

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України  
ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»

Конференція  
**ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ**

Збірка тез пленарних та стендових доповідей  
Програма конференції

27 листопада 2025  
Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

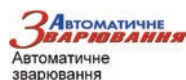
**Зварювання та споріднені технології для відновлення України:** Тези допов. конф. під ред. О.Т. Зельніченка.  
Київ: ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН», 2025. — 122 с.

В збірці представлено 76 тез доповідей конференції «Зварювання та споріднені технології для відновлення України», 27 листопада 2025 р., м. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, в яких відображені останні досягнення та практичні результати в галузі зварювання, електрометалургії, неруйнівного контролю, технічної діагностики і споріднених технологій, отримані фахівцями з України та країн далекого зарубіжжя.

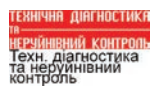
Організатори конференції висловлюють подяку наступним організаціям та компаніям:

- Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
  - ТОВ «РЕАТІСС»
  - ПП ТОВ «Бінцель Україна ГмбХ»
  - ТОВ «ВТЦ»
  - ТОВ «Інтерхім-БТВ»
  - ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК»
  - ТОВ «Червона Хвиля»
  - ДП «Міжнародний центр електронно-променевої технології Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України»
- за надану допомогу в проведенні конференції.

Інформаційна підтримка конференції



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



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



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



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

Видавничий проєкт:

*О.Т. Зельніченко, І.Ю. Романова, Т.Ю. Снегірьова*

Свідоцтво серія ДК, № 8485, дата видачі 10.09.2025

Тези публікуються в авторській редакції.

**ISBN 978-966-96309-4-0**

© ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН», 2025

© Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2025

## ЗМІСТ

<b>ПРОГРАМА КОНФЕРЕНЦІЇ</b> .....	7
<b>ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ</b> .....	17
<i>Демченко В., Номіровський Д., Кривцун І.</i> Оптимізація форми імпульсів струму за критерієм силової дії модульованого струму .....	17
<i>Дмитрик В.В., Касьяненко І.В., Чень Сінлей.</i> Оцінка надійності зварних з'єднань паропроводів, довготривало працюючих в умовах повзучості .....	18
<i>Kovalenko Dmytro, Krivtsun Igor, Biber Alexander, Mokrov Oleg, Pavlov Oleksii.</i> Features of increasing penetration in high-frequency pulsed TIG welding of carbon and stainless steel (experimental studies) .....	21
<i>Коржик В.М., Ілляшенко Є.В., Чигілейчик С.Л., Торба Ю.І., Чет О.В.</i> 3D друк виробів із жароміцних сплавів адитивним плазмово-дуговим направленням: нові технологічні підходи та розробка обладнання .....	22
<i>Коржик В.М., Строгонов Д.В., Терещенко О.С.</i> Застосування дугових плазмотронів з трубчастими мідними електродами для отримання дрібнодисперсних сферичних порошків металевих сплавів .....	24
<i>Лобанов Л., Стельмах Д., Дядін В., Савицький В.</i> Технічна діагностика стану мостів на основі фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів .....	26
<i>Матвійчук В.А.</i> Компоненти ГТД зі сплаву ВТ6: адитивне виготовлення та властивості .....	27
<i>Махненко О.В., Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Махненко О.О.</i> Чисельний аналіз експлуатаційної міцності зварних поглинаючих стрижнів системи управління та захисту енергетичного реактора ВВЕР-1000 .....	28
<i>Шаповалов Є.В., Долиненко В.В., Коляда В.О., Ващенко В.М., Новодранов А.С., Ващенко О.Ю., Мангольд А.М., Кліщар Ф.С.</i> Розробка та дослідження робототехнічної системи для реалізації адитивної технології WAAM виготовлення бурового інструменту .....	30
<i>Юдін Ю.В.</i> Колаборативні роботи АОТАЙ — системне рішення кадрових криз, спричинених нестачею кваліфікованих робітників на промислових підприємствах .....	33
<i>Яровицин О., Черв'яков М., Мотруніч С., Волосатов І., Звягінцева Г., Пестов В., Хрущов Г., Томко Д., Джуньвень Д.</i> Матеріалознавчі проблеми дугового адитивного виробництва деталей зі сплаву Inconel 625 .....	38
<b>СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ</b> .....	39
<i>Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В.</i> А-ТІГ зварювання титанового сплаву Ti-6Al-4V .....	39
<i>Березос В.О., Єрохін О.Г., Липчанчук Є.І.</i> Електронно-променева плавка зливків-слябів із високоміцних сплавів титану .....	40
<i>Білоус В.Ю., Ахонін С.В., Селін Р.В., Радченко Л.М.</i> Застосування аргонодугового зварювання для титанових сплавів на основі інтерметалідів титану .....	41
<i>Богаченко О.Г., Гончаров І.О., Міщенко Д.Д., Нейло І.О.</i> Дослідження впливу процесів дифузії на питомий електричний опір графітованих гнотових електродів .....	42
<i>Васильєв Д., Фадеєва Г., Радзиевська А., Полухін В., Чджун Цзицяо.</i> Дослідження процесу підводного зварювання під флюсом та розробка складів порошкових паст .....	43
<i>Ворона Г., Махненко О.</i> Ефективність підсилення ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки при встановленні зварної муфти та зварної накладної латки .....	44
<i>Гах І.С., Задерій Б.О., Звягінцева Г.В., Черв'яков М.О., Карасевська О.П.</i> Термодформаційні процеси та тріщиноутворення при електронно-променевому зварюванні монокристалів жароміцних нікелевих сплавів .....	47

<i>Gornostai O.V., Khokhlov M.A., Stelmakh Y.A., Khokhlova J.A.</i> Functional silver and copper nanocoatings on medical implants deposited by the EB-PVD method .....	48
<i>Глуховський В.Ю., Литвиненко В.А.</i> Особливості моніторингу стану навантажених металоконструкцій методом тепловізійного контролю .....	49
<i>Демченков С.О., Кулініч М.В., Кленко О.Ю., Поліщук С.С., Устінов А.І.</i> Вплив текстури покриттів Со–Ni на рівень їх демпфуючої здатності .....	50
<i>Демченков С.О., Устінов А.І., Мельниченко Т.В.</i> Електронно-променева технологія отримання композитних матеріалів системи Cu–Fe з високою ефективністю екранування електромагнітного випромінювання .....	52
<i>Драченко М.П.</i> Енергоефективність і контроль енергетичних параметрів устаткування для дугового зварювання .....	54
<i>Ji Junwen, Zhdovtsev Anatoliy, Kopylov Viacheslav, Klapatyuk Andrej.</i> Innovative fabrication of high entropy alloy via wire arc additive manufacturing .....	55
<i>Зяxor I.B., Левчук А.М., Шило Ю.А., Гуцин К.В., Завертанний М.С., Кольцов В.В.</i> Технології стикового зварювання тиском через перехідний елемент .....	56
<i>Калужний С.М., Максимов С.Ю., Войнарович С.Г., Кислиця О.М., Теплюк В.М., Свірідова І.С., Ульянович Н.В., Коломієць В.В.</i> Біосумісні покриття з антибактеріальними властивостями, отримані методом мікроплазмового напилення .....	58
<i>Квасницький В.В., Зворикіна А.К., Зворикін Л.О., Зворикін К.О.</i> Особливості структурної будови нерознімних з'єднань надпружних нітинолових дротів, отриманих дуговим і конденсаторним зварюванням .....	59
<i>Квасницький В.В., Лагодзінський І.М., Чорний А.В., Черній В.О.</i> Аналіз впливу GMAW-CMT/PULSE і PAW-CW способів WAAM наплавлення та складу захисного газового середовища на особливості структуроутворення та геометричні характеристики друкованих зварних виробів .....	61
<i>Книш В.В., Мірянін В.М., Мальгін М.Г., Кот В.Г., Кадишев А.А.</i> Інтелектуальна платформа моніторингу технічного стану мостів на основі цифрових двійників і моделей штучного інтелекту .....	63
<i>Книш В.В., Ткач П.М., Мальгін М.Г., Кот В.Г., Кадишев А.А.</i> Підвищення залишкової довговічності стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД, зміцнених комбінованою обробкою високочастотним проковуванням з механічним легуванням ультрадисперсним нікелем .....	64
<i>Kovalenko Dmytro.</i> A-TIG welding of stainless steel up to 12 mm thick with full penetration .....	65
<i>Козулін С.М., Міщенко Р.М.</i> Відновлення зношених деталей машин імпортного виробництва електрошлаковим наплавленням плавким мундштуком .....	66
<i>Комарницький Б.Р., Личак О.В., Юзефович Р.М.</i> Виявлення та оцінювання корозійних пошкоджень наводнювання в обертових механізмах із використанням ПНВП-методів обробки вібраційних сигналів .....	67
<i>Коротинський О.Є., Жерносеков А.М., Скопюк М.І., Вертецька І.В.</i> Автономні зварювальні комплекси на основі сучасних накопичувачів енергії .....	68
<i>Костецький Ю.В., Педченко Є.О., Полішко Г.О., Зайцев В.А., Петренко В.Л., Трикозенко Д.І.</i> Переробка лому та відходів нікелевих сплавів методом електрошлакового переплаву .....	69
<i>Крилов С.В., Лаврик В.П., Суглобов В.В.</i> Досвід застосування електродугової металізації (ЕДМ) при відновленні та зміцненні поверхні деталі .....	70
<i>Krivtsov I.V., Akhonin S.V., Rymar S.V., Hubatiuk R.S., Berezos V.O., Khomutskyi S.V.</i> Results of mathematical modelling of heat and mass transfer processes in electron beam melting of copper ingots .....	72
<i>Krivtsov I.V., Gubatyuk R.S., Prokofiev O.S., Pantelejmonov E.O., Rymar S.V., Abdulakh V.M., Kostin V.A., Hryhorenko S.H., Zhukov V.V., Goncharov I.O., Kuzmenko G.V.</i> Modeling of the heat treatment process of welded joints of tram rails .....	73
<i>Кривцун І., Демченко В., Крикент І.</i> Електричні та енергетичні характеристики дуги з тугоплавким катодом .....	74
<i>Кузьменко Г.В., Гончаров І.О., Тагановський В.М.</i> Дослідне устаткування для автоматичного дугового зварювання плавким мундштуком металу завтовшки до 60 мм конструкцій із високоміцних сталей .....	75

