Вони зручні для маневрування, однак мають обмеження: менший простір для обладнання, обмежений об'єм бака для контактної рідини та знижений комфорт для операторів під час тривалих виїздів.

Система здатна проводити контроль на швидкості до 60 км/год завдяки використанню імерсійних коліс — інноваційної пошукової системи. Для досягнення швидкості до 40 км/год застосовуються чотири колеса, а для 60 км/год — шість. Загальна кількість перетворювачів 24 — по 12 на кожну рейку. Для проведення якісної і ефективної перевірки застосовуються перетворювачі з кутами введення 0°, 70° та 45°, а для виявлення вертикальних тріщин у бокових гранях головки використовується бокова схема прозвучування з кутом 50°. Така комбінація забезпечує надійне охоплення всього поперечного перерізу рейки, за винятком пір'їв підшоши. Роботизована підвіска ультразвукових коліс із трьома ступенями свободи дозволяє максимально точно позиціонувати колесо на рейці, що дає змогу проводити високоточний контроль навіть у складних умовах. Система також оснащена навігаційною системою GNSS, а результати виводяться у форматах А- та В-сканів.

Щоб оптимізувати обробку та інтерпретацію великих обсягів даних перевірки, для систем OKOSCAN-73HS був розроблений спеціальний програмний модуль інтелектуального машинного аналізу. Це сучасне програмне забезпечення здійснює аналіз отриманих даних, ефективно фільтрує шумові артефакти та формує детальну таблицю підозрілих індикацій із присвоєнням кожній класифікаційного коду дефекту. Залежно від конкретних вимог користувача, система може генерувати різноманітні детальні звіти для підтримки планування технічного обслуговування та оцінки стану колій.

Системи повністю охоплюють ділянки ультразвукового контролю, визначені в стандарті ДСТУ EN 16729-1:2018 та можуть реалізувати детальний контроль з високою точністю, що дає змогу виявляти велику кількість різноманітних дефектів.

Завдяки високій ефективності та здатності оперативно охоплювати великі території, система OKOSCAN-73HS є надзвичайно цінним інструментом для своєчасного виявлення потенційних загроз і порушень, що дозволяє швидко реагувати та запобігати розвитку критичних ситуацій.

УЛЬТРАЗВУКОВИЙ КОНТРОЛЬ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ

Глабець С.М.

*НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
співробітник ТОВ «НВФ Діагностичні прилади»*

Для транспортування технологічних рідин, газів, води використовуються металеві трубопроводи. Класичні сталеві труби з'єднані зварюванням мають обмежений термін експлуатації з-за недоліків:

- старіння металу;
- корозії;
- накопичення забруднень;
- складності монтажу та ремонту.

Альтернатива сталевим трубами — труби з поліетилену високої щільності (ПВЩ), що має численні переваги — відсутність корозії, стійкість до перепадів температур і замерзання, мала вага і швидкість зварювання.

Метою дослідження є порівняння класичних підходів до контролю якості зварних з'єднань сталевих труб з наявними вимогами до труб з ПВЩ, з'ясувати можливість використання і адаптації ультразвукових методів неруйнівного контролю до контролю труб з ПВЩ.

Для розуміння шляхів вирішення цієї задачі необхідний аналіз наступних питань:

- методи (способи) зварювань ПЕ труб;
- типи дефектів зварних з'єднань ПЕ труб;
- існуючі методи контролю якості: руйнуючі і не руйнуючі, та їх недоліки;
- традиційні методи НК, переваги недоліки: радіографічний; ультразвукового контролю (УЗК) луна-імпульсний та ФАР.

Ультразвуковий метод є безпечним і у більшості задач є достатньо ефективним для зварних з'єднань сталевих труб.

Особливості УЗК для контролю ПВЩ труб: введення, затухання, чутливість, орієнтація дефектів, мертві зони, сканери.

Останні роки став широко використовуватися різновид УЗК — дифракційно-часовий метод (ДЧМ, time of flight diffraction (TOFD)).

Використання ДЧМ в поєднанні з скануючим пристроєм та сучасним цифровим дефектоскопом

Переваги та обмеження ДЧМ.

ВИСНОВКИ

ДЧМ є безпечнішою та ефективнішою альтернативою радіографії та класичному УЗК. Метод потенційно може бути основним методом контролю зварних з'єднань труб з ПВЩ за умови адаптації обладнання та методики контролю до особливостей матеріалу.

СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА ДАНИХ ТА ПОРОГОВА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДЕФЕКТІВ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ПРО- МИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ВИРОБІВ ТЕПЛОВІЗІЙНИМ МЕТОДОМ

Глуховський В.Ю., Литвиненко В.А.

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

Технологія тепловізійного неруйнівного контролю включає етапи виявлення та оцінки дефектів. Етап виявлення дефектів завершений, якщо оператор або автоматичний пристрій прийняв рішення про відповідність контролюваного об'єкту нормативним вимогам з якості, або прийняв рішення про наявність дефектів. В більшості випадків рішення про ступінь важливості виявлених дефектів приймає кінцевий споживач на основі існуючих норм та стандартів.

В тепловому контролі висновок про якість об'єкту приймають на основі аналізу величини виявлених температурних аномалій, які залежать від геометричних та теплофізичних характеристик дефектів, особливостей їх розвитку в часі, а також морфології температурних зон на поверхні контролюваного виробу.

Для виявлення прихованих дефектів за їх поверхневими температурними відбитками необхідно щоб теплофізичні характеристики (ТФХ) дефектів були відмінними від ТФХ основного матеріалу, а також щоб дефекти створювали максимальне збурення від теплових потоків, які створюють відповідні температурні аномалії.

Аналіз результатів термографічного дослідження з метою виявлення потенційного дефекту для окремого елемента термограми визначається через функцію розподілу ймовірності температури, що порівнюється з аналогічною функцією для однорідної ділянки тестового об'єкта.

При тепловому контролі вхідна інформація від контролюваного об'єкту надходить до оператора або автоматичного приладу, після чого робиться висновок з використанням відповідних способів та апаратури.

Найпростіший випадок прийняття рішення в одновимірному просторі інформативних ознак, яке робить оператор або автоматичний прилад, відбувається на піксельному рівні з використанням температури в якості інформативного параметру. Це дозволяє кожному області на термограмі віднести до класу «дефектних», чи «бездефектних».

Результатом такої класифікації виступають бінарні карти дефектів, що являють собою бінарні зображення, в яких одиничний піксель відповідає дефектним зонам, а нульовий — бездефектним. Карты дефектів, побудовані для визначеної області контролю, характеризуються статистичними показниками, а саме вірогідністю вірного виявлення та вірогідністю хибної тривоги, що виникають після введення порогу дефекту.

Ймовірність вірного виявлення дефекту та ймовірність хибної тривоги є основними якісними показниками приймачів виявлення, що залежать від величини порогу прийняття рішень.

Для реалізації пристрою порогової ідентифікації дефектів у складі лазерно-теповізійної системи для діагностування промислових об'єктів та виробів тепловізійним методом розроблено спосіб прийняття рішень в процесі статистичної оцінки даних при тепловізійному контролі промислових об'єктів, що дозволило отримати залежності густини вірогідності виявлення дефектної області від кількості дефектних пікселів, шляхом аналізу теоретичних моделей та відповідних термограм, отриманих в результаті тепловізійного контролю промислового димаря для котлоагрегатів ПТВ-100 промислового димаря для котлоагрегатів ПТВ-100 висотою 120 м, діаметром гирла 4,8 м, з товщиною стінки в зоні контролю 840 мм. Це дозволило виконати процедуру відсіву ефектних областей від бездефектних для їх подальшого аналізу.

ОЦІНКА РИЗИКІВ КРИХКОГО РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ М16С ТА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ГОЛОВНИХ ПОВЗДОВЖНИХ БАЛОК МОСТУ ПАТОНА

Дядін В.П., Тороп В.М., Давидов Є.О.

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

Розглянуто питання визначення опору крихкому руйнуванню сталі М16С та її зварних з'єднань головних повздовжніх балок під час оцінки технічного стану та обґрунтування подовження подальшої безпечної експлуатації мосту ім. Є.О. Патона через річку Дніпро в м. Києві. Коротко описані особливості об'єкта контролю і результати обстеження. Запропоновано підхід до оцінки ризиків крихкого руйнування повздовжніх балок мосту, що знаходиться в експлуатації з 1953 року.

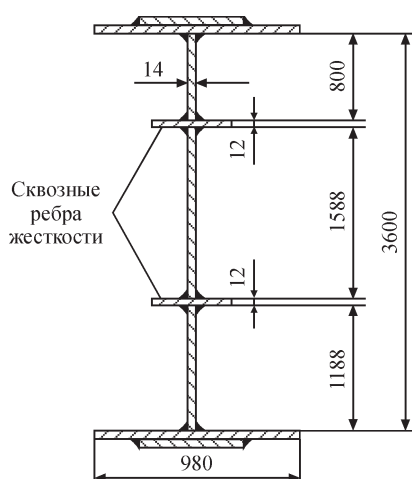


Рис. 1. Поперечний переріз ферми головних повздовжніх балок 4-х прогонових і 5-ти прогонових споруд моста

Ризик-аналіз — це ключове поняття в сучасних підходах щодо планування діагностичних і ремонтних робіт, що встановлює баланс між імовірністю руйнування і його наслідками. Детальне проведення ризик-аналізу вимагає величезних зусиль щодо кількісного визначення параметрів, які не завжди можуть бути формалізовані і враховані в силу своєї випадковості та значних об'ємів даних, що необхідно заміряти на протяжних об'єктах, прикладом яких може слугувати міст ім. Є.О. Патона, що складається з 24-х прогонових споруд, загальною довжиною 1542,2 м. У поперечному перерізі кожна споруда має чотири головні повздовжні балки двотаврового перетину, що складаються з вертикальної стінки, висотою 3600 мм і товщиною 14 мм і поясів різної товщини, яка змінюється від 30 до 80 мм, при ширині до 1000 мм (рис. 1). Стійкість стінки балки додатково забезпечується вертикальними ребрами, встановленими з кроком 7,25 м. У 6-ти прогонових спорудах, висота стінки над проміжними опорами, за рахунок пристрою вутів, збільшена до 6200 мм. Відстань між осями головних повздовжніх балок — 7600 мм.

Головні повздовжні балки складаються з ферм, зварених між собою встик з використанням автоматичного зварювання під флюсом під час монтажу металевих конструкцій. Кількість ферм в кожній з 4-х прогонових головних повздовжніх балок становить 9 штук, в 5-ти прогонових головних балках — 11 штук, а 6-ти прогонових головних балках — 21 шт. Ферми виготовлені з низьковуглецевої сталі марки М16С (сучасний її аналог сталь ВСт3сп).

На час виготовлення мосту ім. Є.О. Патона, що знаходиться в експлуатації з 1953 року, підходи щодо оцінки опору крихкому руйнуванню запропонованої сталі були ще тільки на початку свого розвитку. Єдине на що зверталась увага, то це вплив ударної в'язкості та деформаційного старіння на властивості основного металу і зварного з'єднання. Згідно з тоді діючим ГОСТ 6713–53 дослідження впливу деформаційного старіння на сталь М16С проводились на ударних зразках типу Менаже з температурою випробувань +20 °С, що не відповідало проектній температурі експлуатації конструкції. Теж саме стосується і ударної в'язкості, мінімальна температура випробування якої складала мінус 20 °С. Зважаючи на занижені вимоги до ударної в'язкості сталі М16С, згідно результатів випробувань наведених в таблиці 1, слід вказати на значний розкид експериментальних даних, що може пояснюватись зоною крихко-в'язкого переходу для даної сталі. Разом з тим, результати випробувань зварних швів виконаних на листовому прокаті товщиною 12, 14 мм цілком задовольняли вимогам [1, 2]. Але і в цьому випадку повністю відсутні дані щодо характеристик ударної в'язкості в зоні термічного впливу зварного з'єднання, хоча вже тоді з практичного досвіду було відомо, що в залежності від режимів зварювання вони можуть бути суттєво меншими від показників ударної в'язкості зварного шва та основного металу.

Визначення ударної в'язкості на стандартних зразках Менаже досі ще має місце, незважаючи на те, що практично в усьому світі використовується зразок Шарпі. При цьому, основний аргумент на користь зразка Менаже зводиться до того, що даний радіус закруглення (1,0 мм) дозволяє більш повно охопити зону звар-

Таблиця 1. Механічні властивості листового прокату сталі М16С [1, 2]

Товщина прокату	Механічні властивості основного металу						
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	$\delta/(\delta_{10})$, %	ψ , %	Ударний згин KCU , Дж/см ²		
					+20 °С	+15 °С	–20 °С
ГОСТ 6713–53	≥230	≥380	≥26/(22)	≥50	78-поперек 68-вздовж	–	39-поперек 34-вздовж
Лист 10, 14, 16 мм	231...335	385...481	22...31	–	–	81...206	10...124
Універсал 20, 30, 40 мм	220...395	385...485	18...35	55...60	–	86...187	9,6...102

ного з'єднання або основного металу, що досліджується. Це дає можливість оцінити середню інтегральну характеристику в'язкості зварного з'єднання при проведенні меншої кількості випробувань порівняно із зразками Шарпі, які через малий радіус закруглення у вершині надрізу (0,25 мм) не можуть охопити відразу всю область, що досліджується.

Разом з тим, відсутність максимальних областей стиснення матеріалу перед надрізом зразка Менаже не дозволяє відтворити реальну картину розподілу напружень в процесі руйнування, які властиві тріщиноподібному дефекту в зварних конструкціях. У зв'язку з цим, визначена температура в'язко-крихкого переходу на даному типі зразка зсувається в область нижчих температур, що не відповідає реальній картині руйнування зварних металоконструкцій.

В наш час вже відомо, що вимоги, які пред'являються до величини ударної в'язкості зразка Шарпі, досить добре узгоджуються з опором конструкційних сталей та їх зварних з'єднань можливому зростанню дефектів типу тріщина, які у свою чергу контролюються за допомогою різних критеріїв механіки руйнування. Іншими словами, значення ударної в'язкості зразка Шарпі характеризують опосередкованим чином опір конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань можливому зростанню дефектів (тріщиностійкості).

Природно, виникає бажання встановити можливий зв'язок між цими типами зразків при різних видах руйнування (в'язке, квазіхрихке і крихке), що, дозволило б значно розширити використання підходів механіки руйнування при діагностиці зварних металоконструкцій та оцінки їх подальшої працездатності з урахуванням виявлених пошкоджень неруйнівними методами контролю.

Результати проведеного нами обстеження головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві свідчать про те, що внаслідок протікання крізь деформаційні шви дощової води та води, що утворилася внаслідок танення снігу (містить солі), на зварні металоконструкції головних балок, метал кінцевих ділянок ферм, яких примикає до деформаційних швів, зазнав локальних і місцями значних корозійних ушкоджень. За рахунок корозії товщина металу в елементах конструкції, а саме нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах і в нижній частині стінок головних балок суттєво зменшилася. В окремих випадках (наприклад, в фермах Ф10 і Ф15 головної балки № 1 та фермах Ф1 і Ф3 головної балки № 4) товщина стінок зменшилась на 40..50 % [3]. Наявність таких корозійних уражень може суттєво знижувати опір втомному руйнуванню зварних з'єднань з виявленими дефектами, що свідчить про зростання ризику руйнування прогонової споруди у випадку подальшого розвитку корозійних процесів.

Для прикладу на рис. 2 наведено результати 133-х замірів товщини стінки ферми та 113-ти замірів товщини вутів для ферми Ф46 головної балки № 4 [3]. Виявлені корозійні пошкодження завглибшки 2...4 мм (позначені жовтим маркером) та більше 4 мм (червоним). Неметалічні включення позначено зеленим маркером на рис. 2.