<i>Кушнарьова О.С., Берднікова О.М., Алексеєнко Т.О., Григоренко С.Г., Позняков В.Д., Гайворонський О.А., Завдовєєв А.В., Гончаренко О.І.</i> Структурні параметри та механічні характеристики металу зварних з'єднань сталі спеціального призначення після впливу циклічного навантаження .....	76
<i>Кушнарьова О.С., Берднікова О.М., Колісниченко О.В., Алексеєнко І.І., Тітков Є.П., Андрійчук Є.Б.</i> Особливості структури поверхневих шарів інструментальної сталі після імпульсно-плазмової обробки .....	77
<i>Лисенко О.М.</i> Застосування гібридних інформаційно-обчислювальних систем та глибокого навчання для проактивного контролю якості у 3D адитивних технологіях .....	78
<i>Markovska Sofia, Shtofel Olha, Holovko Viktor.</i> Fractal parameterisation of welded joint zones .....	80
<i>Melnychenko T.V., Ustinov A.I.</i> Plastic flow of multilayer Ni/Al foils at heating under load and its effect on the diffusion bonding of difficult-to-deform materials .....	82
<i>Мінаков С.М., Чвертко Є.П., Стреленко Н.М., Мінаков А.С., Степанов Д.В., Вдовиченко І.М., Вдовиченко Д.М.</i> Застосування ТІГ зварювання-паяння для художніх виробів .....	83
<i>Молтасов А.В., Каток О.А., Томко Д.С., Ткач П.М., Димань М.М.</i> Застосування методу еквівалентної густини енергії деформації (ESED) для визначення напружень за межами пружності в зонах концентрації з урахуванням залишкових зварювальних напружень .....	85
<i>Несін В.В.</i> Дослідження причин і місця ймовірного розташування пор у напаяному шарі заготовок з латунною основою .....	86
<i>Nosov D.G., Peremitko V.V., Shevtsov V.B., Makarenko M.V.</i> Improvement of the technology of welding of high-strength steels with controlled transfer (AHSS) processes based on the analysis of thermal affected zone modeling .....	88
<i>Пеліпець Р.І., Юзефович Р.М., Яворський І.М., Личак О.В.</i> Використання властивостей аналітичної функції біперіодично нестационарно випадкового процесу для вібраційного моніторингу .....	89
<i>Перемітько В.В., Євдокимов А.В., Голякевич А.А., Сухомлин В.І., Сергєєв М.О.</i> Вплив додавання фторвмісного полімеру до шихти порошкового дроту на властивості наплавлених шарів .....	90
<i>Перемітько В., Коломоєць І., Чумак М.</i> Удосконалений пристрій для наплавлення тонкостінних деталей .....	91
<i>Peremitko V.V., Plitchenko S.O., Gerasimov V.V., Yermak D.A., Ocheretko O.S.</i> Features of wear and restoration of worm screw segments in a bead mill .....	92
<i>Посипайко Ю.М.</i> Діагностування технічного стану, ремонт і відновлення зварних резервуарів .....	93
<i>Прилипка О. О., Максимов С. Ю., Берднікова О.М., Ромашико Д.В.</i> Особливості структуроутворення у металі зварних з'єднань, виконаних під водою з використанням зовнішнього електромагнітного впливу .....	94
<i>Романенко О.В., Лопаткіна К.Г., Грабовський С.Д., Васильченко В.А., Ткаченко В.А., Чвертко Н.А.</i> Розробка гібридної технології зварювання біологічних тканин на експериментальному стенді .....	95
<i>Романенко О.В., Лопаткіна К.Г., Ткаченко В.А., Чвертко Н.А.</i> Огляд досліджень гібридного зварювання сухожилків .....	96
<i>Романенко О.В., Ткаченко С.В., Грабовський С.Д., Самойлова Т.Г., Бісько В.О., Чвертко Н.А.</i> Високочастотний електрохірургічний мобільний автономний генератор МАВ-200. Розробка та можливості .....	97
<i>Семікин В.Ф., Ланкін Ю.М., Романова І.Ю., Байштрук Є.М.</i> Етапи вдосконалення технічних засобів керування струмом електродугового зварювання .....	98
<i>Сенченков І.К., Рябцев І.О., Червінко О.П., Доля О.В.</i> Моделювання залишкових напружень і дисторсії при наплавленні трубчастих елементів .....	99
<i>Сенченков І.К., Юрженко М.В., Червінко О.П., Усов В.А.</i> Розрахунок залишкового НДС при нарощуванні циліндричних тіл із в'язкопластичних матеріалів .....	100
<i>Соловей С.О., Мордюк Б.М., Мірянін В.М., Булаш В.М., Ткач І.Г.</i> Застосування високочастотної механічної проковки та механічного легування ультрадисперсним нікелем з метою підвищення опору корозійній втомі стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД .....	101
<i>Stepakhno A.V.</i> Paton International — evolutions in years .....	102

<i>Tiancheng An, Berdnikova Olena. Restoration of XM-25 turbine blades via ded laser cladding: Microstructural evolution and mechanical performance</i> .....	104
<i>Торон В.М., Рабкіна М.Д., Давидов Є.О. Ретроспективний погляд на розвиток дефектів у зварних з'єднаннях аустенітної сталі Чорнобильської АЕС</i> .....	105
<i>Троїцький В.О., Михайлов С.Р., Пастовенський Р.О., Карманов М.М. Рентгенотелевізійний контроль титанових суглобних імплантатів</i> .....	108
<i>Трохим Г.Р., Черчик Г.Т., Шараміга Р.В., Яворський І.М. Відхилення характерних частот прояву дефектів підшипників як додатковий індикатор їх стану</i> .....	109
<i>Хміль Р.І., Юзефович Р.М., Яворський І.М., Личак О.В. Дослідження імовірнісних характеристик вібраційних сигналів з використанням ПНВП-моделей</i> .....	110
<i>Черв'яков М., Яровицин О., Стрєжнев Д., Волосатов І., Хрущов Г. Порівняльний аналіз мікроструктури та механічних властивостей наплавленого металу жароміцних сплавів Renè 80 та ЖСБК</i> .....	111
<i>Шановалов В.О., Протоковілов І.В., Порохонько В.Б., Петров Д.А. Електрошлаковий переплав відходів високореакційних і прецизійних металів і сплавів</i> .....	112
<i>Shtofel Olha, Holovko Viktor, Korolenko Danilo. New capabilities of calculation methods for analyzing the weld metal structure orientation</i> .....	113
<i>Shtofel Olha, Rabkina Mariana, Chyzhska Tetiana. Analysis of a defective structure using a fractal parameter</i> .....	115
<i>Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Соколовський М.В., Фролов М.О., Гринь А.П., Бондарєва С.В., Курило В.А., Бернацький А.В. Дослідження впливу параметрів лазерного зварювання на геометрію зварних з'єднань тонколистових корозійностійких сталей</i> .....	117
<i>Горбенко А.С., Перепічай А.О. Формування первинного шару сталевого порошку в технології TIG-PBF для адитивного виробництва</i> .....	118
<i>Опарін С.О. Лікування виразкових гастродуоденальних кровотеч з використанням високочастотного біологічного зварювального електро-гідроелектролігування</i> .....	119
<i>Березос В.О., Ахонін Д.С. Визначення характеру руху рідкого титану при електронно-променевому плавленні методами математичного моделювання</i> .....	122

**КОНФЕРЕНЦІЯ**  
**«ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ**  
**ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ»**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України  
27 листопада 2025 р.  
м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11, IV корпус ІЕЗ

**ПРОГРАМА РОБОТИ**

**27 листопада, четвер**

10:00 – 11:40	Пленарні доповіді
11:40 – 12:00	Перерва
12:00 – 14:40	Пленарні доповіді
11:40 – 15:30	Сесія стендових доповідей
12:00 – 15:00	Виставка обладнання та матеріалів для зварювання та неруйнівного контролю
15:30 – 18:00	Фуршет

Тривалість доповідей 20 хв (15 хв доповідь та 5 хв обговорення).

Робочі мови конференції: українська, англійська.

27 листопада 2025 р.

10-й поверх 4-го корпусу, зала вченої ради

### ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ

- 10:00 – 10:20 **Компоненти ГТД зі сплаву ВТ6: адитивне виготовлення та властивості**  
Матвійчук В.А.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*
- 10:20 – 10:40 **Xbeam 3d Metal Printing — нові дослідження, матеріали і технологічні рішення**  
Ковальчук Д.В.  
*ПРАТ «НВО «Червона хвиля», Київ*
- 10:40 – 11:00 **Матеріалознавчі проблеми дугового адитивного виробництва деталей зі сплаву Inconel 625**  
Яровицин О.<sup>1</sup>, Черв'яков М.<sup>1</sup>, Мотруніч С.<sup>1</sup>, Волосатов І.<sup>1</sup>, Звягінцева Г.<sup>1</sup>, Пестов В.<sup>1</sup>, Хрущов Г.<sup>1</sup>, Томко Д.<sup>2</sup>, Джуньвень Д.<sup>3</sup>  
*<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*  
*<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ*  
*<sup>3</sup>Мюнхенський технічний університет, Мюнхен, Німеччина*
- 11:00 – 11:20 **3D друк виробів із жароміцних сплавів адитивним плазмово-дуговим направленням: нові технологічні підходи та розробка обладнання**  
Коржик В.М., Ілляшенко Є.В., Чигілейчик С.Л., Торба Ю.І., Чечет О.В.  
*<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*  
*<sup>2</sup>Акціонерне товариство «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка, Запоріжжя*  
*<sup>3</sup>Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя*
- 11:20 – 11:40 **Розробка та дослідження робототехнічної системи для реалізації адитивної технології WAAM виготовлення бурового інструменту**  
Шаповалов Є.В., Долиненко В.В., Коляда В.О., Ващенко В.М., Новодранов А.С., Ващенко О.Ю., Мангольд А.М., Клішар Ф.С.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*
- 11:40 – 12:00 **Перерва**
- 12:00 – 12:20 **Застосування дугових плазмотронів з трубчастими мідними електродами для отримання дрібнодисперсних сферичних порошків металевих сплавів**  
Коржик В.М., Строгонов Д.В., Терещенко О.С.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*
- 12:20 – 12:40 **Оптимізація форми імпульсів струму за критерієм силової дії модульованого струму**  
Демченко В., Номіровський Д., Кривцун І.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

- 12:40 – 13:00 **Features of increasing penetration in high-frequency pulsed TIG welding of carbon and stainless steel (experimental studies)**  
Kovalenko D.<sup>1</sup>, Krivtsun I.<sup>1</sup>, Biber A.<sup>2</sup>, Mokrov O.<sup>2</sup>, Pavlov O.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*  
<sup>2</sup>*ISF – Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (Welding and Joining Institute), RWTH Aachen University, Aachen, Germany*
- 13:00 – 13:20 **Оцінка надійності зварних з'єднань паропроводів, довготривало працюючих в умовах повзучості**  
Дмитрик В.В., Касьяненко І.В., Чень Сінълей  
*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків*
- 13:20 – 13:40 **Технічна діагностика стану мостів на основі фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів**  
Лобанов Л., Стельмах Д., Дядін В., Савицький В.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*
- 13:40 – 14:00 **Чисельний аналіз експлуатаційної міцності зварних поглинаючих стрижнів системи управління та захисту енергетичного реактора ВВЕР-1000**  
Махненко О.В., Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Махненко О.О.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*
- 14:00 – 14:20 **Цифрові системи радіографічного контролю зварних швів**  
Павлій О.В.  
*ТОВ «НВФ «Діагностичні Прилади», Київ*
- 14:20 – 14:40 **Колаборативні роботи АОТАЙ — системне рішення кадрових криз, спричинених нестачею кваліфікованих робітників на промислових підприємствах**  
Юдін Ю.В.  
*Центр Зварювальних Технологій ТОВ «ВТЦ», Київ*

## Стендові доповіді

### 2-й поверх 4-го корпусу, бібліотека

11:40 – 15:30

#### **А-ТІГ зварювання титанового сплаву Ti-6Al-4V**

Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

#### **Електронно-променева плавка зливків-слябів із високоміцних сплавів титану**

Березос В.О., Єрохін О.Г., Липчанчук Є.І.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

#### **Застосування аргонодугового зварювання для титанових сплавів на основі інтерметалідів титану**

Білоус В.Ю., Ахонін С.В., Селін Р.В., Радченко Л.М.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Дослідження впливу процесів дифузії на питомий електричний опір графітованих гнотових електродів**

Богаченко О.Г., Гончаров І.О., Міщенко Д.Д., Нейло І.О.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Дослідження процесу підводного зварювання під флюсом та розробка складів порошкових паст**

Васильєв Д., Фадєєва Г., Радзиевська А., Полухін В., Чджун Цзицяо  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Ефективність підсилення ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки при встановленні зварної муфти та зварної накладної латки**

Ворона Г., Махненко О.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Термодеформаційні процеси та тріщиноутворення при електронно-променевому зварюванні монокристалів жароміцних нікелевих сплавів**

Гах І.С.<sup>1</sup>, Задерій Б.О.<sup>1</sup>, Звягінцева Г.В.<sup>1</sup>, Черв'яков М.О.<sup>1</sup>, Карасєвська О.П.<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*  
<sup>2</sup>*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ*

**Особливості моніторингу стану навантажених металоконструкцій методом тепловізійного контролю**

Глуховський В.Ю., Литвиненко В.А.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Functional silver and copper nanocoatings on medical implants deposited by the EB-PVD method**

Gornostai O.V., Khokhlov M.A., Stelmakh Y.A., Khokhlova J.A.  
*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv*

**Вплив текстури покриттів Co–Ni на рівень їх демпфуючої здатності**

Демченков С.О.<sup>1</sup>, Кулініч М.В.<sup>1</sup>, Клепко О.Ю.<sup>1</sup>, Поліщук С.С.<sup>2</sup>, Устінов А.І.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*  
<sup>2</sup>*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ*

**Електронно-променева технологія отримання композитних матеріалів системи Cu–Fe з високою ефективністю екранування електромагнітного випромінювання**

Демченков С.О., Устінов А.І., Мельниченко Т.В.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Енергоефективність і контроль енергетичних параметрів устаткування для дугового зварювання**

Драченко М.П.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Innovative fabrication of high entropy alloy Via Wire Arc Additive Manufacturing**

Ji Junwen<sup>1</sup>, Zavdoveev Anatoliy<sup>2</sup>, Kopylov Viacheslav<sup>1</sup>, Klapatyuk Andrej<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv*  
<sup>2</sup>*Department of Welding Production (WPP), E.O. Paton Institute of Materials Science and Welding, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*

**Технології стикового зварювання тиском через перехідний елемент**

Зяхор І.В., Левчук А.М., Шило Ю.А., Гуштин К.В., Завертанний М.С., В.В. Кольцов  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Біосумісні покриття з антибактеріальними властивостями, отримані методом мікроплазмового напилення**

Калужний С.М.<sup>1</sup>, Максимов С.Ю.<sup>1</sup>, Войнарович С.Г.<sup>1</sup>, Кислиця О.М.<sup>1</sup>, Теплюк В.М.<sup>1</sup>, Свірідова І.С.<sup>1</sup>, Ульянович Н.В.<sup>2</sup>, Коломієць В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ

**Особливості структурної будови нерознімних з'єднань надпружних нітинолових дротів, отриманих дуговим і конденсаторним зварюванням**

Квасницький В.В., Зворикіна А.К., Зворикін Л.О., Зворикін К.О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**Аналіз впливу GMAW-CMT/Pulse і PAW-CW способів WAAM наплавлення та складу захисного газового середовища на особливості структуроутворення та геометричні характеристики друкованих зварних виробів**

Квасницький В.В.<sup>1,2</sup>, Лагодзінський І.М.<sup>1,2</sup>, Чорний А.В.<sup>1</sup>, Черній В.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Інтелектуальна платформа моніторингу технічного стану мостів на основі цифрових двійників і моделей штучного інтелекту**

Книш В.В., Мірянін В.М., Мальгін М.Г., Кот В.Г., Кадишев А.А.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Підвищення залишкової довговічності стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД, зміцнених комбінованою обробкою високочастотним проковуванням з механічним легуванням ультрадисперсним нікелем**

Книш В.В., Ткач П.М., Мальгін М.Г., Кот В.Г., Кадишев А.А.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**A-TIG welding of stainless steel up to 12 mm thick with full penetration**

Kovalenko Dmytro

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

**Відновлення зношених деталей машин імпортного виробництва електрошлаковим наплавленням плавким мундштуком**

Козулін С.М., Міщенко Р.М.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Виявлення та оцінювання корозійних пошкоджень наводнювання в обертових механізмах із використанням пнвп-методів обробки вібраційних сигналів**

Комарницький Б.Р.<sup>1</sup>, Личак О.В.<sup>1</sup>, Юзефович Р.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів

**Автономні зварювальні комплекси на основі сучасних накопичувачів енергії**

Коротинський О.Є., Жерносеков А.М., Скопюк М.І., Вертецька І.В.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Переробка лому та відходів нікелевих сплавів методом електрошлакового переплаву**

Костецький Ю.В., Педченко Є.О., Полішко Г.О., Зайцев В.А., Петренко В.Л., Трикозенко Д.І.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Досвід застосування електродугової металізації (ЕДМ) при відновленні та зміцненні поверхні деталі**

Крилов С.В.<sup>1</sup>, Лаврик В.П.<sup>2</sup>, Суглобов В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТЦ «Промавтосварка», Київ

<sup>2</sup>ДВНЗ «ПДТУ», Дніпро

**Результати математичного моделювання процесів тепло- та масоперенесення електронно-променевого плавлення мідних зливків**

Кривцун І.В., Ахонін С.В., Римар С.В., Губатюк Р.С., Березос В.В., Хомутський С.В.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Моделювання процесу термічного оброблення зварних стиків рейок трамвайних колій**

Кривцун І.В., Губатюк Р.С., Римар С.В., Пантелеймонов Є.О., Прокоф'єв О.С., Абдулах В.М.,

Костін В.А., Григоренко С.Г., Жуков В.В., Гончаров І.О., Кузьменко Г.В.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Електричні та енергетичні характеристики дуги з тугоплавким катодом**

Кривцун І., Демченко В., Крикент І.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Дослідне устаткування для автоматичного дугового зварювання плавким мундштуком металу завтовшки до 60 мм конструкцій із високоміцних сталей**

Кузьменко Г.В., Гончаров І.О., Тагановський В.М.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Структурні параметри та механічні характеристики металу зварних з'єднань сталі спеціального призначення після впливу циклічного навантаження**

Кушнар'єва О.С., Берднікова О.М., Алексеєнко Т.О., Григоренко С.Г., Позняков В.Д.,

Гайворонський О.А., Завдовєєв А.В., Гончаренко О.І.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Особливості структури поверхневих шарів інструментальної сталі після імпульсно-плазмової обробки**

Кушнар'єва О.С., Берднікова О.М., Колісниченко О.В., Алексеєнко І.І., Тітков Є.П., Андрійчук Є.Б.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Застосування гібридних інформаційно-обчислювальних систем та глибокого навчання для проактивного контролю якості у 3D адитивних технологіях**

Лисенко О.М.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Fractal parameterisation of welded joint zones**

Markovska Sofiia<sup>1</sup>, Shtofel Olha<sup>1,2</sup>, Holovko Viktor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv

**Plastic flow of multilayer Ni/Al foils at heating under load and its effect on the diffusion bonding of difficult-to-deform materials**

Melnychenko T.V., Ustinov A.I.

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

**Застосування ТІГ зварювання-паяння для художніх виробів**

Мінаков С.М.<sup>1</sup>, Чвортко Є.П.<sup>1</sup>, Стреленко Н.М.<sup>1</sup>, Мінаков А.С.<sup>1</sup>, Степанов Д.В.<sup>1</sup>, Вдовиченко І.М.<sup>2</sup>,

Вдовиченко Д.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського», Київ

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Застосування методу еквівалентної густини енергії деформації (ESED) для визначення напружень за межами пружності в зонах концентрації з урахуванням залишкових зварювальних напружень**

Молтасов А.В.<sup>1</sup>, Каток О.А.<sup>2</sup>, Томко Д.С.<sup>3</sup>, Ткач П.М.<sup>1</sup>, Димань М.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

<sup>2</sup>Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ

<sup>3</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**Дослідження причин і місця ймовірного розташування пор у напаяному шарі заготовок з латунною основою**

Несін В.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, Київ

**Improvement of the technology of welding of high-strength steels with controlled transfer (AHSS) processes based on the analysis of thermal affected zone modeling**

Nosov D.G., Peremitko V.V., Shevtsov V.B., Makarenko M.V.