Слід зазначити, що чим менша кількість замірів, тим більше ризик пропустити той чи інший дефект. Крім того, корозійні потоншення в зоні зварних швів можуть слугувати додатковим джерелом утворення корозійних тріщин, що ілюструє рис. 3.

Зварні металоконструкції головних балок мосту ім. Є.О. Патона мають досить високий рівень надійності при експлуатації, що еквівалентно малому ризику руйнування. Це досягається комбінацією вдалого проєктування, оптимального вибору матеріалів і ефективною експлуатаційною практикою. Більшість причин відмов мостів в усьому світі — зовнішнє механічне ушкодження і корозія. Тому, щоб визначити, яку небезпеку для зварних металоконструкцій являють ці дефекти, необхідно застосовувати відповідні методи їх оцінки [4]. За останні 50 років була розроблена велика кількість критеріїв для оцінки дефектів у зварних металоконструкціях з метою з'ясування необхідності ремонту даних конструкцій. У зв'язку з цим, питання про вибір методу оцінки дефектів, що виявлені методами неруйнівного контролю в металоконструкції, набуває нового значення. З одного боку, метод повинен бути консервативним, щоб запобігти несподіваній відмові. А з ін-

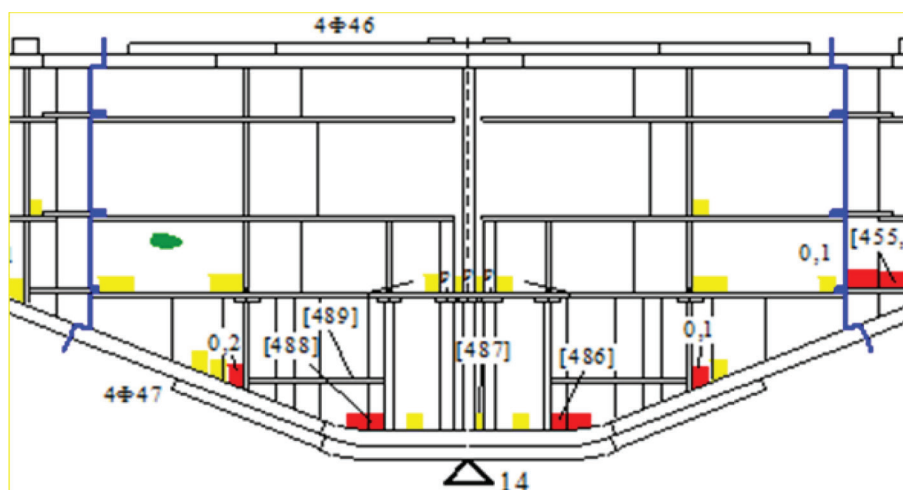


Рис. 2. Результати замірів товщин стінки ферми та вутів для ферми Ф46 головної балки № 4 [3]



Рис. 3. Тріщина, що утворилась в зоні корозійного потоншення зварного шва ферми Ф46 головної балки № 4

шого, він повинен бути досить простим та оперативним (інженерним), щоб уникнути непотрібних витрат на ремонт зварної металоконструкції.

На основі досліджень, що були проведені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, було встановлено що у випадках в'язкої та крихкої руйнації стандартних ударних зразків типів Менаже та Шарпі спостерігаються практично постійні коефіцієнти кореляції між ними [5, 6]. Так, у випадку крихкого руйнування [6], коефіцієнт кореляції k між питомими роботами руйнування зразків Менаже (KCU) та Шарпі (KCV) складає близько 1,55, тобто:

$$KCV = KCU/1,55. \quad (1)$$

Зважаючи на отримані в ІЕС ім. О.Є. Патона співвідношення між ударною в'язкістю зразків Шарпі та критерієм K_{IC} [7] щодо конструкційних сталей і їх зварних з'єднань можна записати:

$$K_{IC} = 0,1(0,1 E KCV/(1-\nu^2))^{0,5}, \quad (2)$$

де K_{IC} — розрахункова характеристика тріщиностійкості в умовах плоскої деформації (МПа $\cdot\sqrt{м}$); KCV — мінімальна ударна в'язкість зразків Шарпі (Дж/см²) відповідної температури; E — модуль пружності (МПа); ν — коефіцієнт Пуассона.

З формул (1) та (2) випливає, що у випадку крихкого руйнування зразка Менаже з'являється можливість провести оцінку характеристики K_{IC} . Так, судячи з результатів механічних випробувань наведених в таблиці 1 універсальний прокат товщиною 30 мм має значний розкид значень ударної в'язкості на зразках Менаже (102...9,6 Дж/см²) відповідних температурі мінус 20 °С. Дуже низький рівень мінімальних значень ударної в'язкості свідчить про те, що частина зразків під час випробувань потрапила у діапазон крихкого руйнування, що свідчить про можливість їх використання для оцінки характеристики K_{IC} . Таким чином, виходячи з формул (1) та (2) та приймаючи мінімальне значення ударної в'язкості зразка Менаже рівним 9,6 Дж/см²,

можна оцінити мінімальне розрахункове значення характеристики K_{IC} універсального прокату відповідного мінус 20 °С. У нашому випадку $K_{IC} = 120 \text{ кгс/мм}^{1.5}$ або $38 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$.

Що стосується оцінки характеристики K_{th} , то враховуючи відсутність таких досліджень за весь час експлуатації мосту, дану характеристику можна оцінити наступним чином:

$$K_{th} = 0,5K_{IC}. \quad (3)$$

Експлуатаційні особливості повздовжніх балок у вигляді двотаврів полягають в тому що найбільш небезпечним її пошкодженням є руйнування нижніх поясів балок. В цьому випадку щодо оцінки розрахункового критичного розміру тріщини розглянемо модель у вигляді крайової тріщини в розтягнутій полосі [8]:

$$K_{IC} = \sigma_p (\pi a)^{0.5} F(a/h), \quad (4)$$

де a — глибина тріщини; h — товщина поясу балки мосту; σ_p — максимальні проектні розрахункові напруження;

$$F(a/h) = 1,12 \dots 0,231(a/h) + 10,55(a/h)^2 - 21,72(a/h)^3 + 30,39(a/h)^4. \quad (5)$$

Для відносно малих значень a/h , залежність (4) можна записати у спрощеному вигляді:

$$K_{IC} = 1,12\sigma_p (\pi a)^{0.5}. \quad (6)$$

Згідно технічному проекту Київського мосту [9], максимальні проектні розрахункові напруження $\sigma_p = 145 \text{ МПа}$, враховуючи що розрахункова оцінка $K_{IC} = 120 \text{ кгс/мм}^{1.5}$ або $38 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$, критичний розмір крайової тріщини $a_{кр}$ можна оцінити наступною залежністю:

$$a_{кр} = (K_{IC}/(1,12\sigma_p))^2/\pi = 17,4 \text{ мм}. \quad (7)$$

З іншої сторони мінімальний розмір дефекту a_p з якого можна приблизно оцінити його стабільний ріст під впливом критичних навантажень дорівнює:

$$a_p = (K_{th}/(1,12\sigma_p))^2/\pi = 4,35 \text{ мм}. \quad (8)$$

Як добре видно з результатів проведеної оцінки розмірів дефекту, його зростання до критичних значень знаходиться в дуже вузькому діапазоні, що значно підвищує ризик його пропуску та потребує більш вдосконалених методів виявлення дефектів неруйнівними методами та їх оцінки.

Тому дуже часто вдаються до якісних моделям, які на підставі досвіду експлуатації і здорового глузду встановлюють відносні ваги впливу певних груп чинників на імовірність і наслідки руйнування. Якісний ризик-аналіз використовується для планування ремонтних і діагностичних робіт. Встановлюється так звана матриця ризиків, яка визначає категорію даної ділянки, в залежності від якої встановлюються вимоги до неруйнівного контролю (інспекції) і ремонту.

Відповідно до розробленої нами «Методики визначення ризику експлуатації зварних металоконструкцій...» [10] ризик експлуатації ферми Ф46 головної балки № 4 визначається індексом 4С на матриці ризику, що приведена на рис. 4 [11] та відповідає предаварійному стану головних балок мосту ім. Є.О. Патона, при цьому імовірність руйнування досягає значення 0,8.

Сучасні методи оцінки конструкційної міцності та довговічності зварних металоконструкцій все частіше використовують імовірнісні моделі руйнування як альтернативу детерміністичному підходу. Конструкційну міцність та довговічність розглядають як безперервний процес аналізу всіх наявних даних, отриманих за допомогою моніторингу, проведених аналітичних оцінок, покращувальних дій (ремонт, оптимізація режимів та умов експлуатації і т.п.) з метою розробки довгострокової системи управління цілісністю (СУЦ) зварних металоконструкцій. Результати цього процесу в свою чергу використовуються для вироблення найбільш ефективної стратегії майбутніх дій з проведення моніторингу, оцінок і поліпшувальних дій.

Таким чином, відмови зварних металоконструкцій часто пов'язані з поломками в «системі», наприклад система захисту від корозії стала неефективною, і сукупність таких факторів, як старіння, агресивність середовища і, як результат, швидкий ріст корозії можуть привести до відмови внаслідок корозії. Цей тип відмо-

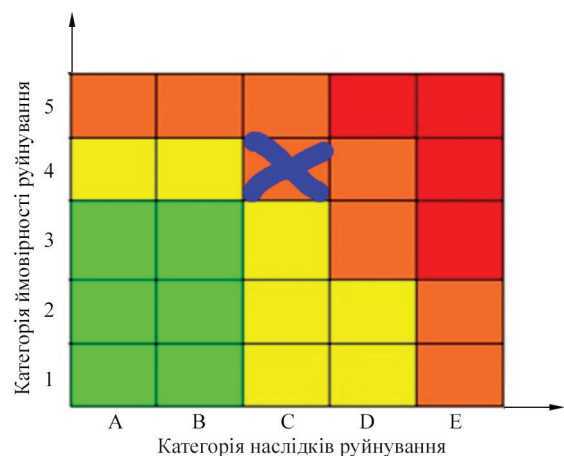


Рис. 4. Матриця ризику експлуатації ферми Ф46 головної балки №4 мосту ім. Є.О. Патона [11]

ви — не просто відмова через корозію. Він пов'язаний з пошкодженнями в системі керування захистом від корозії. Подібні міркування можуть бути розповсюджені і на відмови від зовнішнього ушкодження, втоми, корозійного розтріскування під напруженням і т.д.

Такий розгляд проблеми про причини відмов змушує прийти до висновку про необхідність створення системи управління цілісністю зварною металоконструкцією, що вбирає в себе всі зусилля, спрямовані на забезпечення міцності, надійності та довговічності металоконструкції на всьому життєвому циклі (проектування, будівництво, обслуговування і т.д.). Безпека під час експлуатації зварної металоконструкції повинна, як і раніше, залишатися головним критерієм при проведенні розрахунків на міцність. При цьому завжди необхідно оцінювати наслідки відмов і рентабельність виконання робіт по їх недопущенню.

ВИСНОВКИ

1. Для моста ім. Є.О. Патона, що знаходиться в експлуатації з 1953 року, запропоновано підхід до оцінки ризиків крихкого руйнування його головних повздовжніх балок.
2. Коротко описані особливості об'єкта неруйнівного контролю і результати обстеження технічного стану.
3. Запропоновано новий підхід до визначення характеристик в'язкості руйнування конструкційних сталей у випадку обмежених даних щодо ударної в'язкості, отриманих на зразках Менаже та Шарпі.

1. (1953) *Отчет о заводском изготовлении элементов пролетных строений Киевского городского моста на заводе им. Молотова в г. Днепропетровске*. Киев, Библиотека ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ.
2. (1953) *Отчет о монтажной сварке пролетных строений Киевского городского моста им. Е.О. Патона НАН УССР через р. Днепр*. Киев, Библиотека ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ.
3. Лобанов Л.М., Дядін В.П., Давидов Є.О., Литвиненко В.А. (2021) Вибір неруйнівних методів контролю щодо оцінки технічного стану металевих конструкцій головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **4**, 47–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.05>
4. Torop V.M. (2024) Modern levels for structural strength assessment and the algorithm for implementation of the risk analysis methodology for the operation of welded metal structures. *The Paton Welding J.*, **11**, 42–48. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.11.06>
5. Дядін В.П. (2004) Співставлення значень ударної в'язкості зразків Шарпі та Менаже у випадку в'язкого руйнування. *Автоматичне зварювання*, 24–29.
6. Дядін В.П. (2011) Особливості випробувань ударних зразків Шарпі та Менаже у випадку крихкого руйнування. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 44–47.
7. Гиренко В.С., Дядін В.П. (1985) Залежності між ударною в'язкістю і критеріями механіки руйнування δ_{1c} і K_{1c} конструкційних сталей і їх зварних з'єднань. *Автоматичне зварювання*, 13–20.
8. Сиратори М., Миеси Т., Мицусима Х. (1986) *Вычислительная механика разрушения*. Москва, Мир.
9. (1948) *Технический проект Киевского городского моста через р. Днепр*. Раздел II. Пролетные строения. МСПТИ СССР Главстальконструкция Проектстальконструкция Киевское проектное бюро.
10. (2025) *Методика визначення ризику експлуатації фізично зношених або морально застарілих зварних металоконструкцій, що не відповідають вимогам охорони праці і становлять потенційну загрозу для життя і здоров'я працюючих*. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.
11. Torop V.M. (2024) Practice of implementing the methodology of risk analysis of the operation of welded metal structures in Ukraine. *The Paton Welding J.*, **7**, 29–34.

ПРЕЦИЗІЙНІ РЕНТГЕНІВСЬКІ СКАНЕРИ НА ОСНОВІ МІНІ-СЕНСОРІВ

Карманов М.М., Михайлов С.Р., Шалаєв В.А.

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

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона пропонує нові підходи в цифровій радіографії з використанням недорогих високочутливих твердотільних рентгенівських міні-сенсорів S10811-11 японської фірми Hamamatsu Photonics. Роздільна здатність таких сенсорів становить 20 мкм, що в 4–6 разів вище, ніж у традиційних плоскопанельних детекторів. Недолік таких сенсорів — обмежений розмір робочого поля (24×34 мм), що у багатьох випадках виявляється менше розмірів об'єкта дослідження. Для розширення зони контролю пропонується використовувати електромеханічне сканування об'єктів дослідження виробів за допомогою такого міні-сенсора. Отримані окремі фрагменти цифрових рентгенівських зображень зберігаються в пам'яті комп'ютера і потім об'єднуються програмним способом в єдине цифрове зображення. Була створена рентгенівська система однопрохідного сканування (вдовж осі *X*). Максимальна ширина отриманого цифрового рентгенівського зображення становить 34 мм, а його довжина — 500 мм.

Для збільшення ширини зони рентгенівського контролю пропонується виконувати сканування за двома координатами *X* і *Y* за допомогою 2D сканерів, які можуть забезпечити значні розміри зони контролю, наприклад 300×400 мм. Одне з основних вимог електромеханічного сканування з використанням рентгенівського міні-сенсора — забезпечити точність сканування 20 мкм (розмір пікселя матриці сенсора). Для недорогих сканерів вартістю до 200 доларів США з гвинтовим і ремінним приводом точність позиціонування становить 100...200 мкм, що в 5...10 разів нижче необхідної точності сканування. Для підвищення точності сканування необхідно використовувати дорогі сканери з електромеханічним приводом підвищеної точності, що призводить до значного подорожчання скануючої системи.