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

**Використання властивостей аналітичної функції біперіодично нестационарно випадкового процесу для вібраційного моніторингу**

Пелипець Р.І.<sup>1</sup>, Юзефович Р.М.<sup>1,2</sup>, Яворський І.М.<sup>2,3</sup>, Личак О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>3</sup>Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

**Вплив додавання фторвмісного полімеру до шихти порошкового дроту на властивості наплавлених шарів**

Перемітько В.В.<sup>1</sup>, Євдокимов А.В.<sup>2</sup>, Голякевич А.А.<sup>3</sup>, Сухомлин В.І.<sup>1</sup>, Сергєєв М.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське

<sup>2</sup>ТОВ «СТІЛ ВОРК», Кривий Ріг

<sup>3</sup>ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК», Київ

**Удосконалений пристрій для наплавлення тонкостінних деталей**

Перемітько В., Коломоєць І., Чумак М.

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське

**Features of wear and restoration of worm screw segments in a bead mill**

Peremitko V.V., Plitchenko S.O., Gerasimov V.V., Yermak D.A., Ocheretko O.S.

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

**Діагностування технічного стану, ремонт і відновлення зварних резервуарів**

Посипайко Ю.М.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Особливості структуроутворення у металі зварних з'єднань, виконаних під водою з використанням зовнішнього електромагнітного впливу**

Прилипко О. О., Максимов С. Ю., Берднікова О.М., Ромашко Д.В.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Розробка гібридної технології зварювання біологічних тканин на експериментальному стенді**

Романенко О.В., Лопаткіна К.Г., Грабовський С.Д., Васильченко В.А., Ткаченко В.А., Чвертко Н.А.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Огляд досліджень гібридного зварювання сухожилків**

Романенко О.В., Лопаткіна К.Г., Ткаченко В.А., Чвертко Н.А.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Високочастотний електрохірургічний мобільний автономний генератор МАВ-200.**

**Розробка та можливості**

Романенко О.В., Ткаченко С.В., Грабовський С.Д., Самойлова Т.Г., Бісько В.О., Чвертко Н.А.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Етапи вдосконалення технічних засобів керування струмом електродугового зварювання**

Семікин В.Ф., Ланкін Ю.М., Романова І.Ю., Байштрук Є.М.  
*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Моделювання залишкових напружень і дисторсії при наплавленні трубчастих елементів**

Сенченков І.К.<sup>1</sup>, Рябцев І.О.<sup>2</sup>, Червінко О.П.<sup>1</sup>, Доля О.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ*

<sup>2</sup>*ІЕЗ ім. О.Є. Патона НАН України, Київ*

<sup>3</sup>*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ*

**Розрахунок залишкового НДС при нарощуванні циліндричних тіл із в'язкопластичних матеріалів**

Сенченков І.К.<sup>1</sup>, Юрженко М.В.<sup>2</sup>, Червінко О.П.<sup>1</sup>, Усов В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ*

<sup>2</sup>*ІЕЗ ім. О.Є. Патона НАН України, Київ*

**Застосування високочастотної механічної проковки та механічного легування ультрадисперсним нікелем з метою підвищення опору корозійній втомі стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД**

Соловей С.О., Мордюк Б.М., Мірянін В.М., Булаш В.М., Ткач І.Г.

*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Paton International — evolutions in years**

Stepakhno A.V.

*LLC «Paton International», Kyiv*

**Restoration of XM-25 turbine blades via ded laser cladding: microstructural evolution and mechanical performance**

Tiancheng An, Berdnikova Olena

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

**Ретроспективний погляд на розвиток дефектів у зварних з'єднаннях аустенітної сталі Чорнобильської АЕС**

Тороп В.М., Рабкіна М.Д., Давидов Є.О.

*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Рентгенотелевізійний контроль титанових суглобних імплантатів**

Троїцький В.О., Михайлов С.Р., Пастовенський Р.О., Карманов М.М.

*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Відхилення характерних частот прояву дефектів підшипників як додатковий індикатор їх стану**

Трохим Г.Р.<sup>1</sup>, Черчик Г.Т.<sup>1</sup>, Шарамага Р.В.<sup>1</sup>, Яворський І.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів*

<sup>2</sup>*Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща*

**Дослідження імовірнісних характеристик вібраційних сигналів з використанням ПНВП-моделей**

Хміль Р.І.<sup>1,2</sup>, Юзефович Р.М.<sup>1,2</sup>, Яворський І.М.<sup>1,3</sup>, Личак О.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів

<sup>3</sup>Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

**Порівняльний аналіз мікроструктури та механічних властивостей наплавленого металу жароміцних сплавів Renè 80 та ЖС6К**

Черв'яков М., Яровицин О., Стрежнев Д., Волосатов І., Хрущов Г.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**Електрошлаковий переплавлення відходів високореакційних і прецизійних металів і сплавів**

Шаповалов В.О., Протоковілов І.В., Порохонько В.Б., Петров Д.А.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

**New capabilities of calculation methods for analyzing the weld metal structure orientation**

Shtofel O.<sup>1,2</sup>, Holovko V.<sup>1</sup>, Korolenko D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

**Analysis of a defective structure using a fractal parameter**

Shtofel O.<sup>1,2</sup>, Rabkina M.<sup>1</sup>, Chyzhska T.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

**Дослідження впливу параметрів лазерного зварювання на геометрію зварних з'єднань тонколистових корозійностійких сталей**

Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Соколовський М.В., Фролов М.О., Гринь А.П., Бондарева С.В., Курило В.А., Бернацький А.В.

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

**Формування первинного шару сталевого порошку в технології TIG-PBF для адитивного виробництва**

Горбенко А.С., Перепічай А.О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**Лікування виразкових гастродуоденальних кровотеч з використанням високочастотного біологічного зварювального електро-гідроелектролігування**

Опарін С.О.

Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика

**Визначення характеру руху рідкого титану при електронно-променевому плавленні методами математичного моделювання**

Березос В.О., Ахонін Д.С.

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

## **УЧАСНИКИ ВИСТАВКИ**

**«Обладнання та матеріали для зварювання та неруйнівного контролю»**

4-й корпус, 10-й поверх, зала вченої ради

27 листопада з 12:00 до 15:00

ТОВ «Патон Інтернешнл», ТОВ «Ультракон сервіс», ТОВ «Червона Хвиля»,  
НТЦ «Промавтосварка», НВФ «Діагностичні прилади», ТОВ «Велтек»

## **ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ**

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»

*Олександр Зельніченко*

тел./факс: (38044) 205-23-90

E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua);

*Ірина Романова*

тел.: (38044) 205-22-26

E-mail: [romanova@paton.kiev.ua](mailto:romanova@paton.kiev.ua)

<http://ip.if.ua/ukr/WRT-2025>

## ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ

### ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ ІМПУЛЬСІВ СТРУМУ ЗА КРИТЕРІЄМ СИЛОВОЇ ДІЇ МОДУЛЬОВАНОГО СТРУМУ

**Демченко В., Номіровський Д., Кривцун І.**

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

Експериментальними дослідженнями встановлено, що високочастотна модуляція зварювального струму дозволяє збільшити проплавну здатність процесу зварювання з тугоплавким катодом. Цей ефект пояснюється інтенсифікацією конвективних потоків у зварювальній ванні, які збуджуються силовою дією високочастотного електромагнітного поля. У статті розглядається проблема визначення форми та параметрів імпульсів зварювального струму, які забезпечують максимальну силову дію модульованого струму на метал зварювальної ванни. В якості інтегральної міри силового впливу електромагнітного поля на розплавлений метал зварювальної ванни приймається квадрат ефективного значення зварювального струму. Різниця квадратів ефективного та середнього значень модульованого струму, яка характеризує перевищення силової дії дуги з імпульсною модуляцією струму над силовою дією дуги постійного струму, приймається як критерій оптимізації форми імпульсу струму. Розв'язується задача варіаційного числення про знаходження такої форми імпульсів струму, за якої досягається максимум зазначеної різниці. Розглядаються два способи оптимізації:

- при заданій амплітуді модуляції;
- при заданому середньому значенні модульованого струму. Математично строго показано, що в першому випадку оптимальною формою імпульсу є меандр, у другому випадку — прямокутний імпульс струму, шпаруватість і амплітуда якого визначаються величиною максимального струму зварювального генератора. Проведено оптимізацію параметрів імпульсів струму трапецеїдальної та трикутної форм, які генеруються існуючими генераторами зварювального струму. Запропонована теорія слугує орієнтиром для розробки ефективних генераторів імпульсного струму та проєктування режимів ВЧІ ТІГ процесу з метою збільшення глибини проплавлення та підвищення продуктивності зварювання.

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОПРОВОДІВ, ДОВГОТРИВАЛО ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ПОВЗУЧОСТІ

Дмитрик В.В., Касьяненко І.В., Чень Сінлей

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Значна кількість енергетичного обладнання ТЕС України, у т.ч. паропроводи та їхні зварні з'єднання відпрацювали в умовах повзучості та втоми понад 280 тис. год. Саме паропроводи та зварні з'єднання елементів їхніх систем є одними із найбільш відповідальних складових теплових станцій. Визначення надійності їхньої роботи, а також залишкового ресурсу паропроводів, особливо тих, що працюють при підвищених робочих параметрах (тиск 25,5 МПа, температура 545...565 °С), набуло виняткової актуальності. Такі паропроводи виготовляють зі сталей 15X1M1Ф і 12X1MФ.

Зварні з'єднання паропроводів і елементів їхніх систем відрізняються від основного металу паропроводів наявністю структурної, хімічної і механічної неоднорідності. І тому їхня пошкоджуваність і руйнування відбуваються значно частіше, ніж основного металу паропроводів, який не зазнав зварювального нагрівання.