Для компенсації неточності позиціонування міні-сенсора пропонується використовувати програмні кореляційні методи обробки зображення. Окремі фрагменти цифрових зображень розраховуються з перекриттям меж фрагментів з точністю електромеханічного приводу (в нашому випадку — до 200 мкм). В межах цієї зони точний збіг меж фрагментів визначається кореляційним аналізом зображень. В цьому випадку точність формування повного цифрового рентгенівського зображення визначає точність рентгенівського сенсора (20 мкм) при точності електромеханічного сканування до 200 мкм. Це дозволяє на порядок знизити вартість сканера. Для підвищення якості цифрового зшивання розроблено програмне забезпечення для представлення зображень в одному контрасті.

Конструкції лінійного і 2 D сканера захищені 2 патентами.

ЦИФРОВІ СИСТЕМИ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Карманов М.М., Михайлов С.Р., Шалаєв В.А.

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

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона пропонує нові принципи побудови цифрових систем радіаційного контролю, що забезпечують мінімізацію їх вартості та збереження широкого набору функціональних можливостей відповідно до вимог замовника.

Використання таких систем у промисловому неруйнівному контролі стикається з певними організаційними труднощами, які пов'язані з необхідністю технічного супроводу, обслуговуванням, модифікацією досить складних наукомістких комп'ютерних комплексів автоматизованого радіографічного контролю. Необхідне їх додаткове налаштування до конкретного технологічного процесу та відповідності нормативно-технічної бази. У цьому випадку використання подібних зарубіжних автоматизованих систем радіаційного контролю потребує суттєвих додаткових витрат, пов'язаних з їх налаштуванням та сервісним обслуговуванням.

Програмне забезпечення систем включає широкий набір цифрових інструментів, що забезпечують покращення якості зображень, виділення дефектів, контрольованих зон, вимірювання об'єктів, що контролюються, архівацію результатів цифрової обробки та документування контролю, це:

- каталог (група модулів, які забезпечують введення радіаційних зображень у систему від різних детекторів, архівацію результатів радіаційного контролю, документування результатів контролю);
- вимірювання (група модулів, що забезпечують цифрову обробку вхідних зображень, їх фільтрацію з метою покращення візуального сприйняття та можливості їх подальшого автоматизованого розшифрування, набір програмних інструментів, що забезпечують автоматизацію вимірювання геометричних розмірів контрольованих об'єктів, параметрів дефектів, їх класифікацію).
- переміщення контрольованого об'єкта чи рентгентелевізійної системи (безперервне, дискретне переміщення, режим рентгенівського просвічування тощо).

Комплекс забезпечує: простоту роботи із програмою; можливість використання комплексу у лабораторних, заводських та польових умовах; підвищення достовірності та ефективності роботи оператора; оперативний та гнучкий доступ до електронного архіву зображень.

Програмно-апаратний комплекс орієнтований застосування з різними типами перетворювачів: рентгено-телевізійні сканери, РТВ системи з використанням сцинтиляційних кристалів та екранів, плоскпанельні детектори та інших.

У складі комплексу пропонуються розроблені нами рентгенівські детектори з використанням сцинтиляційних екранів на основі оксисульфиду гадолінію, активованого тербієм ($Gd_2O_2S:Tb$). Зображення з екранів зчитуються за допомогою високочутливих цифрових астрономічних телевізійних камер. Створено серію цифрових детекторів: РТВ-4 (робоче поле 110×80 мм), РТВ-3 (120×160 мм), РТВ-5 (360×270 мм). Дискретні розміри зображення (кількість пікселів по горизонталі та вертикалі) визначаються відповідною телевізійною камерою. Максимальна напруга рентгенівської трубки до 200 кВ. Детектор РТВ-5 розроблений для контролю бронепластин із композиційного матеріалу. Детектор РТВ-4 використовуються для контролю зварних з'єднань труб малого діаметра. Детектор РТВ-3 забезпечує високу відносну чутливість контролю та здатний замінити плівкову радіографію. Проведено успішні випробування цих детекторів контролю якості зварних з'єднань поліетиленових труб. Вартість таких детекторів значно нижча за вартість повноформатних цифрових рентгенівських панелей.

Для підвищення чутливості та роздільної здатності пропонуються відносно недорогі скануючі системи на основі малогабаритних твердотільних рентгенівських детекторів S10811-11 японської фірми Hamamatsu Photonics (зона контролю 24×34 мм, роздільна здатність 20 мкм).

Роботи, що виконуються відділом неруйнівного контролю зварних з'єднань ІЕЗ ім. Є.О. Патона, спрямовані на розробку цифрових систем радіаційного контролю, що забезпечують мінімізацію вартості таких систем для кожного конкретного споживача за збереження технічних характеристик та функціональних можливостей відповідно до вимог замовника.

АКТУАЛЬНІ ДЕФЕКТОСКОПИ СЕРІЇ UNIVERSAL ACY

Козін О.М.

ТОВ «НВФ Діагностичні прилади», Київ

Українська промисловість у даний час потребує ефективних засобів високопродуктивного магнітопорошкового контролю поверхні різноманітних циліндричних деталей спеціального призначення.

Найбільшої продуктивності вдається досягти застосовуючи стаціонарні магнітопорошкові дефектоскопи комбінованого намагнічування, які керуються PLC комп'ютером, що забезпечує автоматизацію магнітопорошкового контролю від моменту установки виробу в дефектоскоп до закінчення процесу контролю та переходу до огляду поверхні виробу. Час від натискання на педаль до закінчення розмагнічування та розтискання деталі становить всього 10 секунд! Зрозуміло, що потрібно ще завантажити деталь, провести огляд, вивантажити деталь. При необхідній організації, вправності та досвіді персоналу при ручному завантаженні–вивантаженні деталей відповідної ваги можна досягти 30...35 секунд часу на ці операції. Таким чином, можна забезпечити 40...45-ти секундний цикл контролю однієї деталі.

На фото наведені приклади результатів магнітопорошкового контролю циліндричних деталей спеціального призначення.

Результати отримано на дефектоскопі UNIVERSAL ACY-700 виробництва компанії K+D Flux Technic, Німеччина, яку компанія ТОВ «НВФ Діагностичні прилади» представляє в Україні.



Основні технічні характеристики дефектоскопів UNIVERSAL ACY

Параметр	ACY-450	ACY-700	ACY-1000
Довжина деталі, мм	20-450	20-700	20-1000
Максимальний струм (амплітудне значення), А	1400	2800	2800
Дані електромагніту: регулювання струмів, максимальне число ампервітків, А-w поперечний переріз ярма, мм×мм	Плавно 10000 60×60	Плавно 15000 100×100	Плавно 15000 100×100
Характеристики виробу: максимальний діаметр, мм, максимальна вага, кг	180 20	320 100	320 100
Електроживлення, В	3×380	3×380	3×380
Частота, Гц	50	50	50
Потужність, кВА	10	24	24
Габаритні розміри, мм: довжина, ширина, висота	1300 530 840	2000 1050 1950	2650 1050 1950
Вага дефектоскопа, кг	120	550	660

Загальні характеристики дефектоскопів UNIVERSAL:

- довжина виробу до 1000 мм, діаметр до 320 мм, маса до 100 кг;
- намагнічувальний стіл з пневматичним затисканням виробу;
- нержавкий резервуар об'ємом до 40 л з насосом для суспензії та постійним перемішуванням;
- затискання виробу в ярах за допомогою ножної педалі, яка запускає автоматичний полив суспензією, намагнічування, розмагнічування деталі;
- полюсне та циркулярне комбіноване намагнічування або окремо чи по черзі за допомогою PLC модуля Flux-COD (Siemens Symatic OP7);
- сигналізація рівня досягнутих струмів із заданим відсотком відхилення, із зображенням на цифровому дисплеї PLC комп'ютера. Величина струму намагнічувань відкалібрована;
- намагнічування з безперервним регулюванням струму з можливістю налаштування граничних значень намагнічування, регулювання струму намагнічування для значень, що зберігаються в базі даних комп'ютера;
- автоматичний полив контрольованого виробу з регульованих форсунок із встановленням часу поливу в меню PLC;
- за допомогою порталного маніпулятора зверху завантажуються важкі деталі на місце контролю. Для звільнення зони завантаження достатньо відсунути рею з УФ опромінювачем;
- автоматичне розмагнічування в кінці циклу намагнічування;
- рея зі стаціонарним УФ LED опромінювачем UVL 450, розмір зони освітлення 450×350 мм з можливістю використання ручного УФ LED опромінювача;
- опція підвищення струму циркулярного намагнічування на 1000, 2000 Аєф.

За консультаціями з питань використання та придбання звертайтеся до ТОВ «НВФ Діагностичні прилади».

E-mail: support@ndt-ua.com

АДАПТАЦІЯ МЕТОДУ ШИРОГРАФІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ МІКРО-ДЕФЕКТІВ В АЛЮМІНІЄВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ТА ТОНКОСТІННИХ КОМПОЗИТАХ

Лобанов Л.М.¹, Знова В.Я.², Джавадова І.І.², Шуткевич О.П.¹, Киянець І.В.¹,

Шкурят І.Л.¹, Шиян К.В.¹, Стельмах Д.І.¹, Савицький В.В.¹

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

²АТ «Антонов», Київ

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблено та виготовлено ширографічний прилад на основі модифікованого інтерферометра Майкельсона. Розроблене обладнання використовувалося для виявлення внутрішніх надмалих дефектів у плоских зварних алюмінієвих [1] та композитних зразках [2]. Дефекти у вигляді некрізних отворів вводилися як в зоні зварного шва алюмінієвих зразків, так і в ділянках основного матеріалу. Розмір дефектів становив від 0,3 до 1 мм в діаметрі для алюмінієвих і від 0,8 до 2 мм для композитних зразків з різною глибиною залягання. Вони були візуалізовані при термічному навантаженні протягом 2...4 с, що призводило до нагрівання поверхні досліджуваних об'єктів на 3...7°. Отримані ширографічні зображення (рис. 1, 2) підтверджують ефективність вдосконаленого ширографічного інтерферометра та автоматизованої системи термічного навантаження зі спеціалізованим програмним забезпеченням для ефективного виявлення підповерхневих дефектів діаметром від 0,3 мм на різній глибині маючи односторонній доступ.

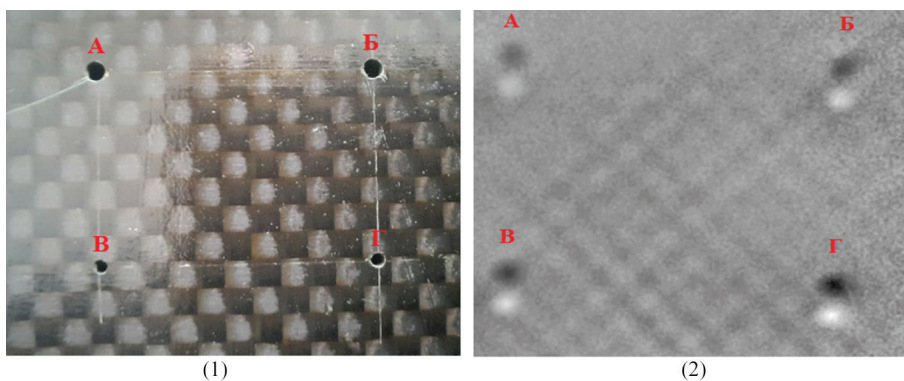


Рис. 1. Ділянка композитного тестового зразка товщиною 2.5 мм з періодичною структурою (1) та ширографічна картина досліджуваної ділянки із закладеними дефектами (2)

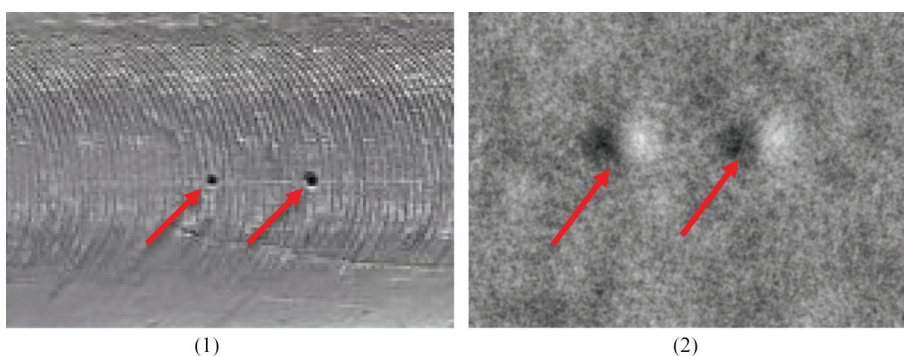


Рис. 2. Ширографічний контроль досліджуваної ділянки зварного шва алюмінієвого зразка: загальний вигляд ділянки з дефектом (1) і типова картина виявлених дефектів (2)

1. Лобанов Л.М., Шуткевич О.П., Киянець І.В. та ін. (2024) Виявлення внутрішніх дефектів надмалих розмірів в алюмінієвих зварних з'єднаннях методом ширографії. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, **4**, 38–42. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.04.06>
2. Лобанов Л.М., Знова В.Я., Савицький В.В. та ін. (2022) Візуалізація дефектів в елементах авіаційних конструкцій методом електронної ширографії. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, **3**, 12–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.02>

SMART-ДІАГНОСТИКА ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ДОПОМОГОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, МЕТОДУ ФОТОГРАМЕТРІЇ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Лобанов Л.М., Стельмах Д.І., Шуткевич О.П., Шкурат І.Л., Савицький В.В.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

В умовах повномасштабної військової агресії проти України та інтенсивної експлуатації інфраструктурних об'єктів зростає потреба у сучасних технологіях неруйнівного контролю, які поєднують безпеку, точність і швидкість обстеження. Smart-діагностика – це інтегрований підхід, який передбачає використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), фотограмметрії та штучного інтелекту (ШІ) для дистанційного моніторингу технічного стану великогабаритних інженерних конструкцій.

Методика передбачає виконання аерофотозйомки з використанням БПЛА, побудову тривимірної моделі об'єкта у програмному забезпеченні 3DF Zephyr та подальшу обробку даних із застосуванням алгоритмів комп'ютерного зору. Фотограмметричний аналіз дозволяє виявляти порушення геометрії та визначати просторові параметри конструкційних елементів та дефектних зон.

Обробка знімків за допомогою глибоких нейронних мереж автоматизує процес виявлення пошкоджень і значно прискорює обробку великої кількості даних. Класифікація включає тріщини, корозію, вм'ятини, розриви, тощо. Для навчання моделей було створено спеціалізовані датасети з анотованими зображеннями, зібраними під час обстежень з допомогою БПЛА. Використання таких моделей дозволяє значно зменшити вплив людського фактору, прискорити обробку даних та забезпечити стабільну якість результатів.

Практична реалізація концепції Smart-діагностики була успішно апробована під час обстеження Київської телевежі, що пошкоджена внаслідок ракетного удару [1–3]. Отримані результати включають візуалізацію пошкоджень, просторові вимірювання та ідентифікацію критичних дефектів із зазначенням ймовірності їх присутності.

Результати демонструють, що запропонований підхід може стати основою для побудови автоматизованих систем діагностики інженерних споруд як у мирний, так і у воєнний час, та відзначається високим потенціалом подальшого розвитку з інтеграцією хмарних сервісів та онлайн-моніторингу в режимі реального часу. Його використання підвищує безпеку персоналу, скорочує час обстежень та забезпечує достовірність оцінок технічного стану об'єктів критичної інфраструктури.