Проблему визначення надійності та залишкового ресурсу зварних з'єднань паропроводів слід вирішувати з урахуванням їхнього структурно-фазового стану, а також рівня їхньої пошкоджуваності. Таким чином, для вирішення даної проблеми доцільно вирішувати наступні задачі: 1. Проаналізувати стан металу кожного зварного з'єднання. 2. Першочергово аналізу необхідно піддавати структурно-фазовий стан тих зварних з'єднань, які підлягають найбільшим робочим напруженням і температурам. 3. За результатами аналізу необхідно скласти конкретні характеристики, що визначають надійність експлуатації зварних з'єднань і їхній залишковий ресурс. Відповідно слід обґрунтувати головні критерії, які визначають структурно-фазовий стан металу зварних з'єднань і рівень їхньої пошкоджуваності. Для такого визначення необхідно досліджувати фізико-хімічні процеси, що проходять у металі зварних з'єднань, які довготривало працюють в умовах повзучості та втоми. Уточнення оцінки надійності та ресурсу доцільно обґрунтувати доповненням відповідних положень нормативної документації.

Вихідна структурна та хімічна неоднорідність зварних з'єднань сприяє інтенсивному проходженню фізико-хімічних процесів на ділянках їхньої зони термічного впливу (ЗТВ), а також у металі шва. Такі процеси містять: переміщення дислокацій за механізмами ковзання та переповзання; самодифузю легуючих елементів хрому, молібдену та ванадію; коагуляцію карбідів  $M_{23}C_6$ ; карбідні реакції  $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$ ; повернення та рекристалізацію; утворення вакансій, їхнє злиття та формування мікронесуцільностей, злиття мікронесуцільностей і утворення зародкових мікропор повзучості; перетворення мікропор повзучості у мікротріщини повзучості. Проходженню наведених процесів сприяє утворення нової структурної складової — ферито-карбідної суміші. Наявність такої суміші викликає зменшення фізико-механічних властивостей металу зварних з'єднань, зокрема твердості на 15...20 %.

Наявність у структурі ділянки неповної перекристалізації ЗТВ нових продуктів розпаду аустеніту у вигляді глобуляризованого перліту прискорює утворення ферито-карбідної суміші. Водночас наявність троститу та сорбіту зумовлює уповільнення її утворення (рис. 1).

Таким чином, доцільно отримувати у вихідній структурі ділянки неповної перекристалізації ЗТВ нові продукти розпаду аустеніту у вигляді глобуляризованого троститу або сорбіту. Присутність таких структур значно уповільнює утворення ферито-карбідної суміші. Особливо це помітно у тих зварних з'єднаннях, напра-

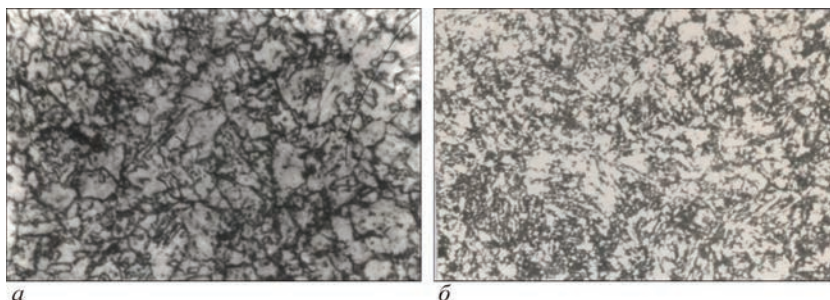


Рис. 1. Мікроструктура ділянки неповної перекристалізації ЗТВ зварного з'єднання зі сталі 15X1M1Ф. Ресурс 276 тис. год: *a* — нові продукти розпаду аустеніту у вихідній структурі представляють перліт; *б* — сорбіт ( $\times 360$ )

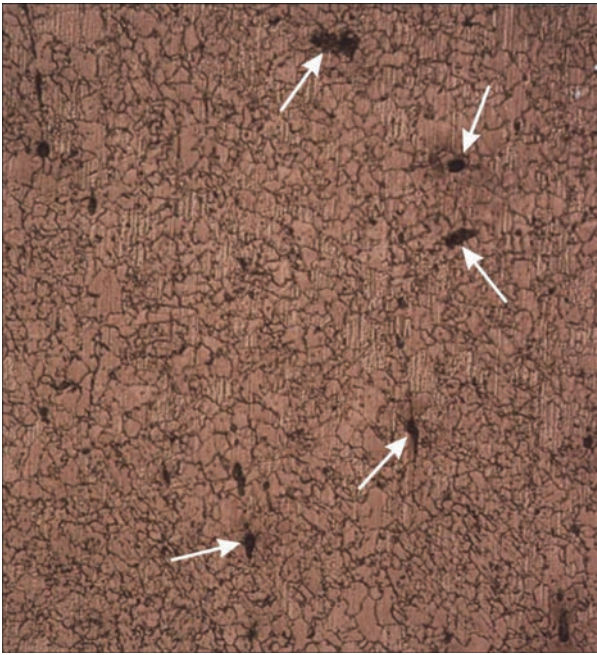


Рис. 2. Мікроструктура металу шва (сплав 10ХМФ) зварного з'єднання зі сталі 12Х1МФ з порами (стрілки). Ресурс 280 тис. год

цювання яких є більшим за 280 тис. год. Зауважимо, що нові продуктів розпаду аустеніту (перліт, тростит і сорбіт відповідно) набувають глобуляризовану форму після відпуску зварних з'єднань ( $T_{\text{відп}} = 730 \dots 750 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{відп}} = 3 \dots 5 \text{ год}$ ).

При напрацюванні зварних з'єднань паропроводів гострої пари в умовах повзучості від 200 до 250 тис. год (приблизно), що відповідає другій стадії повзучості, деформація їхнього металу переважно є незначною та на ділянках ЗТВ складає 0,4...0,7 %. Відповідно деформація основного металу з вихідною ферито-сорбітною структурою (сталь 12Х1МФ) складає 0,2...0,3 %.

Встановили, що при деформації металу зварних з'єднань зі сталей 12Х1МФ і 15Х1М1Ф, яка складає 0,2...0,4 %, утворюються пори розміром 0,01...0,3 мкм, які виявляються при використанні електронної мікроскопії. При деформації 0,5...1,0 % утворюються пори, які виявляються за допомогою оптичної мікроскопії (рис. 2).

Встановили, що при деформації металу зварних з'єднань зі сталей понад 2 % мікропори на границях зерен зливаються в ланцюжки (рис. 3), які, в свою чергу, перетворюються у мікротріщини.

Важливим є визначення рівня деформації у основному металі паропроводів. Виявили, що при деформації основного металу паропроводів, яка складає 0,5...0,7 %, деформація ділянок ЗТВ їхніх зварних з'єднань збільшується до 0,8...4,0 %. Доцільно в деформованому металі зварних з'єднань виявляти наявність пор, а також присутність у їхній структурі ферито-карбідної суміші. Встановили, що при наявності ферито-карбідної суміші, яка в металі зварних з'єднань є більшою за 20 %, такі зварні з'єднання потрібно замінювати на нові. Пори розміром 0,9...1,4 мкм, що знаходяться на границях зерен  $\alpha$ -фази, у місцях їхнього контакту з коагулюючими виділеннями других фаз, шляхом відновлювальної термічної обробки не ліквідовуються.

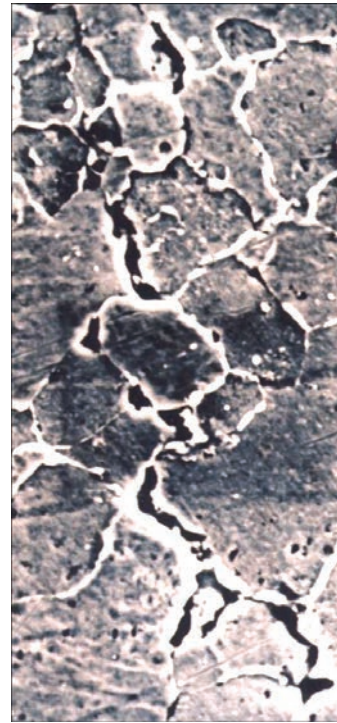


Рис. 3. Утворення пор у зварному з'єднанні зі сталі 12Х1МФ на стадії їхнього об'єднання в тріщину ( $\times 2500$ ) [1]

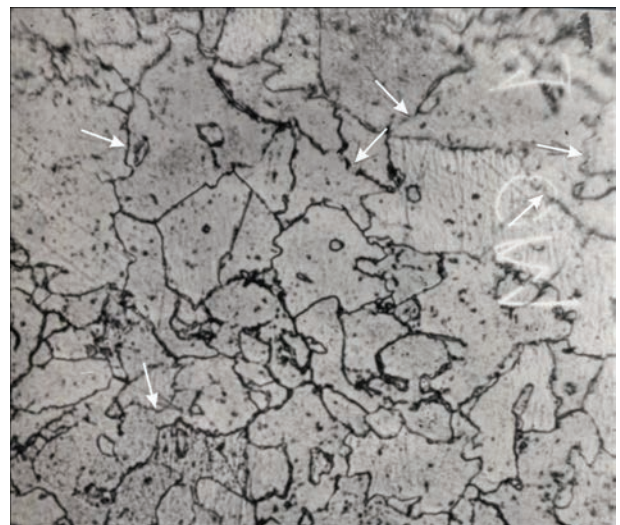


Рис. 4. Мікроструктура ділянки перегріву ЗТВ зварного з'єднання зі сталі 12Х1МФ. Стрілки вказують на границі, що знаходяться на стадії усунення. Ресурс 292 тис. год

При довготривалому напрацюванні зварних з'єднань в умовах повзучості в структурі їхнього металу внаслідок рекристалізації відбувається усунення окремих границь між зернами (рис. 4).

Усунення окремих границь між зернами сприяє утворенню пор, а також збільшенню тих пор, які утворилися раніше. Встановили, що наявність ферито-карбідної суміші в структурі зварних з'єднань, що складає 8...12 %, стосовно їхнього напрацювання понад 280 тис. год, забезпечує зниження механічних властивостей на 10...15 %.

#### **Висновки**

1. Встановили, що наявність у структурі металу зварних з'єднань зі сталей 12X1MФ і 15X1M1Ф ферито-карбідної суміші прискорює їхню пошкоджуваність, особливо при їхньому напрацюванні понад 280 тис. год.

2. Для визначення надійності роботи зварних з'єднань і їхнього залишкового ресурсу доцільно розробити шкалу, яка б ураховувала залежність пошкоджуваності зварних з'єднань від присутності в їхній структурі ферито-карбідної суміші.

3. Є доцільним доповнення нормативних положень щодо структурно-фазових перетворень у металі зварних з'єднань, які довготривало працюють в умовах повзучості.

1. Дмитрик В.В., Глушко А.В., Григоренко С.Г. (2016) Особенности порообразования в сварных соединениях паропроводов в условиях длительной эксплуатации. *Автоматическая сварка*, **9**, 56–60.

## FEATURES OF INCREASING PENETRATION IN HIGH-FREQUENCY PULSED TIG WELDING OF CARBON AND STAINLESS STEEL (EXPERIMENTAL STUDIES)

**Kovalenko Dmytro<sup>1</sup>, Krivtsun Igor<sup>1</sup>, Biber Alexander<sup>2</sup>, Mokrov Oleg<sup>2</sup>, Pavlov Oleksii<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*ISF – Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (Welding and Joining Institute),  
RWTH Aachen University, Aachen, Germany*

The TIG welding process using high-frequency modulation of the welding current is one of the methods for controlling and increasing the penetration of the weld metal.

The description of the developed at PWI module of high-frequency modulation of welding current as applied to TIG welding is presented. The module provides independent regulation of the current pulse frequency  $f$  in the range of 4–12 kHz, the duty cycle  $D = t_p/T$  in the range of 0.3–0.7, the maximum pulse current  $I_p$  and mean current  $I_{\text{mean}}$  to values lying in the range of 100–290 A and 50–150 A, respectively.

The methodology and results of experimental studies of the characteristics of high-frequency pulsed TIG welding of carbon (S235 in 10 mm thick) and stainless (1.4301/AISI 304 in 5, 6 and 8 mm thick) steels are presented.

It is shown that no influence of material and welding frequency on current rising speed visible. Current drop speed for all frequencies identical (function of the current). As the welding frequency increases, the pulse shape changes from trapezoidal to triangular. The module that stores and releases electrical energy, acting like a capacitor.

It has been established that the penetration depth depends on the current pulse frequency. In this case, regardless of the type and thickness of the steel, the maximum penetration depth is achieved at a frequency of 6 kHz, which corresponds to an increase in the penetration depth compared to DC welding of up to 40 % for stainless steel in 5 mm thick.

**3D-ДРУК ВИРОБІВ ІЗ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ  
АДИТИВНИМ ПЛАЗМОВО-ДУГОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ:  
НОВІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ТА РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ  
В.М. Коржик<sup>1</sup>, Є.В. Ілляшенко<sup>1</sup>, С.Л. Чигілейчик<sup>2</sup>, Ю.І. Торба<sup>2</sup>, О.В. Чечет<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

<sup>2</sup>*Акціонерне товариство «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес»  
імені академіка О.Г. Івченка, Запоріжжя*

<sup>3</sup>*Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя*

Зростаюче в останні роки застосування в авіаційній промисловості технологій 3D-друку виробів із жароміцних сплавів зумовлено його потенціалом для зниження витрат на матеріали та обробку. У той же час 3D-друк забезпечує можливість виробництва деталей зі складною внутрішньою геометрією. Адитивне плазмово-дугове наплавлення з використанням дроту та порошкових матеріалів є перспективним процесом 3D-друку, який поєднує продуктивність процесів дугового наплавлення з точністю формування, що наближається до променевих процесів. Для впровадження в серійне виробництво адитивних технологій головною умовою є забезпечення рівня фізико-механічних і експлуатаційних властивостей друкованих виробів, що не поступаються заготовкам, отриманим методами лиття та кування. Тому в цій роботі аналізується сучасний стан наукових досліджень плазмово-дугового адитивного наплавлення виробів із жароміцних сплавів та обладнання для його реалізації.

Прагнення підвищити жароміцність складно-легованих гомогенних і дисперсійно-твердіючих сплавів, із яких виготовляють відповідальні деталі гарячого тракту газотурбінних двигунів (складальні одиниці статора, жарові труби, камери згоряння, сопла, екрани, кожухи, диски тощо), призводить до зниження параметрів зварюваності. Тобто зменшується опірність матеріалу до тріщиноутворення при 3D-друку, зварюванні та подальшій термічній обробці.

У зв'язку з цими факторами наявні широко розповсюджені технології дугового та променевого 3D-друку в багатьох випадках не забезпечують вимог до якості, в першу чергу до опору утворенню гарячих тріщин та інших дефектів. Особливо це актуально для випадку застосування нових типів сплавів з більш високими температурами експлуатації. Традиційні підходи до вирішення даної проблеми полягають у введенні різноманітних модифікаторів через присаджувальний дріт, застосування супутнього чи попереднього підігріву, термічної обробки, що суттєво ускладнює технологічний процес і може призводити до зниження корозійної стійкості чи механічних властивостей виробів.

Інноваційні рішення полягають у створенні нових процесів плазмово-дугового 3D-друку із системами електромагнітних впливів на дугу та керування координатами та частотними характеристиками переміщення дуги. Це дозволяє гомогенізувати хімічний склад і вирівнювати температуру зварювальної ванни по її об'єму та здійснювати її дегазацію, що, в свою чергу, забезпечує формування більш дрібнодисперсної структури наплавленого металу, зменшення залишкових напружень, зменшення або повне усунення таких дефектів, як пори, тріщини тощо. Наприклад, при зварюванні деталей гарячого тракту авіаційних реактивних двигунів із жароміцного залізохромонікелевого сплаву сталі ЭП718 стійкість до утворення гарячих тріщин підвищується у 4 рази і більше.

Розроблено технологію та обладнання для роботизованого 3D-друку заготовок об'ємних деталей із жароміцних сплавів (діаметром 50...1500 мм) конструкції складного профілю. Припуск на фінішну механічну обробку заготовок не перевищує 1,5...3 мм. У процесі 3D-друку плазмове обладнання реалізує можливість одночасної подачі різних типів присадних матеріалів: від 1-го до 3-х дротів, від 1-го до кількох порошків, або дроту та порошку. Це дозволяє здійснювати локальне або об'ємне легування матеріалу металу виробу, виконувати 3D-друк одночасно із синтезом нових сплавів, виготовляти деталі із нових матеріалів (металокерамичні композити та градієнтні металоматричні матеріали з мінного хімічного складу). Наприклад, технологія дозволяє отримувати об'ємні вироби, в яких матрицею є сплав з армуючими сферичними частинками карбїду вольфраму та реалізує можливість змінювати по об'єму (висоті деталі) вміст карбїду вольфраму від 0 до 50 об. % і, відповідно, регулювати твердість до HRC 56...66 і вище в напрямку до поверхневих шарів.

У порівнянні зі зразками, отриманими адитивним наплавленням дроту ER410NiMo методом WAAM (CMT), плазмова технологія забезпечує в середньому до 10 % підвищення значень границі міцності та границі плинності. Механічні випробування матеріалів деталей із жароміцних сплавів (наприклад із залізного ER410NiMo та нікелевого EI868), які отримані 3D-друком за даною технологією, з подальшою термічною оброб-

кою, підтвердили, що за фізико-механічними характеристикам вони знаходяться на рівні значень поковок і відповідають вимогам технічної документації для виготовлення статорних деталей газотурбінних двигунів. У співпраці ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України та ТОВ «НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР «ПЛАЗЕР» організовано випуск обладнання для плазмового-дугового адитивного наплавлення за Технічними Умовами ТУ У 27.9-38388946-001:2025 та проведено сертифікацію, в Україні установки плазмово-дугового зварювання та адитивного наплавлення (3D-друку) PLAZER-300 EMF.

## ЗАСТОСУВАННЯ ДУГОВИХ ПЛАЗМОТРОНІВ З ТРУБЧАСТИМИ МІДНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СФЕРИЧНИХ ПОРОШКІВ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ

**Коржик В.М., Строгонов Д.В., Терещенко О.С.**

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

На сьогодні в сучасних виробничих процесах, у першу чергу в авіаційній, аерокосмічній, оборонній галузях спостерігається безперервне впровадження адитивних технологій друку металом, для яких ключовим є використання сферичних порошкових матеріалів у якості сировини. Особливий інтерес у виробництві частин спецтехніки 3D друком становлять порошки титанових і жароміцних сплавів. Вимогами до таких порошків є: розмір частинок, коефіцієнт сферичності, відсутність внутрішньої пористості, мінімальна частка сателітів і частинок неправильної форми. Так, наприклад, для найбільш поширених методів 3D друку, як Selective Laser Melting/Sintering, вимоги до розмірів частинок становлять 15...53 мкм, сферичність — не гірше 0,9, частка сателітів — <1...2 %.

На противагу традиційним промисловим технологіям отримання порошків газовим розпиленням (EIGA, VIGA), що має недоліки у вигляді формування пустотілих частинок з поверхневими дефектами, у даний час набуває все більшого поширення технологія PA (Plasma Atomization) — плазово-дугове розпилення дротяних матеріалів введенням «нейтрального» дроту в плазовий струмінь. Порошок, отриманий з використанням даної технології, має досить високий ступінь сферичності (> 0,85), мінімальну частку сателітних частинок, в ньому відсутня газова (аргонова) паристість. Недоліками є: низька продуктивність (зазвичай не перевищує 2,5 кг/год), відносно невеликий вихід дрібнодисперсної фракції порошку (наприклад, кількість порошків з розміром менше 63 мкм — не вище 50 мас. %). Для вирішення зазначених недоліків, було запропоновано подальший розвиток технології з розробкою дугових плазмотронів з трубчастими електродами та використанням схеми з струмопровідним дротом на зворотній полярності. Зазначена схема допомагає збільшити продуктивність процесу до 4...12 кг/год за рахунок додаткового нагріву торця дроту прямою електричною дугою. При цьому спеціальна конструкція плазмотрона дозволяє досягати надзвукової швидкості плазового струменя інтервалі 1,5...2,5 числа Маха, що сприяє ефективному диспергуванню струменя розплаву та інтенсифікації вторинного дроблення його крапель з відповідним підвищенням вмісту дрібнодисперсних фракцій порошку до 70...80 %.