1. Lobanov L.M., Stelmakh D.I., Savitsky V.V. et al. (2023) Remote assessment of damage to Kyiv TV tower based on the use of aerial photography and the method of photogrammetry. *The Paton Welding J.*, **8**, 60–64. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.08.08>
2. Lobanov L., Stelmakh D., Savitsky V. et al. (2024) Damage detection and analysis using unmanned aerial vehicles (UAVs) and photogrammetry method. *Procedia Structural Integrity*, **59**, 43–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.008>
3. Lobanov L.M., Stelmakh D., Shkurat I. et al. (2025) *Welding and Related Technologies*. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518-30>

АВТОМАТИЗАЦІЯ ШИРОГРАФІЧНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА СИНТЕТИЧНО ЗГЕНЕРОВАНИХ ДАНИХ

Лобанов Л.М, Шкурат І. Л., Шуткевич О.П., Стельмах Д.І., Савицький В.В.

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

Неруйнівний контроль якості матеріалів є ключовою складовою промислових процесів, зокрема в аерокосмічній та автомобільній галузях, де важливо виявляти внутрішні дефекти без пошкодження конструкцій. Одним із високочутливих методів неруйнівного контролю є ширографія — оптичний інтерференційний метод, який дозволяє ідентифікувати внутрішні дефекти за змінами деформацій поверхні об'єкта під навантаженням у реальному масштабі часу. Метод ефективно застосовується для об'єктів складної форми та значних розмірів, забезпечуючи безпосереднє отримання похідних від переміщень. Крім того, ширографія не потребує спеціального захисту від вібрацій, що робить її придатною для промислових та польових умов.

Однак складність аналізу широграм ускладнює автоматизацію цього процесу. У зв'язку з цим усе більшої уваги набувають підходи до автоматизації процесу інтерпретації ширографічних даних на основі штучного інтелекту (ШІ).

З метою підвищення ефективності контролю якості виробів було розроблено нейронну мережу для автоматичного пошуку дефектів на зображеннях, що отримані методами неруйнівного контролю якості. Для навчання нейронної мережі, орієнтованої на сегментацію дефектів на зображеннях, був розроблений алгоритм генерації синтетичних даних, що імітують фізичні властивості поверхонь із вбудованими дефектами. Такий підхід дозволяє сформувати достатню кількість навчальних зразків і забезпечує варіативність набору даних без залучення реальних зразків.

Різноманітність синтетичних зображень забезпечується завдяки використанню декількох методів. По-перше, генеруються дефекти різної кількості, розміру та контрасту, що дозволяє моделювати широкий спектр дефектних ділянок. По-друге, додаються шум, градієнт, гаусове розмивання, що підвищує реалістичність синтетичних зображень та наближає їх до реальних умов експериментальних досліджень. Розроблений алгоритм дозволяє контролювати складність зображень, що дає змогу створювати прості зображення для початкових етапів навчання і поступово збільшувати складність для досягнення високої точності моделі.

Запропонована методика навчання на синтетичних широграмах забезпечила високий рівень точності сегментації дефектів та стабільність моделі під час узагальнення на реальні дані, що дозволяє зменшити залежність від експериментальних зразків. Використання синтетичних даних як альтернативи реальним широграмам прискорює процес навчання моделі, що робить метод більш доступним та ефективним.

МАГНІТОАНІЗОТРОПНИЙ КОНТРОЛЬ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Мінаков С.М.¹, Учанін В.М.², Чвертко Є.П.¹, Вдовиченко Д.М.¹, Вдовиченко І.М.¹,
Мінаков А.С.¹, Степанов Д.В.¹, Стреленко Н.М.¹

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

Темпи принципового оновлення технологічного парку промисловості значно скорочуються, що призвело до наявності обладнання із значним терміном напруження. Тому стає все більш актуальним завдання діагностики стану такого обладнання та металоконструкцій взагалі. Напружений стан поряд із механічними властивостями та наявними дефектами є одним із основних чинників ресурсності таких металоконструкцій.

Переважна більшість металоконструкцій виготовлена із феромагнітних матеріалів (сталей). Такі матеріали змінюють свої магнітні властивості під дією напружень. Ця особливість дозволяє застосовувати магнітні методи контролю для вирішення зворотної задачі із визначення діючих напружень по зміні магнітних властивостей.

Найбільшого розповсюдження набули методи: магнітоанізотропний, коерцитивної сили, шумів Баркгаузена. Всі магнітні методи є непрямими і потребують попереднього отримання залежності певного магнітного параметра від напружень. Ця залежність, як правило, отримується на плоских зразках із ступінчастим навантаженням зовнішньою силою та одночасною фіксацією показів відповідних приладів. Перевагою магнітоанізотропного методу є безконтактний вимір магнітних параметрів, що не потребує врахування немагнітного зазору між перетворювачем та поверхнею контролю. Це дозволяє працювати на поверхнях, які покриті лакофарбовими матеріалами. Крім того апаратура для реалізації магнітоанізотропного методу працює на змінних полях від 0,5 до 20 КГц, що дозволяє проводити сканування металоконструкцій (на відміну від точкового визначення для коерцитивної сили та шумів Баркгаузена) для визначення найбільш небезпечних ділянок.

Недоліком магнітоанізотропного методу (як і інших магнітних методів) є складність контролю для двовісного напруженого стану, а саме те, що визначити можливо тільки різницю нормальних напружень. Ця властивість призводить до необхідності розробки методики контролю напружень для кожного виду металоконструкцій.

Апаратура магнітоанізотропного методу має відносно невелику вагу і не спричиняє незручностей оператору при роботі на натурних конструкціях як в умовах цеху, так і в полі.

Магнітоанізотропний метод добре піддається автоматизації контролю та створенню систем діагностики. Цей метод не потребує великих енерговитрат при проведенні контролю. Із практики відомо, що напружений стан металоконструкцій змінюється досить повільно. Це пояснюється повільною зміною навантажень на конструкцію (просідання ґрунту, оповзні тощо) та температурними коливання (добові та сезонні). Враховуючи такі особливості доцільно проводити опитування перетворювачів декілька разів на добу для систем реального часу. Зручно застосовувати сонячні панелі для живлення апаратури магнітоанізотропного контролю, що дозволяє легко встановлювати таку апаратуру. Зимові проміжки без сонячного світла компенсуються застосуванням відповідних акумуляторів. Передача даних магнітоанізотропного контролю здійснюється через загальні мережі передачі даних, наприклад, шляхом SMS повідомлень.

Промислова експлуатація засобів магнітоанізотропного контролю напруженого стану металоконструкцій підтвердила важливість їх застосування для завдань контролю.

ВИТРАТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ МАГНІТОПОРОШКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ MR-CHEMIE (ФРН)

Павлій О.В.

ТОВ “Діагностичні прилади”, Київ

Магнітні суспензії MR-Chemie в Україні представлені з 1998 року.

Існує дві групи матеріалів.

У вигляді аерозольних балонів, готові для використання:

- MR-76S — чорна магнітна суспензія;
- MR-72 AF — білий контрастний ґрунт;
- MR-765RF — червона і флуоресцентна магнітна суспензія;
- MR-76F — флуоресцентна магнітна суспензія;
- MR-76FA — флуоресцентна магнітна суспензія;
- MR-71 — очисник білого контрастного ґрунта.

Матеріали відповідають вимогам:

- EN ISO 9934-2 ASTM E709 ASME B & PV Code, Sec V ASME Code V, Art. 7.

Строк використання — до 3 років від дати виробництва.

Матеріали погоджені для використання в авіації, енергетиці.

Добре показали себе для використання для різних задач неруйнівного контролю в машинобудуванні та нафтогазовій галузі.

Друга група матеріалів — концентрати магнітної суспензії та сухі порошки для використання в умовах масового виробництва.

Найбільш поширені:

- MR-158R — Концентрат магнітної суспензії для магнітопорошкового флуоресцентного контролю для розчину в воді (може розводитись в пропорціях 1:50, 1:100);
- MR-131 — Концентрат магнітної суспензії для магнітопорошкового флуоресцентного контролю для розчину в безводних розчинах (керосин, мастило) (може розводитись в пропорціях 1:50, 1:100);
- MR-210 Чорний магнітний порошок - Високочутливий нефлуоресцентний магнітний порошок з феромагнітними частинками для вологих, а також сухих випробувань на теплих та гарячих поверхнях. Розведення від 1:100 до 1:1000, суспендується з олією або водою.

Кольорові магнітні порошки — можуть використовуватись як сухі так і розведені з олією або водою:

- MR-230 — червоний нефлуоресцентний магнітний порошок;
- MR-231 — нефлуоресцентний сірий магнітний порошок;
- MR-232 — зелений нефлуоресцентний магнітний порошок;
- MR-233 — нефлуоресцентний та флуоресцентний жовтий магнітний порошок;
- MR-234 — нефлуоресцентний синій магнітний порошок;

Всі матеріали відповідають вимогам нормативних документів і постачаються з сертифікатом якості виробника.

ПРИКЛАД ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ GO-SCAN
ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТРУБОПРОВОДА

Павлій О.В.

ТОВ “Діагностичні прилади”, Київ (за матеріалами TELEDYNE-ICM)

CP225D та Go-Scan 3025

Equipment

Generator



CP225D
Focal spot: 3 mm
FFD: 700 mm

Detector



Go-Scan 2325
Resolution: 120 µm

Портативне рішення для ваших застосувань неруйнівного контролю.

Приклад задачі для комплекту обладнання

Матеріал та налаштування зйомки:

Матеріал: сталева труба — 90 мм (зовнішній діаметр) — товщина однієї стінки: 8 мм;

Генератор: напруга 225 кВ–4 мА — час інтегрування 3,5 с, 5 експозицій.

Схема контролю — через дві стінки на еліпс

Клас В підтверджено завдяки принципам компенсації.

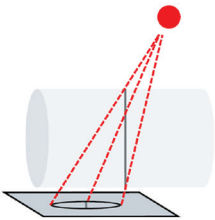
Результат

Вимоги

- SRb of 100 µm (D10)
- W13 visible
- SNR : 140*

Отримані дані

- SRb of 130 µm (D9)
- W15 visible
- SNR : 196



РАДІАЦІЙНІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ. КЛАСИЧНА РАДІОГРАФІЯ. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Павлій О.В.

ТОВ “Діагностичні прилади”, Київ

Радіаційні методи неруйнівного контролю залишаються важливим елементом системи управління якістю продукції та діагностики обладнання в експлуатації.

Чим далі, тим ширше запровадження знаходять відносно нові технології контролю — комп’ютерна та пряма радіографія з використанням нових типів детекторів — напівпровідникових панелей та візуалізаційні пластини. Також з розвитком технологій отримала поштовх мікрорадіографія для рішення задач контролю досить мініатюрних виробів. Ціллю даної доповіді є огляд технологій, обладнання, матеріалів, що знайшли використання останнім часом для задач неруйнівного контролю на досвіді нашої лабораторії.

Розвиток методу сьогодні визначається розвитком двох найважливіших складових технології радіаційного контролю.

1. Розвиток, покращення, оптимізація джерел іонізуючого випромінювання
2. Застосування передових технологій у створенні нових можливостей детектування випромінювання після взаємодії з об’єктом контролю.

Джерела випромінювання, — зменшення розмірів фокальної плями, габаритів, ваги.

Детектори — збільшення чутливості до випромінювання, роздільної здатності, функціональне різноманіття.

Так провідні виробники працюють над зменшенням розмірів генераторів. Приклад Teledyn-ICM — зменшення розмірів та ваги, розвиток батарейної серії генераторів.

Розвиток детекторів теж іде в різних напрямках.

Технологія прямої радіографії — поява гнучких детекторів, зменшення розміру пікселя (сьогодні доступні панелі з розміром пікселя 50 мкм, що дозволяє забезпечити роздільну здатність на рентгенівських зображеннях на рівні класичних плівок класу C3).

Комп’ютерна радіографія — детектор — візуалізаційна пластина — гнучка, багаторазова, дозволяє виконувати роботи з найвищою роздільною здатністю та контрастом. А сканери (DUERR-NDT, FUJIFILM) считують скрите зображення на пластині лазерним променем розміром від 30(50) мкм, що дозволяє використовувати технологію CR не тільки для класичних задач (контроль якості зварювання, литва, геометричних розмірів) але і для товщинометрії, контролю корозії, мікрорадіографії.

Класична плівкова радіографія стикається з тиском сучасних технологій і коло завдань для неї поступово звужується. Виробники ідуть шляхом заміни срібла в класичних плівках на полімери, (це дозволяє стримати зростання цін на матеріали без зменшення якості), розробка екологічних реактивів для обробки плівки, не шкідливих для довкілля (DUERR-NDT).

НОВІ СТАНДАРТИ ДЕФЕКТОСКОПІЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ МЕТОДАМИ ПРОНИКАЮЧИХ РЕЧОВИН

Посипайко Ю.

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

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

В дефектоскопії металоконструкцій методами проникаючих речовин перші місця в переліку стандартів займають шість документів серії ДСТУ EN ISO 3452 [1–6]. Ці стандарти встановлюють вимоги до контролю, що проводиться для виявлення несучільностей, таких як тріщини, плівки, складки, пористість і спаї, що виходять на поверхню контрольованого матеріалу. Контроль застосовується переважно до металевих матеріалів, однак може застосовуватися і для контролю інших матеріалів, за умови, що вони інертні до впливу дефектоскопічних матеріалів, а також не занадто пористі (відливки, поковки, зварні шви, кераміка тощо). Стандарти також містять вимоги до випробувань технологічних процесів та вимоги до випробувального обладнання.

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

Основні етапи капілярного контролю та послідовність операцій для загального випадку наступні:

- a) підготовка і попереднє очищення;
- b) нанесення пенетранту;
- c) видалення надлишку пенетранту;
- d) нанесення проявника;
- e) огляд та реєстрація індикаторних слідів;
- f) складання протоколу;
- g) остаточне очищення.

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

Ефективність капілярного контролю залежить від багатьох факторів, зокрема:

- a) типів дефектоскопічних матеріалів і обладнання;
- b) підготовки і стану поверхні;
- c) матеріалу об'єкта контролю й очікуваних несучільностей;
- d) температури контрольованої поверхні;
- e) тривалості проникнення і часу проявлення, а також;
- f) умов огляду.

Рівень чутливості набору дефектоскопічних засобів потрібно визначати за допомогою контрольного зразка типу 1 у відповідності з ДСТУ EN ISO 3452-3 [3]. Оцінений таким чином рівень чутливості завжди стосується методу, який застосовується для типових випробувань схваленого набору дефектоскопічних засобів.

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

Хімічні і фізичні властивості деяких неметалічних матеріалів можуть змінюватися під впливом дефектоскопічних матеріалів капілярного контролю; необхідно переконатися перед контролем у сумісності дефектоскопічних матеріалів з матеріалом контрольованих деталей, з якого вони виготовлені, а також вузлів, що містять такі матеріали.

При контролі матеріалів, що контактують з ракетним мастилом, вибуховими речовинами (це стосується всіх деталей, що містять порох, детонаційні та піротехнічні матеріали), кисневого обладнання чи ядерних установок сумісності дефектоскопічних матеріалів потрібно приділяти особливу увагу.

Цілий ряд стандартів установлюють додаткові вимоги до технологій контролю окремих видів продукції та приводять рівні приймання за результатами капілярних випробувань.

Стандарт EN ISO 23277:2014 [10] установлює три рівні приймання для зварних швів металевих матеріалів за розміром лінійних та округлих індикацій.

Стандарт ISO 4987:2010 [11] установлює рівні приймання для сталевих відливок за розміром лінійних чи округлих індикацій та їх розташуванням на найбільш неблагополучній ділянці, розміром (105×148) мм. Порівняльні рисунки індикацій на таких ділянках наведені в стандарті.

Стандарти EN 1371-1:2011 [12] та EN 1371-2:2015 [13] установлюють рівні приймання для металевих відливок за розміром лінійних чи округлих індикацій та їх розташуванням на найбільш неблагополучній ділянці, розміром (105 × 148) мм. Таблиці та порівняльні рисунки індикацій на таких ділянках наведені в стандарті.

Стандарт EN 10228-2:2016 [14] установлює чотири рівні приймання для сталевих поковок за розміром лінійних чи округлих індикацій та їх розташуванням на найбільш неблагополучній ділянці, розміром (105×148) мм.

1. ДСТУ EN ISO 3452-1:2022: *Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1: Загальні вимоги* (EN ISO 3452-1:2021, IDT).
2. ДСТУ EN ISO 3452-2:2022: *Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 2: Випробування дефектоскопічних матеріалів* (EN ISO 3452-2:2021, IDT).
3. ДСТУ EN ISO 3452-3:2014: *Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 3: Контрольні випробувальні зразки* (EN ISO 3452-3:2013, IDT);
4. ДСТУ EN ISO 3452-4:2008: *Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 4: Обладнання* (EN ISO 3452-4:1998, IDT).
5. ДСТУ EN ISO 3452-5:2014: *Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 5: Капілярний контроль при температурах понад 50 °C* (EN ISO 3452-5:2008, IDT).
6. ДСТУ EN ISO 3452-6:2014: *Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 6: Капілярний контроль при температурах нижче 10 °C* (EN ISO 3452-6:2008, IDT).
7. ДСТУ EN ISO 12706:2016: *Неруйнівний контроль. Капілярний контроль: Словник* (EN ISO 12706:2009, IDT).
8. ДСТУ EN ISO 9712:2022: *Неруйнівний контроль: Кваліфікація і сертифікація персоналу неруйнівного контролю* (EN ISO 9712:2022, IDT).
9. ДСТУ EN ISO 3059:2016: *Неруйнівний контроль. Капілярний і магнітопорошковий контроль. Умови огляду* (EN ISO 3059:2012, IDT).
10. ДСТУ EN ISO 23277:2018; *Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Капілярний контроль зварних з'єднань. Рівні приймання* (EN ISO 23277:2015, IDT).
11. ДСТУ ISO 4987:2015: *Сталеві відливки. Капілярний контроль* (ISO 4987:2010, IDT).
12. ДСТУ EN 1371-1:2015: *Литво. Капілярний контроль. Частина 1. Відливки, виготовлені литтям в піщані форми та литтям в кокіл під дією сили тяжіння і під низьким тиском* (EN 1371-1:2011, IDT).
13. ДСТУ EN 1371-2:2015; *Литво. Капілярний контроль. Частина 2. Відливки, виготовлені точним литтям* (EN 1371-2:2015, IDT).
14. ДСТУ EN 10228-2:2017: *Неруйнівний контроль поковок зі сталі. Частина 2. Капілярний контроль* (EN 10228-2:2016, IDT).
15. ДСТУ EN ISO 10893-4:2015: *Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 4. Капілярний контроль безшовних труб для виявлення поверхневих дефектів* (EN ISO 10893-4:2011, IDT).

ПОЛЯРИЗАЦІЙНЕ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ МІКРОДЕФЕКТІВ У КОМПОЗИТАХ

Росляков О.С.¹, Стринадко М.Т.¹, Єрмоленко С.Б.¹, Решетник С.І.², Шух Я.В.²

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

²Чернівецька філія ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»

У сучасних авіаційній, автомобільній та оборонній промисловостях композитні матеріали, зокрема вуглецеві та скляні волокнисті ламінати, відіграють ключову роль завдяки поєднанню високого відношення «міцність/вага», корозійної стійкості та можливості точного налаштування механічних властивостей. Однак інтенсивні механічні та температурні навантаження призводять до формування субмікронних мікротріщин, розшарувань і локальних анізотропних порушень, які часто залишаються непоміченими традиційними неруйнівними методами до того моменту, коли починають загрожувати структурній цілісності виробу. У цьому контексті поляризаційно-структурне картографування пропонує унікальну можливість кількісно картографувати орієнтаційні характеристики армуючих волокон і виявляти дефекти розміром менше 50 мкм із точністю вимірювання азимутального кута поляризації 10^{-5} – 10^{-6} рад [1–5].

Основою поляризаційно-структурного картографування є аналіз зміни поляризаційного стану лінійно поляризованого світла при відбитті від анізотропного середовища. Лінійно поляризована хвиля розкладається на два ортогональні компоненти, що поширюються в матеріалі з різними фазовими швидкостями та коефіцієнтами поглинання. Різниця фаз між ними генерує локальну фазову затримку $\delta(x, y)$, а ступінь збереження поляризації $\text{DoLP}(x, y)$ відображає рівень багатомасштабного розсіювання, зокрема в зонах розшарування чи мікротріщин. Нарешті, кут орієнтації $\varphi(x, y)$ точно відтворює напрям волокон у кожній точці поверхні, що дозволяє не тільки виявляти дефекти, а й оцінювати відповідність фактичної орієнтації армування конструкторському проекту [1–5].

Для розширення спектра діагностичних можливостей до класичного монохроматичного лазерного збудження доцільно впровадити вузькосмугове LED-зондування в діапазоні 400–1000 нм. У цьому діапазоні короткохвильове збудження (400–450 нм) забезпечує високий контраст на межах полімерної матриці та армуючих волокон через інтенсивне Мі-розсіювання, тоді як довші хвилі (800–900 нм) проникають глибше, дозволяючи картографувати підповерхнєве розшарування без суттєвого поглинання полімером [6, 7]. Використання LED на 520–580 нм підсилює флуоресцентний контраст наповнювачів, а світлодіоди 630–700 нм селективно збуджують вуглецеві волокна, що сприяє точнішому визначенню їх дисперсії в матриці. Таке спектрально-селективне зондування, реалізоване через послідовну або псевдо-гетеродинну підсвітку, знижує «спекл»-шум лазера та мінімізує термічне нагрівання зразка, зберігаючи при цьому високу спектральну роздільну здатність [6].

Цифрова обробка даних методом поляризаційно-структурного картографування полягає в калібруванні інтенсивності за допомогою референтних зразків, корекції геометричних спотворень та компенсації неоднорідностей емісії поверхні. Надалі застосовують алгоритми сегментації, зокрема – модифікований алгоритм вододілу для відокремлення суміжних вогнищ анізотропії, кластеризацію k-means для визначення зон різних рівнів пошкодження та текстурний аналіз за методикою кількісного аналізу текстур зображень для розпізнавання деталей морфологічної структури [6]. У результаті кожному пікселю позначають значення φ , DoLP і δ , що створює повнопольову «оптичну сигнатуру» структури поверхні.

Кількісний аналіз цієї сигнатури дає змогу виділяти критичні області, де φ відхиляється від проектного кута армування більше ніж на 2 – 3° , що свідчить про ймовірні проблемні ділянки; DoLP знижується на 15 – 25% у місцях розшарувань, а δ зменшується на $0,3$ – $0,7$ рад, підтверджуючи порушення впорядкованості волокон [1–5]. Використання поляризаційно-структурного картографування прямо на виробничих лініях або в польових умовах дозволяє інтегрувати цей метод у системи оперативного контролю якості, оскільки цифрова обробка $\varphi(x, y)$, $\text{DoLP}(x, y)$ й $\delta(x, y)$ відбувається в реальному часі.

Таким чином, поляризаційно-структурне картографування у поєднанні зі спектрально-селективним зондуванням дозволить сформуванню високочутливого та гнучкого інструментарію для неруйнівного контролю композитних матеріалів. Метод поєднує механізми фізико-оптичних процесів та структурно-морфологічних особливостей волокнистих систем, забезпечуючи виявлення мікродефектів і точну оцінку орієнтації армування, що є критичним для безпеки та надійності сучасних технічних виробів.

1. Ушенко А.Г., Єрмоленко С.Б., Недужко М.А. (1992) Поляризаційно-інтерференційна діагностика внутрішніх напружень у прозорих шарах. *Дефектоскопія*, 27(6), 445–449.
2. Ушенко А.Г., Єрмоленко С.Б. (1992) Оптичні прояви мікрокристалітної структури поверхонь скла. *Фізика, хімія та механіка поверхонь*, 7(12), 2938–2948.
3. Петренко С.О., Сидоров А.М. (2021) Застосування кількісної поляризаційної візуалізації для виявлення мікроефектів у волокнистих композитах. *Матеріалознавство і нові технології*, 3, 45–52.
4. Коваленко В.П. (2019) Метод кількісної поляризаційної візуалізації для оцінки залишкових напружень на поверхні металевих виробів. *Оптика і спектроскопія*, 127(4) 612–620.
5. Іваненко Н.І., Шевченко О.В. (2022) Картографування орієнтаційних характеристик мікроструктури керамічних матеріалів за допомогою QPLI. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 18–27.
6. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. (1973) Textural features for image classification. *IEEE Transact. Syst. Man. Cybern.*, 3(6), 610–621.
7. Otsu N. (1979) A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transact. Syst. Man. Cybern.*, 9(1), 62–66.

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ

Созонов С.В.¹, Ковтун С.І.¹, Богачев І.В.¹, Декуша О.Л.^{1,2}, Куц Ю.В.^{1,2}

¹Інститут загальної енергетики НАН України, Київ

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

Вступ. Ультразвуковий неруйнівний контроль (УНК) є одним з найбільш інформативних видів неруйнівного контролю [1]. Розроблення та впровадження інноваційних методів УНК лишається актуальним завданням, над яким працюють фахівці різних країн. Цей процес стимулюється зростанням складності геометрії об'єктів контролю (ОК), розширення діапазонів робочої температури ОК, підвищенням вимог щодо надійності результатів контролю, розширенням номенклатури конструкційних матеріалів, охопленням контролем значних ділянок ОК, вимога збереження працездатності за низького відношення сигнал/шум тощо. Останнім часом фахівці різних країн приділяють значну увагу розвитку методів УНК, що ґрунтуються на використанні магнітострикційних ефектів [2–4]. Ці ефекти пояснюються взаємодією механічних та магнітних полів у магнітострикційних матеріалах — феромагнітних металах Fe, Ni, Co, Gd, Tb та їх сплавах. Найбільш широке практичне застосування мають прямі магнітострикційні ефекти Джоуля та Відемана та оборотні до них ефекти Віллара та Вертгейма, розглянуті, наприклад, в роботі [5]. Використання магнітострикційних ефектів дало змогу розробити технологію ультразвукового контролю великих структур таких як трубопроводи, анкерні стрижні, пластини тощо [2]. Ця технологія дає змогу виявляти дефекти типу корозійних уражень, стоншення стінок і тріщин в габаритних конструкціях. Вона була розроблена і запатентована (U.S. Patent Nos 5,456,113, 5,457,994, 5,581,037, 5,767,766, 5,821,430, 6,212,944, and others) інститутом SwRI (SwRI — Southwest Research Institute, USA).

Інший перспективний напрям використання магнітострикційних ефектів пов'язаний з розробленням і застосуванням в УНК малоапертурних магнітострикційних перетворювачів (ММП) [5, 6]. Такі перетворювачі, хоча й не забезпечують контроль на значних ділянках об'єктів, але мають ряд інших корисних властивостей — можливість контролю об'єктів зі значною кривизною поверхні, за високої температури поверхні, допускають створення перетворювачів матричного типу і деякі інші. Проте такі перетворювачі лишаються малодослідженими як в частині оптимізації їх конструкції, так і в частині дослідження особливостей їх практичного застосування.

Завданням дослідження є проведення експериментальних досліджень магнітострикційного методу з використанням ММП в задачах ультразвукового контролю.

Реалізація завдання дослідження. Для проведення експериментальних досліджень розроблено лабораторний стенд, структура якого наведена на рис. 1. Генератор радіоімпульсних сигналів забезпечує формування послідовності радіоімпульсів тривалістю 4 мкс (2 періоди сигналу-носія частотою 0,5 МГц), періодом 100 мс і потужністю, достатньою для живлення котушки ММП-випромінювача. Основою ММП-випромінювача, в якому реалізовано ефект Джоуля, є хвилевід у вигляді відрізка дроту з магнітострикційного матеріалу (пермендіюру) з намотаною на нього електричною котушкою. Хвилевід має такі геометричні параметри: довжина 70 мм, діаметр 1 мм. Активна частина хвилеводу знаходиться у електромагнітному полі — суперпозиції змінної складової, яка створюється електричною котушкою, та постійної складової, що створюється постійним магнітом, розташованим поблизу котушки. Узгодження котушки ММП та генератора відбувається за допомогою трансформатора, розміщеного біля хвилеводу ММП. ММП-приймач за конструкцією подібний до ММП-випромінювача, проте він працює на ефекті Віллара. ОК — пластина товщиною $h = 0,5$ мм з матеріалу Ст3, в якій були зроблені отвори діаметром $d = 1, 2, 3, 5$ мм, що імітували дефекти. Перетворювачі встановлювалися в спеціальну оправку-тримач із заданою відстанню між ММП. На ОК перетворювачі встановлювалися таким чином, що отвори розташовувалися посередині між точками контакту хвилеводів ММП з пластиною. В досліді використовувалися симетричні хвилі Лемба.

Сигнали з генератора та підсилені сигнали ММП-приймача надходили в АЦП і після перетворення у цифрову форму передавалися в апаратно-програмний модуль, реалізований на ПК. Цей модуль виконував операції усереднення даних, фільтрації, оцінювання часових та амплітудних параметрів сигналів, збереження отриманих даних та їх візуалізацію. Характерний приклад отриманого сигналу ММП-приймача наведено рис. 2 (електромагнітна завада від сигналу ММП-перетворювача, що виникає внаслідок електромагнітного зв'язку котушок ММП, дає змогу оцінити часовий інтервал t_3 між сигналами перетворювачів).