Окремим застосуванням енергії плазової дуги є сфероїдизація порошків нерегулярної форми шляхом їх пропускання через плазово-дуговий розряд, під час чого відбувається оплавлення поверхні частинок. Для реалізації процесу сфероїдизації з використанням плазмотронів на зворотній полярності було розроблено виносний електрод спеціальної конструкції, змонтований на двоосьовому маніпуляторі для регулювання відстані між торцем електрода та соплом у координатах  $x$  та  $z$ . Це дозволяє регулювати довжину дуги та от-

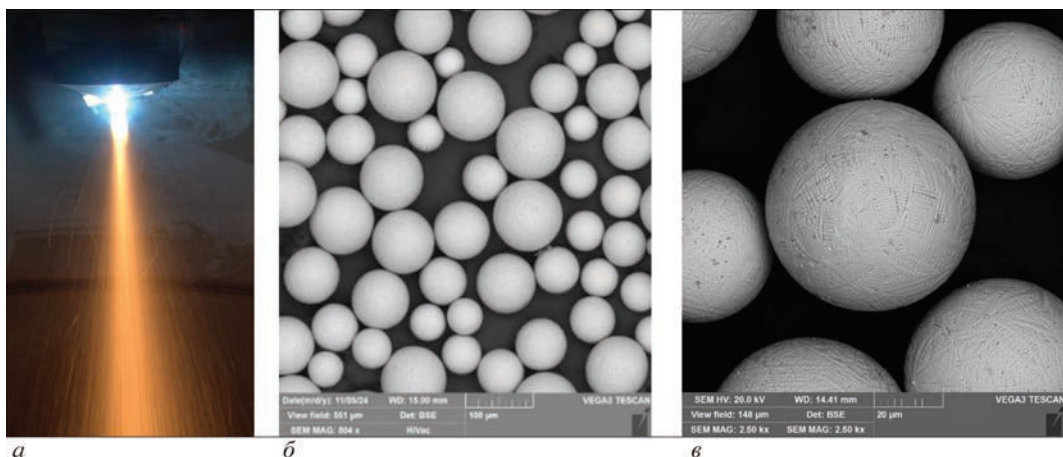


Рис. 1. Зовнішній вигляд процесу плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту з використанням плазмотрона з мідними трубчастими електродами (а), зовнішній вигляд порошку титанового сплаву Ti6–Al4–V (б) та нікелевого жароміцного сплаву Inconel 625 (в) фракції 15...53 мкм

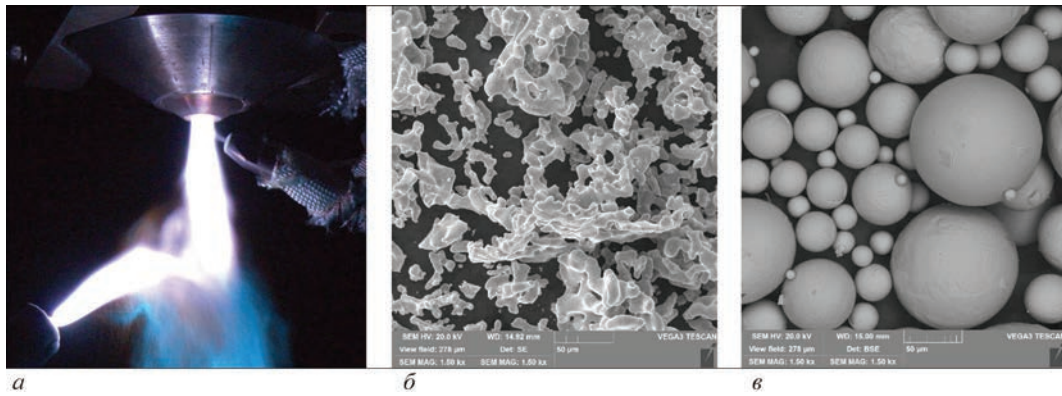


Рис. 2. Зовнішній вигляд процесу плазмової сфероїдизації на повітрі (а), зовнішній вигляд порошку титану марки ПТМ-1 до обробки (б) та після сфероїдизації (в)

римувати високоентальпійний плазмовий струмінь з довжиною до 250 мм і великим перерізом та збільшити загальну потужність дуги в 3–4 рази при збільшенні відстані між катодом і соплом. Об'єм плазмового струменя при цьому збільшується багаторазово, що призводить до підвищення продуктивності, коефіцієнта корисної дії та можливості сфероїдувати порошки крупних фракцій (до 160 мкм). При цьому гнучке регулювання потужності плазми дозволяє оплавляти частинки не тільки поверхнево, а й повністю розплавляти з наступним диспергуванням краплі, що сприяє отриманню дрібніших порошоків.

Крім використання в адитивних технологіях, порошки титанових і жароміцних сплавів, отримані плазмово-дуговим розпиленням та сфероїдизацією фракцій 15...53 мкм, мають перспективи застосування в технологіях отримання покриттів такими методами як HVOF (High velocity oxygen fuel), Cold Spray, а крупніші порошки класу 40...80 мкм можуть бути використані для плазмового напилення захисних покриттів.

Таким чином показано, що як плазмово-дугове розпилення, так і плазмова сфероїдизація є високоефективними та перспективними методами для отримання сферичних порошоків титанових і нікелевих жароміцних сплавів, що відповідають вимогам щодо сировинних матеріалів для 3D друку та технологій напилення покриттів.

## **ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА СТАНУ МОСТІВ НА ОСНОВІ ФОТОГРАММЕТРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

**Лобанов Л., Стельмах Д., Дядін В., Савицький В.**

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

В умовах інтенсивного розвитку та експлуатації транспортної інфраструктури України питання надійності та безпеки мостових споруд набуває особливого значення. Значна частина мостів має вичерпаний ресурс та потребує регулярного технічного обстеження. Однак традиційні методи діагностики часто є трудомісткими, коштовними та потенційно небезпечними для виконавців. У цьому контексті застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у поєднанні з методами фотограмметрії відкриває додаткові можливості для дистанційного моніторингу технічного стану мостів.

У роботі представлено інноваційний підхід до діагностики мостів із використанням БПЛА серії DJI Mavic 3 Enterprise з модулем RTK (Real-Time Kinematic), що забезпечує високоточне позиціонування та стабільність геометричних вимірювань. За допомогою аерофотозйомки створюються детальні тривимірні моделі мостових конструкцій, які дозволяють виявляти деформації, тріщини, корозійні пошкодження та інші дефекти без необхідності зупинки руху транспорту або встановлення спеціальних риштувань.

Методика містить етапи: планування польоту, збору фотограмметричних даних, побудови щільних хмар точок і подальшої аналітичної обробки моделей. Отримані результати дозволяють здійснювати як візуальну оцінку стану елементів, так і кількісні вимірювання геометричних параметрів. Такий підхід забезпечує підвищення ефективності технічного обстеження, скорочення часу та витрат, а також покращення безпеки персоналу.

Практичне впровадження методу відбулося під час обстеження металеві частини мосту через р. Смотрич «Лань, що біжить» на 288 + 352 км автодороги загального користування державного значення Н-03 Житомир-Чернівці. Виявлено дефекти типу корозія та підрип повздожніх опорних балок у металевій частині мосту, та завдяки фотограмметричному аналізу знайдені місця тріщин в ортотропній плиті під асфальтним покритвом.

Запропонована технологія може бути інтегрована в систему моніторингу інфраструктурних об'єктів і використана для створення єдиної бази даних стану мостів із можливістю подальшого автоматизованого аналізу на основі алгоритмів штучного інтелекту.

## КОМПОНЕНТИ ГТД ЗІ СПЛАВУ ВТ6: АДИТИВНЕ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ

Матвійчук В.А.

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

Об'єктом дослідження є вироби, виготовлені за адитивною електронно-променевою технологією (ЕВМ) з порошку титанового сплаву ВТ6 (Ti–6Al–4V). Цей матеріал є одним із найпоширеніших у виробництві авіаційних двигунів завдяки поєднанню високої зварюваності, міцності та стійкості до втомних навантажень.

Метою роботи є оцінка можливостей технології ЕВМ для виготовлення компонентів газотурбінних двигунів (ГТД) і визначення відповідності отриманих деталей експлуатаційним вимогам.

У програмі Materialise Magics створено комп'ютерну модель збірки виробів (рис. 1, а), а пошаровий аналіз і оптимізацію параметрів адитивного процесу виконано у середовищі Simufact Additive. За технологією ЕВМ надруковано дослідні зразки: колесо турбіни (рис. 1, б), лопатки ГТД (рис. 1, в) та контрольні зразки–свідки.

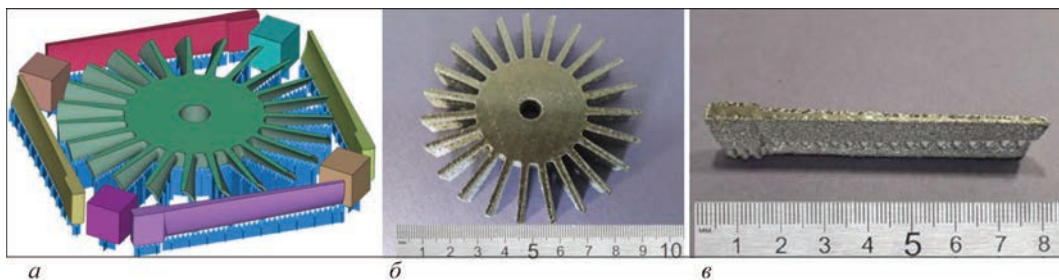


Рис. 1. Модель і вироби: а — збірка виробів; б — колесо турбіни; в — лопатка ГТД

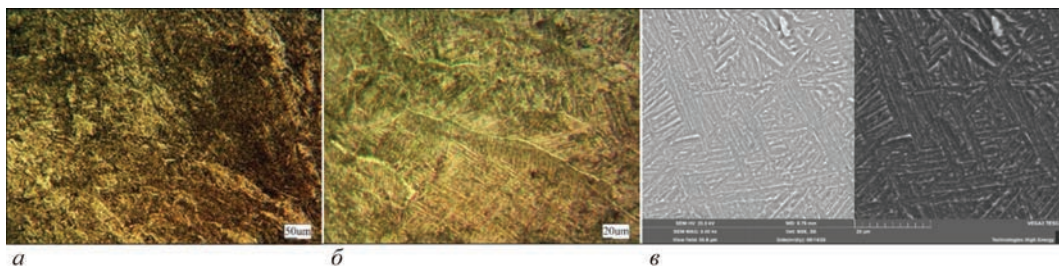


Рис. 2. Мікроструктура лопатки ГТД: а — з масштабом 50 мкм; б — 20 мкм; в — SEM-зображення

Мікроструктура лопатки ГТД (рис. 2) містить пластинчасту  $\alpha'$ -фазу з незначною кількістю  $\beta$ -фази;  $\alpha'$ -фаза має голчасту морфологію завтовшки 0,5...1,5 мкм. Встановлено рівномірний розподіл легуючих елементів, відсутність сегрегації і пористості. Середнє значення мікротвердості HV100 становить 3,71 ГПа. Хімічний склад засвідчив відповідність виробів сплаву ВТ6 (Ti–6Al–4V).