Вимірюванню підлягала амплітуда прийнятого сигналу U_a та затримка між сигналами генератора та прийнятим сигналом ММП — $t_3 = \tau_0 + \tau_{\text{хв}}$, яка складалася із затримкою на поширення ультразвукового коливання в ОК τ_0 та хвиле-

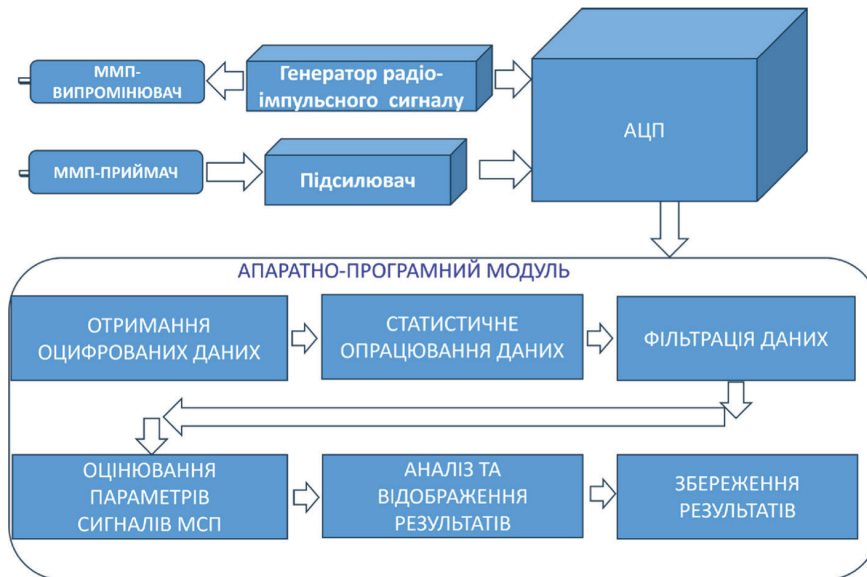


Рис. 1. Структура лабораторного стенду для проведення досліджень ультразвуковим методом на базі магнітострикційного ефекту

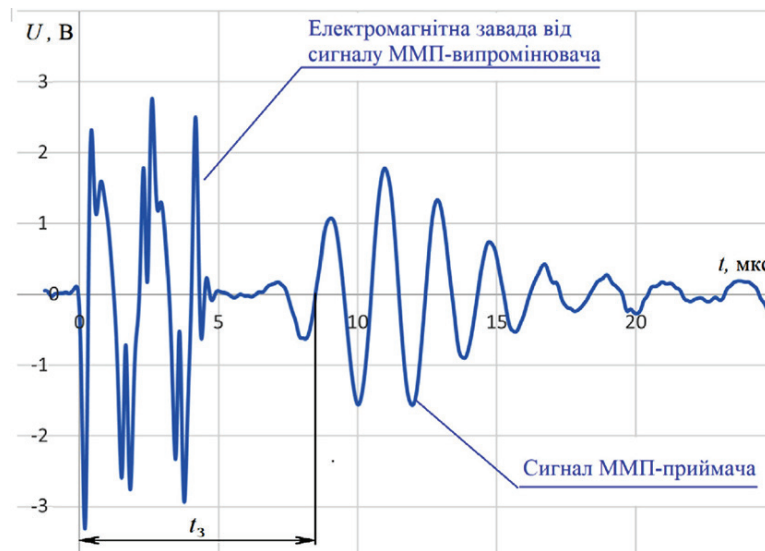


Рис. 2. Приклад реалізації сигналу ММП-приймача

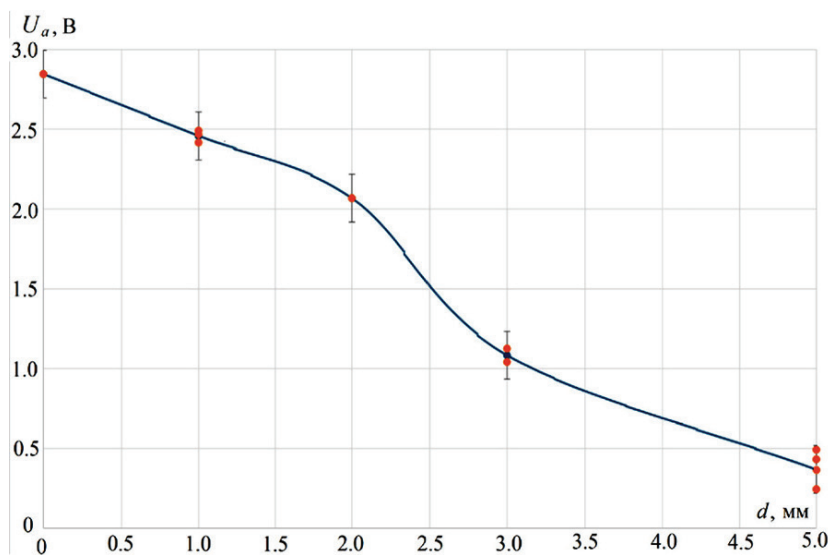


Рис. 3. Залежність амплітуди прийнятого сигналу від діаметру отвору

водах $\tau_{\text{хв}}$. Довжина шляху ультразвукової хвилі в ОК визначалась за формулою $s = c_L(t_3 - \tau_0)$, де c_L — швидкість хвиль Лемба в ОК. Визначення c_L та τ_0 було передбачено методикою проведення експериментів на підготовчому етапі.

На рис. 3 наведено залежність амплітуди прийнятого сигналу від діаметру отвору.

Виконане дослідження тільки демонструє можливості практичного використання ММП в УНК і не висвітлює всіх унікальних особливостей і можливостей цього методу контролю.

Висновки. Виконані дослідження підтвердили можливість використання ММП в задачах ультразвукового контролю, експериментально підтверджена можливість використання хвиль Лемба в задачах виявлення дефектів типу порушень суцільності та перевірено коректність запропонованих інженерних рішень як в частині реалізації перетворювачів, так і в частині розроблених апаратно-програмних засобів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оцінювання чутливості магнітострикційного методу контролю в задачах ультразвукової товщинометрії та дефектоскопії, удосконалення алгоритму оцінювання часової затримки сигналів, розробленню суміщеного ММП для роботи в лунаїмпульсному режимі та аналізі його роботи на ОК зі значною кривизною поверхні, а також аналізу можливостей реалізації матричних ММП.

1. (2018) *Non destructive evaluation and quality control*: Metals Handbook, Vol. 17, Ninth Ed. American Society for Metals, ASM International.
2. Kim, Y.Y., Kwon, Y.E. (2015) Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides. *Ultrasonics*, **62**, 3–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.015>
3. Vinogradov S., Fisher J. (2018) Review of guided wave testing using magnetostrictive transducers. In: *12th ECNDT, Gothenburg, Sweden, 2018*.
4. Babak V., Bohachev V., Zaporozhets I. et al. (2023) Some features of modeling ultrasound propagation in non-destructive control of metal structures based on the magnetostrictive effect. *Electronics*, **12**, 477. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12030477/>
5. Єременко В.С., Бабак В.П., Бабак С.В. та ін. (2015) *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики*. Монографія. Бабак В.П. (ред.). Київ, ТОВ «Поліграф-Сервіс».
6. Babak V.P., Bogachev I.A. (2016) *Small aperture magnetostrictive sensors for non-destructive testing*. In: NDT days 2016, Sozopol, Bulgaria. Scientific Proc., 156(1), 104–106.

ВДОСКОНАЛЕННЯ СЕРТИФІКАЦІЇ СПЕЦІАЛІСТІВ І АТЕСТАЦІЇ ЛАБОРАТОРІЙ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ В АТОМНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ ТА ІНШИХ ГАЛУЗЯХ ПРОМИСЛОВОСТІ

Троїцький В.О.

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

З усіх видів «зеленої» енергетики атомна — найемніша і найперспективніша. Треба очікувати, що МАГАТЕ та інші наглядові органи найближчими роками посилять вимоги до НК, до спеціалістів і випробувальних лабораторій у цій галузі енергетики. Оскільки у воюючій Україні з великою кількістю атомних реакторів продовжуються роботи з технічного обслуговування діючих і будівництва нових блоків АЕС, а у багатьох країнах світу: Туреччині, Бангладеш, Індії, Ірані, Єгипеті, Пакистані та ін. починають будівництва АЕС, МАГАТЕ змушений підвищувати вимоги до організацій, що займаються наглядом за безпекою на АЕС. У кожній країні слід мати хорошу організацію у чотирьох сферах акредитації та атестації на АЕС: 1) випробувальні лабораторії; 2) навчання спеціалістів; 3) обладнання, що постачається та експлуатується; 4) калібрування засобів, приладів та еталонних зразків.

Усі ці дії повинні враховувати й сформовані у країнах національні особливості наглядових органів. Національні особливості у даній галузі не повинні послаблювати міжнародні вимоги. Безпека АЕС повинна базуватися виключно на пріоритеті міжнародних правил. Ця тема є дуже актуальною для України. Тому потрібно вивчати та намагатися використати досвід провідних країн в галузі атомної енергетики.

У цьому відношенні для нас важливий досвід США та суміжних з нами країн, де є багато атомних реакторів. УТ НКТД має давні партнерські відносини з Американським товариством з НК (ASNT). Між нашими товариствами укладена Угода про двостороннє співробітництво, а голова і учений секретар УТ НКТД є членами ASNT. В свою чергу, президент і виконавчий директор ASNT є членами УТ НКТД. Відносно нещодавно представники УТ НКТД вели перемовини з Американським товариством неруйнівного контролю (ASNT) про створення в ІЕЗ ім. Є.О. Патона регіонального відділення. Сумісними зусиллями УТ НКТД, Енергоатома та інших зацікавлених сторін цю процедуру можна відновити, маючи на увазі сучасний рівень співробітництва України зі США. Особливо важливо освоїти міжнародний досвід у відповідності до перерахованих сфер нагляду АЕС. В ІЕЗ ім. Є.О.Патона та УТ НКТД є значний досвід у двох з вказаних вище чотирьох сфер нагляду за якістю на АЕС (атестація лабораторій та фахівців НК).

Спеціалістів, що проходять атестацію з НК приблизно у 3 рази більше у порівнянні з кількістю спеціалістів, що атестуються з руйнівних методів контролю. Найбільш затребуваною є первинна атестація. З введенням ISO 9712 зросла щорічна оцінка практичних навиків. Така перевірка зросла у 4 рази. З методів НК найбільш затребуваними є візуально-вимірювальний (33%), ультразвуковий (19%), радіографічний (13%) і капілярний (13%). Особливо важливим є освоєння спеціалізованих методик з різних методів НК.

Атомна енергетика — це одна з галузей промисловості, що найбільш динамічно розвивається і вимагає створення відповідних Учбових центрів, тренажерів і т.ін., як це було свого часу зроблено на ЗАЕС, де після аварії АЕС у Фокусимі (Японія) було створено Учбово-тренажерний центр зі всього комплексу питань НК. Гадаю, що зараз такий Центр потрібно робити у Києві на основі інститутів Академії наук України, де зберігся науковий й практичний потенціал для подібного учбово-тренажерного центру. В ЦС при УТ НКТД є багаторічний досвід з атестації персоналу, багато різного обладнання, у тому числі й для руйнівних випробувань.

В галузі атомної енергетики завжди були свої нормативні документи і вимоги до лабораторій НК.

Американське товариство з НК здійснює нагляд за процедурою сертифікації персоналу НК згідно з SNT-TC-1A та ANSI/ASNT CP-189 за допомогою «Програми сертифікації на основі письмової практики роботодавця».

По EBC Audit Program ASNT процес нагляду складається з наступних процедур:

- подача заявки з повним набором документів та оплатою;
- ASNT підбирає власного аудитора для акредитації компанії, яка подала заявку;
- аудитор виконує перевірку документів на відповідність вимогам SNT-TC-1A та/або CP-189;
- персонал ASNT працює із заявником для усунення невідповідностей;

- дистанційний або явочний (за містом розташування компанії) аудит для підтвердження, що персонал НК навчений, сертифікований;
- персонал ASNT із заявником, щоб закрити невирішені питання;
- експертна комісія підтверджує, що пакет заповнений у відповідності до SNT-TC-1A та/або CP-189;
- публікація на сайті про внесення компанії у перелік акредитованих за EBC компаній на <https://asnt.org>.

Такий спрощений підхід розроблений та підтриманий у США як представниками промисловості, що використовують методи НК, так і виробниками обладнання.

Багаторічне співробітництво двох науково-технічних товариств: ASNT та УТ НКТД можливо було б розширити на сферу безпеки АЕС: сертифікацію спеціалістів і атестацію лабораторій.

Паралельно можна розробити пропозиції для:

- створення Учбово-тренувального центру для персоналу НК на АЕС;
- створення філіалу ASNT в Україні на базі ІЕЗ, КПП, ІПМ;
- підготовки Урядом США та України проекту «Розвиток моніторингу конструкцій у атомній енергетиці та створення Учбово-тренувального центру для АЕС».

Треба пам'ятати, що у 1993–1995 рр. був створений НАК України, який зіграв важливу роль у створенні Центрів з навчання та атестації персоналу в країні. Вони успішно функціонують уже багато років. Досвід ASNT та УТ НКТД показав, що можна суттєво спростити процеси атестації і акредитації. Воєнний час потребує спрощення процедур та підвищення відповідності на місцях.

Закликаю спеціалістів з сертифікації в галузі НК висловитися з піднятих питань.

1. Троицкий В.А. (2022) *Мониторинг состояния конструкций*. Київ, Интерюнис.
2. Troitskiy V.A., Karmanov M.N., Mikhailov S.R. et al. (2023) Scanning X-ray Detector for NDT, ASNT, USA. *Materials Evaluation*, May, 22–28.
3. ASNT: *Программа сертификации на основе письменной практики работодателя EBC Audit Program*. <https://asnt.org/Accreditation/EBC>
4. Troitskiy V.A. (2015) Devices for the movable local multidirectional magnetization of metal structures in magnetic particle testing. *Materials Evaluation*, ASNT, June 2015.

МОНІТОРИНГ СТАНУ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ У ВОЄННИЙ ЧАС

Троїцький В.О.

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

Без моніторингу відновлення неприпустимо. У воєнний час при великих об'ємах руйнування можливе застосування спрощених, полегшених у реалізації методів неруйнівного контролю (НК). Наприклад, радіографічний контроль (РК) замість плівкової радіографії, ультразвуковий контроль (УЗК) на зниженій чутливості і т.п. Без моніторингу (хоча б спрощеного) руйнування продовжаться у мирний час!

Зношеність газотранспортних мереж у багатоквартирних будинках та відсутність контролю за їх станом і ремонтом можуть коштувати значних витрат. Проблема зношеної інфраструктури (комунікації, які транспортують воду, електроенергію та газ у квартири) загрожує періодичними повторами таких ЧС. Житлові будинки руйнуються через відсутність моніторингу їх технічного стану (рис. 1).

Бездефектних зварних швів не існує. Мову можна вести тільки про рівень допустимості окремих типів дефектів та їх вплив на внутрішні напруження, які руйнують конструкції. Існує велика кількість причин виникнення дефектів, з якими треба боротися, а на дрібні дефекти не звертають уваги. Тому в ЕС введено три рівні якості: В, С, D, котрі визначають рівень відповідальності та вартість. Всі види сучасних електротехнологій потребують відповідного рівня технічної культури, кваліфікації спеціалістів, знань про можливості окремих методів контролю якості.

Якщо уважно вивчити діаграму походження аварій трубопроводів (рис. 2), які дуже ретельно діагностуються під час виготовлення та не менш ретельно моніторяться протягом всього терміну їх експлуатації, то стає зрозумілим, що головна причина їх відмов — людський фактор.

Діаграма (рис. 2) доводить, що через людський фактор навіть у магістральних трубопроводах відбувається приблизно 50 % всіх аварій. Тому від технічної компетентності дефектоскопістів залежить можливість пропуску небезпечних дефектів. Неможливо запобігти випадковому впливу на дефектоскопічні процеси зовнішніх факторів (погода, якість електроенергії), до яких дуже чутливі всі методи дефектоскопії. Тут важлива правильна організація праці.

Через стихійні лиха, вибухи, природні явища відбуваються тільки приблизно 7 % аварій. Однак людський фактор у воєнний час може бути зменшений за рахунок спрощення процесу НК. На рис. 3, 4 наведені приклади виявлених стрес-корозійних тріщин, яких не було при виготовленні труб. Це друга за значенням причина аварій трубопроводів, яка залежить від середовища та навантаження на метал.

Для діагностики труб розроблено багато специфічних методик, які описані нижче лише частково, а повністю в книзі «Моніторинг стану металоконструкцій», К., 2020, 300 с. та у Інформбюлетені УТ НКТД «Моніторинг трубопроводів, К., 2024, 72 с.

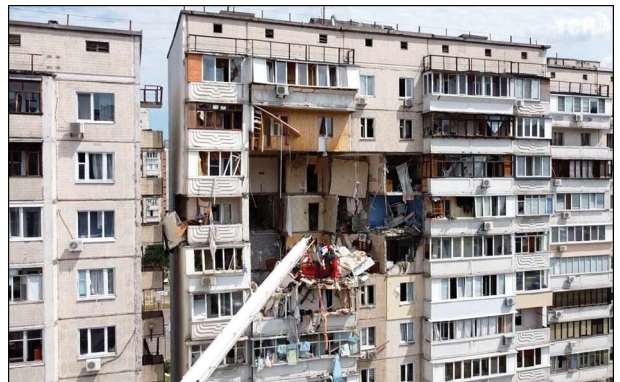


Рис. 1. Ремонтні роботи починаються з демонтажу



Рис. 2. Основні причини відмови трубопроводів



Рис. 3. Характерний вигляд стрес-корозійних тріщин



Рис. 4. Дефекти корозії і механічні ушкодження:
а — виразки; б — вм'ятини

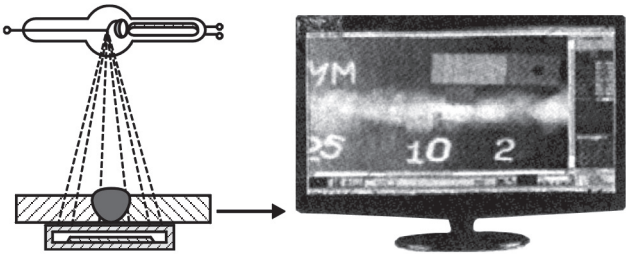


Рис. 5. Схема флеш-радіографії (рентгентелебачення), ДСТУ ISO 17636-2

Детерміновані та статистичні еталони для радіаційного контролю

В ІЕЗ ім. Є.О.Патона, не дивлячись на воєнний час, досі функціонують дві радіаційні лабораторії, в яких вирішуються принципові питання з цього методу. Наприклад, принципово новою є розробка фундаментальних понять детермінованої і статистичної оцінки результатів R-контролю задля оцінки персональних можливостей дешифровальних радіограм.

Вперше в ІЕЗ ім. Є.О. Патона були створені статистичні еталони, що забезпечують більш об’єктивну оцінку якості, ніж детерміновані еталони, якими користуються в усьому світі. При оцінці якості радіаційного зображення за допомогою статистичних еталонів оператор не знає розташування і розміри штучних дефектів. Статистичні еталони важливі для виявлення індивідуальних можливостей операторів-дешифрувальників. Цей суто патонівський науковий доробок в оцінці персональних можливостей операторів поки ще чекає свого поширення задля підняття рівня радіаційної дефектоскопії. У цій лабораторії особливо значимими є досягнення (рис. 5, 6) зі створення детекторів для РТК на основі цифрових рентгентелевізійних ПЗЗ-матриць та флюоресцюючих CsI екранів.

Рухомий рентгентелевізійний контроль (ISO 17636-2)

Цифрова обробка зображень, низька вартість РТК — все це надало нові можливості для виконання оперативної дефектоскопії різних об’єктів. Зараз численні побудові газо-, нафто- і гідро- розподільні трубопроводи, комунації нафтохімічного виробництва радіографічним методом майже не перевіряються, тому що вартість плівкової радіографії дуже висока. Впровадження засобів портативного РТК збільшило застосування НК, дозволило збільшити об’єми контролю якості. Зараз РТК витісняє плівкову радіографію, забезпечує контроль в реальному часі в динаміці та в кілька разів знижує вартість моніторингу. У воєнний час безплівковий РТК застосовують для оперативної оцінки заповнення снарядів ВВ, оцінки якості бронепластин та ін. На рис. 7, 8 наведено схему технології РТК арматури газових труб на основі твердотільних детекторів. Це — найшвидший і найдешевший спосіб отримання цифрового рентгенівського зображення в електронному вигляді, який не потребує додаткового обладнання для хімічної обробки і читування, а також додаткового часу на виконання допоміжних операцій, підбору режимів просвічування. ІЕЗ ім. Є.О. Патона виробляє такі цифрові перетворювачі. Після комп’ютерної обробки цифрових зображень вони дають можливість отримати чутливість до 0,1 % і краще вивчити об’єкт. Портативні, у кілька квадратних сантиметрів, твердотільні цифрові електронні перетворювачі без обмежень можуть програмно пересуватися по поверхні об’єкта будь-яких розмірів.

Технологія скануючого магнітопорошкового контролю

Для різних металоконструкцій необхідна магнітопорошкова технологія.

Традиційна (без сканування)	Нова (зі скануванням)
Продуктивність	
Має виконуватися трикратна перестановка намагнічуючого пристрою в одній точці і багаторазові вздовж зварного шва	Різностямоване плавне переміщення по поверхні та виявлення тріщин різної орієнтації без відриву намагнічуючого пристрою від об’єкту
Мобільність	
При кожній перестановці намагнічуючого пристрою потрібно докласти зусилля 20...30 кг/с	Контроль об’єктів без відриву НУ від поверхні об’єкту
Швидкість	
Низька, визначається кількістю перестановок та процедур МПК	Висока, процедура МПК виконується у русі

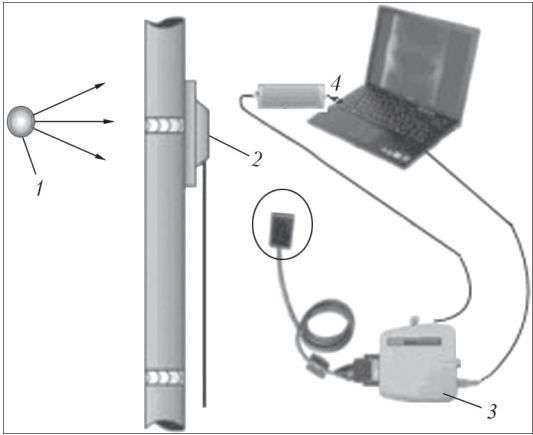


Рис. 6. Контроль стикових з’єднань арматури і труб малого діаметру: 1 — джерело випромінювання; 2 — мініатюрний твердотільний перетворювач; 3 — блок передачі зображень; 4 — виведення зображень на монітор

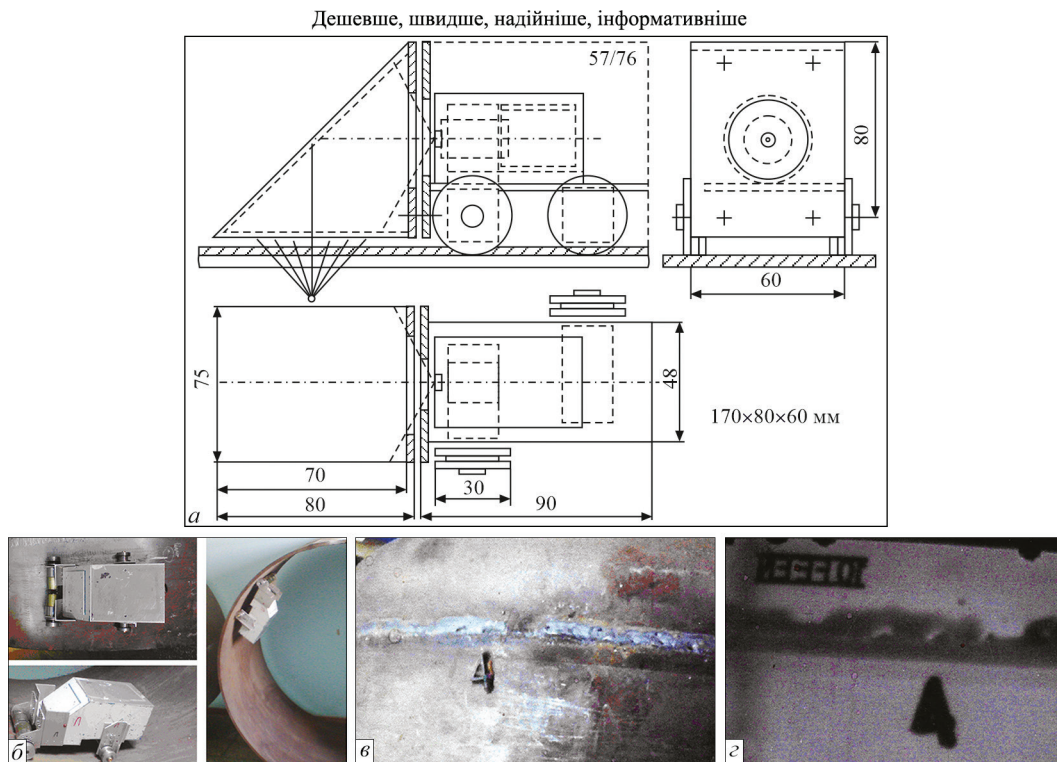


Рис. 7. Дистанційно керований радіоскопічний детектор і технологія його застосування: *а* — схема приладу; *б* — перетворювач на об'єкті; *в* — зварний шов (цифрове фото); *г* — цифровий рентгенівський знімок

Можливості чотирьох намагнічувальних пристроїв (рис. 9, 10) визначаються розподілом нормальних складових поля B_n , які у випадку використання тросиків мають 4 мертві зони (рис. 11, б). Ці зони поганого виявлення дефектів знаходяться під полюсами в місцях та у точках 1/4 та 3/4 у міжполюсній відстані, де криві розподілу нормальної складової B_n проходять через максимальні значення. Чим відстань між полюсами більша, тим сильнішим є прояв мертвих зон. Намагнічуючі пристрої з тросиками випускаються в Україні, Німеччині та в інших країнах. Це дискредитує магнітопорошковий метод НК. На рис. 11 розподіл складових магнітної індукції поверхні на сталевій пластині: *а* — нормальною B_n ; *б* — тангенціальною B_t на відстані 40, 50 і 100 мм між полюсами, тросик (---), ярмо із сталі (—).

Візуально-вимірювальний контроль (ВВК)

До початку ВВК оператор повинен ознайомитися з нормативною документацією (ДСТУ ISO 5817) та рівнем якості, який повинен бути. За стандартом України дефекти зварювання плавленням можуть бути трьох рівнів D, C, B. Якщо труба не відповідає ні одному з рівнів якості (D, C, B), вона може бути використана тільки для трубних металоконструкцій.

Виробництво труб різного рівня якості потребує відповідного рівня технічного оснащення, та підготовки персоналу.

У сучасному виробництві зварних конструкцій зображення внутрішніх та зовнішніх зварних з'єднань записуються оптоелектронними приладами, які виробляються в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Рівні допустимих дефектів визначають вартість металоконструкцій.

Ручні та дистанційно-керовані пристрої для об'єктивного візуально-вимірювального контролю

При моніторингу металоконструкції важливим є об'єктивний візуально-вимірювальний контроль, наприклад, як у таблиці № 1 для нафтохімічних виробництв. На рис. 13 ВВК/ТВА-1 складається з: 1а, 1б — світло-лазерне підсвічування шва та наволошовної зони; 2а, 2б, 2в — гвинти для регулювання ширини та висоти світлового підсвічування; 3 — відеокамера з підсвічуванням; 4 — ввімкнення світло-лазерного підсвічування; 5 — роз'єм

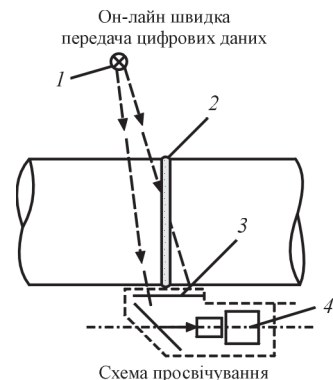


Рис. 8. Вартість та швидкість радіаційного контролю (РНК) із застосуванням цифрових детекторів ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ на порядок нижче



Рис. 9

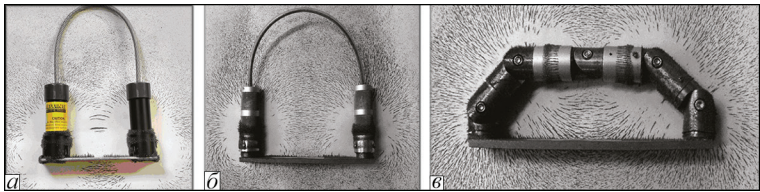


Рис. 10

для заряджання акумулятора; 6 — магнітний утримувач для смартфона; 7, 8 — роз’єм USB/microUSB; 9 — ручка-контейнер, всередині якої знаходяться акумулятори (Пат. Укр. № 133382).

Таблиця № 1

Об’єкт	Об’єкт контролю	Збільшення
Ковані, штамповані	100 % поверхні	10-кратне
Кромки швів	100 % поверхні, включаючи навколошовну зону шириною 30 мм	
Несплавлення	100 % поверхні	3...4-кратне
Зварні з’єднання	Поверхні з навколо шовною зоною шириною не менше 30 мм	

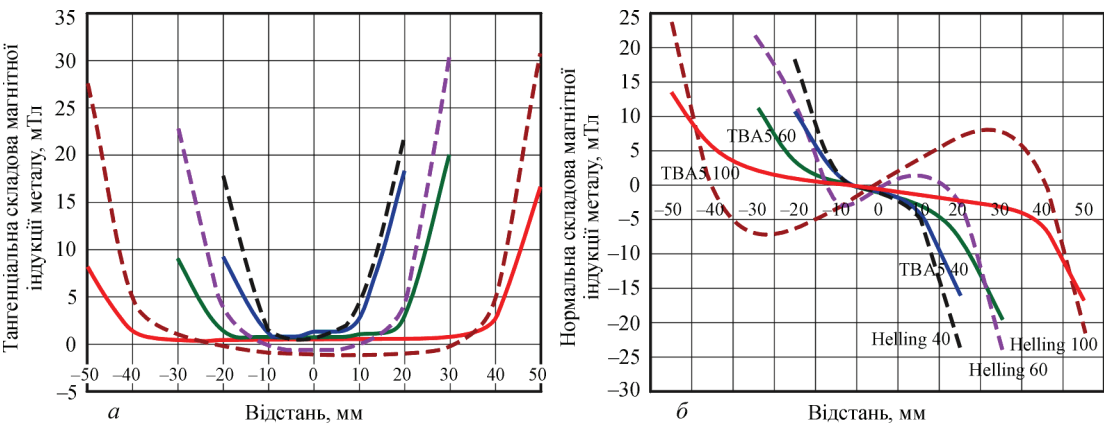


Рис. 11. Розподіл B_n , B_t складових магнітної індукції на сталій пластині: а — тангенційної B_t ; б — нормальної B_n при відстані 40, 50 та 100 мм між полюсами (----) тросик, ядро із сталі (—)

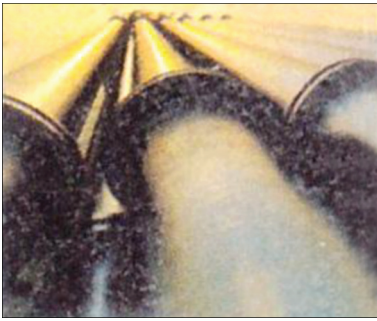


Рис. 12.

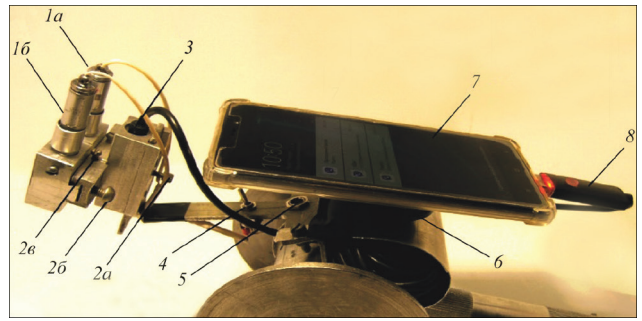


Рис. 13.

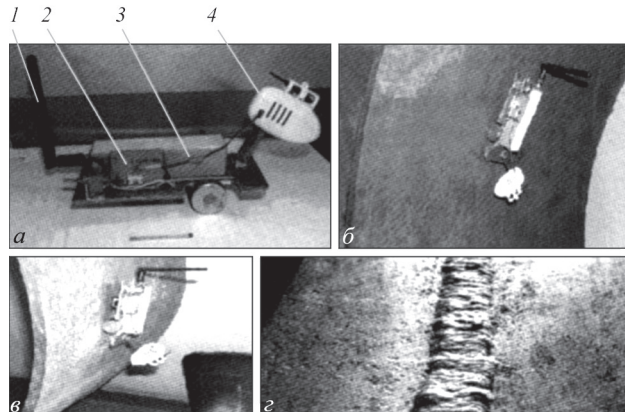


Рис. 14. Універсальна дефектоскопічна платформа

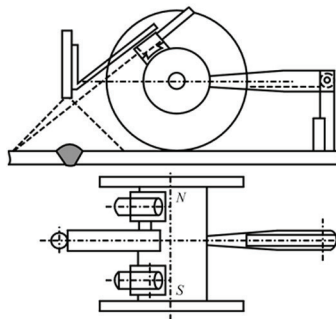


Рис. 15. Конструктивна схема (а) та зовнішній вигляд (б) пристрою ВБК/ТВА з двома лазерними вказівниками для вимірювання ширини шва, USB веб-камерою та двома підсвічуваннями наковалюшовної зони

При зборі даних відеокамера знаходиться від поверхні шва на відстані 5...8 см, при цьому зображення має дворазове збільшення при швидкості переміщення 3 м/хв. відеопотоку: до 30 кадрів/с; зовнішній діаметр головки камери 8 мм, дроти 4 мм; фокусна відстань від 25 мм; кут огляду 67°; інтерфейс USB\microUSB; підтримка системи Android. Виготовляють також радіокеровані багатофункціональні платформи (рис. 14) здатні переміщатися в різних просторових положеннях, включаючи стельове.

На рис. 14, 15 показана така платформа з WiFi-камерою на зовнішній і внутрішній поверхнях труби. Вона має лише два колеса, осі яких рознесені, що робить її стійкою на поверхнях будь-якої кривизни і забезпечує розгортання на місці 360°. Сила відриву пристрою від поверхні 12 кг (Пат. Укр. № 143653): а — загальний вигляд; б, в — стельове та бічне положення на трубі діаметром 1200 мм; г — запис зварного шва; 1 — антена 2,4 ГГц; 2 — блок радіокерування.

ОСОБЛИВОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ АУСТЕНИТНИХ ЗВАРНИХ ШВІВ

Шекеро А.Л.

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

Аустенітна нержавіюча сталь має унікальні властивості і широкий спектр застосування. Однією із найбільш важливих її властивостей є висока стійкість до корозії. Завдяки вмісту хрому і нікелю вона здатна протистояти впливу вологи та інших агресивних середовищ. Саме тому аустенітні сталі знайшли широке використання в атомній енергетиці, суднобудуванні, морських платформах, у виробництві обладнання для харчової промисловості. Завдячуючи своїй стійкості до агресивних хімічних речовин аустенітні сталі застосовуються для виробництва нафтохімічного обладнання, трубопроводів і ємностей. Аустенітна нержавіюча сталь має високу міцність, хорошу пластичність і стійкість до різних механічних впливів. Ці механічні властивості зберігаються і при високих температурах, що робить цей матеріал придатним для використання в умовах підвищеної температури.

Однак, внаслідок крупнозернистої структури, ультразвуковий контроль виробів з аустенітних матеріалів і, зокрема, аустенітних зварних швів, є проблемним. Ці проблеми, в основному, виникають внаслідок металургійних особливостей аустенітної сталі. Низька теплопровідність і відсутність фазового перетворення в затвердлій структурі металу шва призводять під час накладання шару до епітаксiального зростання зерен, що утворилися під час попередніх зварювальних проходів, що призводить до дуже грубої і анізотропної дендритної зеренної структури [1]. Ці крупні аустенітні зерна викликають розсіювання ультразвукової енергії, що викликає швидке затухання енергії та призводять до зміни напрямку поширення ультразвукової хвилі. Від кристалографічної орієнтації в дендритах залежить також швидкість поширення хвилі. Усі ці фактори призводять до зниження ймовірності виявлення дефектів і помилок у визначенні місця їх розташування.

І оскільки радіографічний контроль, як альтернативний метод для виявлення внутрішніх дефектів, в багатьох випадках не може використовуватися (наприклад, при контролі в процесі експлуатації, для зварних з'єднань значної товщини, для виявлення площинних дефектів з малим розкриттям і т.ін.), необхідно вирішувати вищезазначені проблеми, що виникають при ультразвуковому контролі.

Основними параметрами, які необхідно враховувати при виборі способів контролю і перетворювачів, є чутливість, дозвільна здатність і відношення сигнал/шум. Щодо перших двох параметрів, логічним рішенням є використання стандартних нахилених перетворювачів поперечних хвиль. Тим не менш, у випадку аустенітних сталей, визначальним перш за все є відношення сигнал/шум. Завдяки більшій довжині поздовжніх хвиль значно в меншій мірі піддаються впливу крупних аустенітних зерен, ніж поперечні. Однак, при виконанні контролю поздовжніми хвилями що збуджуються нахиленим перетворювачем, необхідно мати на увазі, що при їх відбитті від внутрішньої поверхні зварного з'єднання відбувається перетворення моди хвилі, що неабияк ускладнює трактування отриманих результатів. Тому, якщо обирається спосіб контролю за допомогою поздовжніх хвиль, оптимальним є проведення прозвучування тільки прямим пучком. При цьому, для виявлення несущільностей у верхній частині шва потрібно або попереднє повне видалення посилення шва для забезпечення можливості сканування, або вибір кута нахилу призми перетворювача близьким або рівним першому критичному куту.

Коли поздовжня хвиля падає на зовнішню поверхню зварного з'єднання під першим критичним кутом (близько 27°), виникає повзуча хвиля (steering wave). Її швидкість приблизно дорівнює швидкості поздовжньої хвилі, а кут головної пелюстки діаграми спрямованості становить близько 80° (тобто майже паралельно поверхні). Повзуча хвиля поширюється на глибину приблизно однієї довжини хвилі, добре виявляє вертикальні тріщини і малочутлива до нерівностей поверхні. В той же час, її енергія дуже швидко затухає внаслідок того, що при поширенні вздовж вільної поверхні повзуча хвиля безперервно генерує поперечні хвилі (що також називаються головними хвилями). Ці головні хвилі здатні генерувати вторинну повзучу хвилю вздовж внутрішньої поверхні зварного з'єднання, яка може бути використана для виявлення поверхневих або підповерхневих дефектів відносно донної поверхні [2].

Таким чином, перевагою використання поздовжніх хвиль є їх менші затухання та анізотропія в металі шва в порівнянні з поперечними хвилями, як наслідок, відносно менший рівень структурних завад і краще відношення сигнал/шум, а недоліком — труднощі виявлення дефектів у верхній частині шва (якщо конструкція не передбачає видалення посилення шва), а також наявність хибних сигналів, обумовлених збудженням разом з поздовжньою хвилею поперечної з іншою швидкістю, що призводить до виникнення серії сигналів, відбитих як від структурних неоднорідностей, так і від реальних несущільностей.

1. Padaki V.C., Barat P., Baldev Rajb Bhattacharya D.K. (1983) Ultrasonic inspection of austenitic stainless steel weldments — Our experiences. *Indian Welding J.*, July.
2. EN ISO 22825:2017: *Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Testing of welds in austenitic steels and nickel-based alloys*.

ЗАСТОСУВАННЯ АЕ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Яременко М.А., Недосєка С.А., Овсієнко М.А.

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

Для оцінки технічного стану відповідальних промислових об'єктів різного призначення активно використовується технологія АЕ контролю та моніторингу. В залежності від поставлених завдань АЕ контроль може бути разовим, періодичним або безперервним.

Ремонт та виведення конструкцій з експлуатації за фактичним станом є одним із найважливіших завдань промисловості. Нові технології у галузі контролю стану конструкцій дозволяють проводити 100 % контроль несучих елементів конструкцій і, як правило, виконуватися без зупинки виробництва. Сучасна комп'ютеризована АЕ технологія дозволяє в автоматичному режимі у процесі планових випробувань і безперервного моніторингу промислових об'єктів, що працюють у складних умовах (високі температури, шуми, обмежений доступ до основного металу) оцінювати їх технічний стан за рівнем небезпеки та отримати прогноз стану конструкції з визначенням залишкового ресурсу на ранніх стадіях розвитку дефектів.

Використання модернізованого АЕ обладнання SENSOPHONE/EMA, розробленого ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України та фірмою Geréb és Társa (Угорщина), що має 128 АЕ каналів та 128 каналів для реєстрації технологічних параметрів, дозволяє визначати ступінь небезпеки стану об'єктів із локалізацією місць можливого руйнування, прогнозувати руйнівне навантаження при поточних умовах експлуатації, оцінювати залишковий ресурс конструкцій.

Прикладами успішного впровадження АЕ технології є багаторічний контроль аміакосховищ та обладнання цеху виробництва аміаку ОПЗ, об'єктів нафтопереробного комплексу, авіаційних підприємств, ТЕЦ, мостових переходів і трубопроводів різного призначення. На підставі отриманих даних видаються рекомендації щодо подальшого режиму експлуатації об'єктів АЕ моніторингу; оперативно оповіщується відповідний персонал для своєчасного реагування на зміни у стані контрольованих об'єктів, а також визначаються місця для проведення додаткового контролю неруйнівними методами при проведенні ремонту. Проведення АЕ моніторингу небезпечних об'єктів дозволило значно скоротити час та ресурси при проведенні ремонтних робіт. Результати АЕ моніторингу враховують при оцінці терміну та режимів подальшої експлуатації таких об'єктів.

У зв'язку з наявністю значної кількості об'єктів з обмеженим доступом до основного матеріалу (теплоізоляція, великі геометричні розміри, плакуючий шар, низькі та високі температури та ін.) проведено статистичні дослідження хвильових процесів у матеріалах та їх зв'язку з руйнуванням і пошкодженням, оброблені дані контролю промислових об'єктів з особливостями та важкодоступних для проведення контролю з використанням зонного методу.

Розвиток технології АЕ діагностування та модернізація відповідного обладнання дозволить відслідковувати за даними АЕ поточний стан об'єктів, для яких не існує надійних методів його оцінки.

Співробітниками ІЕЗ ім. Є.О. Патона (м. Київ) та ФМІ ім. Г.В. Карпенка (м. Львів) НАН України розроблено новий стандарт — ДСТУ 9118:2022 «Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій. Загальні вимоги». Основний акцент зроблено на кількісні показники діагностування та точність оцінки стану матеріалу конструкцій, що діагностуються.

Більш глибоке вивчення механізмів взаємозв'язку між механічними властивостями матеріалу та сигналами АЕ на об'єктах різного призначення, з різними режимами експлуатації, при різних температурах дасть змогу значно розширити область застосування АЕ технології, а висока продуктивність методу дозволить успішно проводити оцінку стану відповідальних промислових конструкцій під час післявоєнної відбудови.

CONTENTS

3D PRINTING OF METAL PRODUCTS	5
<i>Adzhamsky S.V., Balakhanova T.V., Podolsky R.V., Baranovskaya O.E.</i> Analysis of the influence of the spatial location of samples on the build platform on the geometric characteristics of the melt bath in the LPBF process	5
<i>An Tiancheng, Berdnikova O.</i> Repair restoration of steam turbine blades by laser surfacing	6
<i>Bondarenko V.L.</i> WAAM with adapted Fronius MIG/MAG AC processes	8
<i>Zakorko V.O., Ternovyi E.G., Piskun N.V., Glushak S.O., Fedchenko V.V.</i> Additive technologies in Space	9
<i>Kvasnytskyi V.V., Lahodzynskyi I.M., Chorny A.V., Chernyi V.O., Kvasnytskyi A.V.</i> Determination of the influence of WAAM surfacing methods, composition of filler materials and protective gas environments on the formation of metal structure and geometric characteristics of spatial products	11
<i>Korzhuk V.M., Khaskin V.Y., Ilyashenko E.V., Vdovychenko D.M., Vdovychenko I.M., Bozhok O.E., Tereshchenko O.S.</i> Experience and prospects of 3D printing of metal alloy products by plasma-arc additive surfacing	13
<i>Matviychuk V.A.</i> Additive electron beam technologies for the manufacture of metal products by layer-by-layer surfacing using powder materials	14
<i>Stepanov D.V., Chvertko E.P., Minakov S.M., Minakov A.S., Strelenko N.M., Vdovychenko I.M., Vdovychenko D.M.</i> Technological features of multilayer arc surfacing of thin-walled bodies	16
<i>Tomko D., Motrunich S.</i> Influence of parameters of additive arc 3D printing technology on mechanical properties of nickel alloy Inconel 625	17
NON-DESTRUCTIVE TESTING AND MONITORING OF TECHNICAL CONDITION	19
<i>Galanenko D., Mishchenko V., Pareniuk A.</i> High-speed system of complex diagnostics of rail track OKOSCAN-73 HS	19
<i>Glubets S.M.</i> Ultrasonic inspection of butt welded joints of polyethylene pipes	20
<i>Glukhovskiy V.Y., Lytvynenko V.A.</i> Statistical evaluation of data and threshold identification of defects in diagnostics of industrial objects and products by thermal imaging	21
<i>Dyadin V.P., Torop V.M., Davydov E.O.</i> Assessment of the risks of brittle fracture of structural steel M16S and welded joints of the main longitudinal beams of the Paton Bridge	22
<i>Karmanov M.M., Mikhailov S.R., Shalaev V.A.</i> Precision X-ray scanners based on mini-sensors	27
<i>Karmanov M.M., Mikhailov S.R., Shalaev V.A.</i> Digital systems of X-ray television nondestructive control	28
<i>Kozin O.M.</i> Current flaw detectors of the UNIVERSAL ACY series	29
<i>Lobanov L.M., Znova V.Y., Dzhavadova I.I., Shutkevych O.P., Kiyans I.V., Shkurat I.L., Shyian K.V., Stelmakh D.I., Savytskyi V.V.</i> Adaptation of the method of broadgraphy for detection of micro-defects in aluminum welded joints and thin-walled composites	31
<i>Lobanov L.M., Stelmakh D.I., Shutkevych O.P., Shkurat I.L., Savytskyi V.V.</i> Smart-diagnostics of large-sized structures using unmanned aerial vehicles, photogrammetry method and artificial intelligence	32
<i>Lobanov L.M., Shkurat I.L., Shutkevych O.P., Stelmakh D.I., Savytskyi V.V.</i> Automation of broadband quality control of materials using artificial intelligence and synthetically generated data	33
<i>Minakov S.M., Uchanin V.M., Chvertko E.P., Vdovychenko D.M., Vdovychenko I.M., Minakov A.S., Stepanov D.V., Strelenko N.M.</i> Magnetoanisotropic control of the stress state of metal structures	34
<i>Pavliy O.V.</i> Consumables for magnetic particle flaw detection MR-Chemie (Germany)	35

<i>Pavliy O.V.</i> An example of application of GO-SCAN system for flaw detection of pipeline welding	36
<i>Pavliy O.V.</i> Radiation methods of non-destructive testing. Classical radiography. Current state and prospects	37
<i>Posypayko Y.</i> New standards of metal products flaw detection by methods of penetrating substances	38
<i>Roslyakov O.S., Strynadko M.T., Yermolenko S.B., Reshetnyk S.I., Shukh Y.V.</i> Polarization spectral-selective mapping of microdefects in composites	40
<i>Sozonov S.V., Kovtun S.I., Bogachev I.V., Dekusha O.L., Kuts Y.V.</i> Investigation of magnetostrictive method of ultrasonic inspection	42
<i>Troitskyi V.O.</i> Improvement of certification of specialists and certification of laboratories of non-destructive control in nuclear energy and other industries	45
<i>Troitskyi V.O.</i> Monitoring of industrial facilities in wartime	47
<i>Shekero A.L.</i> Features of ultrasonic inspection of austenitic welds	52
<i>Yaremenko M.A., Nedoseka S.A., Ovsienko M.A.</i> Application of AE technology for assessing the technical condition of critical industrial facilities	53