Отримані результати підтвердили, що виготовлені деталі відповідають вимогам до компонентів ГТД: висока щільність, міцність та експлуатаційна надійність. Інтеграція цифрового моделювання з подальшим друком за технологією ЕВМ, оптимізація параметрів і використання вітчизняного порошку ВТ6 забезпечили отримання виробів з нульовою пористістю, стабільною мікроструктурою, керованою текстурою та високою геометричною точністю. Це підтверджує ефективність підходу та відкриває перспективи його масштабування у серійному виробництві відповідальних деталей з прогнозованими характеристиками.

## ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ ПОГЛИНАЮЧИХ СТРИЖНІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАХИСТУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕАКТОРА ВВЕР-1000

Махненко О.В., Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Махненко О.О.

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

Для регулювання інтенсивності енерговиділення в реакторах типу ВВЕР-1000 система управління та захисту (СУЗ) містить комплекс поглинаючих елементів (ПЕЛ). Опускання ПЕЛ в активну зону ядерного реактора забезпечує зменшення енерговиділення аж до повної зупинки ланцюгової реакції. ПЕЛ являє собою набір із 18 поглинаючих стрижнів (ПС) з циліндричною оболонкою, виготовленою із хромонікелевого сплаву 42ХНМ, зовнішнім діаметром 8,2 мм і товщиною стінки 0,50...0,55 мм. Оболонка герметично закрита зверху наконечником, а знизу — конусом, та заповнена поглинаючим матеріалом карбідом бору або титанатом диспрозію [1]. Герметизація здійснюється електродуговим зварюванням кінцевих елементів в атмосфері інертного газу (рис. 1).

У процесі експлуатації відбувається випаровування та розпухання речовин поглиначів, що призводить до утворення надлишкового внутрішнього тиску  $P_{внутр}$  (до 3,0 МПа) в об'ємі циліндричної оболонки. В умовах нормальної (проектної) експлуатації на ПС діє зовнішній тиск теплоносія  $P_{зовн} = 16$  МПа при температурі  $T = 300...350$  °С. Окрім цього, необхідно враховувати аварійний режим зупинки реактора, коли зовнішній тиск падає до нуля, а температура знижується до кімнатної ( $T = 20$  °С).

Було проаналізовано особливості формування напружено-деформованого стану (НДС) зварних ПС СУЗ на етапах монтажу та експлуатації. Визначено, що зварювання конуса з оболонкою формує двовісний НДС, характерний для товстостінних труб, із превалюванням окружних і повздожних залишкових напружень (рис. 2, а, б). У зоні з'єднання наконечника з оболонкою утворюється підповерхнева область підвищених залишкових напружень, що призводить до тривісного НДС (рис. 2, в, г).

Виконано комплексний аналіз схильності до руйнування зварних з'єднань ПС СУЗ реакторів типу ВВЕР-1000 з урахуванням зварювальних залишкових напружень, внутрішнього тиску та експлуатаційних навантажень у нормальних і аварійних режимах. Для цього використано метод постульованих дефектів, який полягає в розгляді припустимості тріщин на основі сучасних підходів механіки руйнування. У перерізі звар-

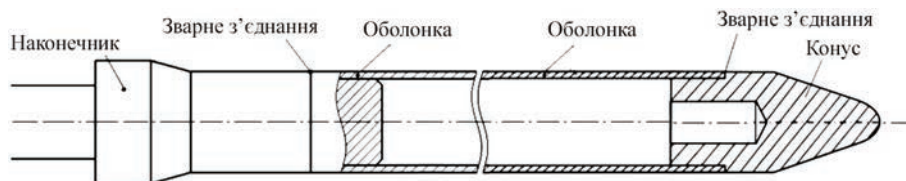


Рис. 1. Вузли зварних з'єднань наконечника (а) і конуса (б) з оболонкою ПС СУЗ реактора ВВЕР-1000

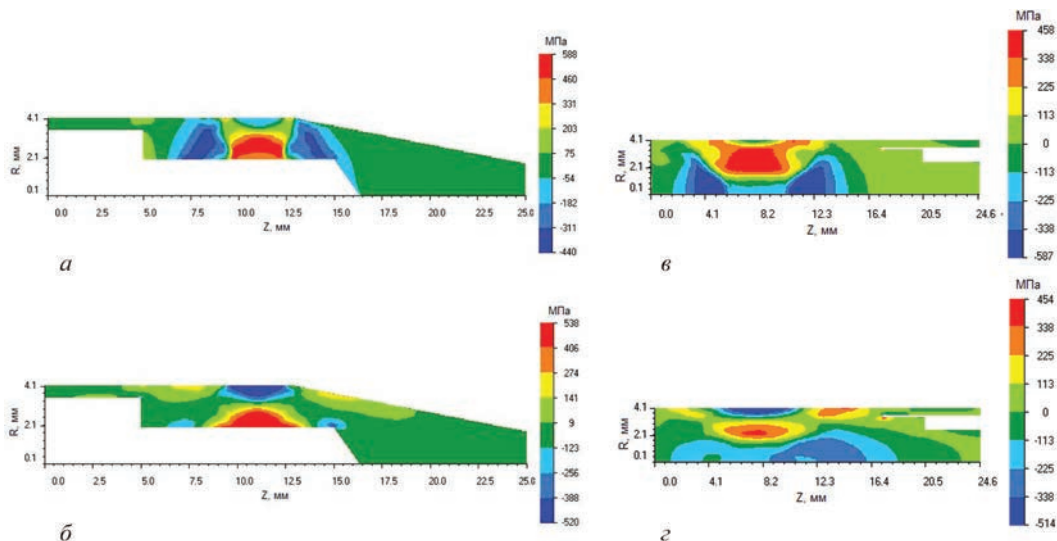


Рис. 2. Розрахункові розподіли залишкових напружень в зоні зварного з'єднання конуса та наконечника з оболонкою ПС СУЗ: а, в — окружна компонента; б, г — осьова компонента

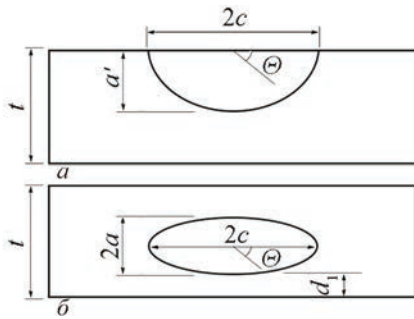


Рис. 3. Схеми поверхневої напівеліптичної (а) та підповерхневої еліптичної (б) тріщин

них з'єднань «конус–оболонка» та «наконечник–оболонка» було постульовано підповерхневі та поверхневі тріщиноподібні дефекти та на основі діаграми крихко-в'язкого руйнування [2] проаналізовано запас міцності за проектних та аварійних умов експлуатації. Враховуючи, що товщина стінки оболонки ПС СУЗ становить 0,5 мм, це значення було прийнято як мінімальний розмір  $2a$  еліптичної підповерхневої та глибини  $a'$  поверхневої тріщини (рис. 3). Відповідна велика вісь  $2c$  була визначена для співвідношення сторін  $2a/2c = 0,3$  [3, 4], тобто  $2a \times 2c = 0,5 \times 1,67$  мм.

Параметрами стану конструкції з тріщиною певного розміру є коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$  і реферативні напруження  $\sigma_{ref}$  [5]. Для їх розрахунку використовувались аналітичні підходи стандарту BS 7910:2019 [2] і результати чисельних досліджень просторових розподілів напружень в області зварних з'єднань. Значення  $K_{I_{max}}$  через відношення до в'язкості руйнування  $K_{IC}$  (для сплаву 42ХНМ при флюенсі 12 зна він складає  $K_{IC} = 1578$  МПа мм<sup>0,5</sup> [6]) дозволяє оцінити опірність зварної конструкції до чисто крихкого руйнування. Але використання критерію крихко-в'язкого руйнування дозволяє додатково врахувати в'язку складову пошкодженості конструкційного матеріалу.

Показано, що найбільш критичним з точки зору втрати цілісності є з'єднання «конус–оболонка», де формується підвищений градієнт окружних і повздовжніх напружень на внутрішній поверхні оболонки, що визначає мінімальні коефіцієнти запасу міцності на рівні  $n_{min} = 3,18$  в умовах аварійного охолодження. Для з'єднання «наконечник–оболонка» характерним є більш рівномірний розподіл напружень і вищі напруження у підповерхневих областях конструкції, що зумовлює коефіцієнти запасу міцності не менше  $n_{min} = 3,96$ .

Таким чином, найбільш небезпечними зонами є внутрішня поверхня та підповерхневі шари в області зварних з'єднань ПС СУЗ. Тому забезпечення їх надійності та обґрунтування продовження ресурсу потребує точних методів неруйнівного контролю, орієнтованих на виявлення дефектів у важкодоступних внутрішніх і підповерхневих ділянках, а також урахування результатів розрахункової оцінки граничного стану на основі принципів механіки руйнування.

1. Куштим А.В., Зігунов В.В. Грицина В.М. та ін. (2023) Характеристики зварних з'єднань поглинаючих елементів зі сплаву 42ХНМ для стрижнів системи управління та захисту ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*, 4(100), 38–48. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4\(100\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4(100).04)
2. BS 7910:2019: *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. British Standards Institution.
3. ПНАЭ Г-7-002–86: *Норми розрахунку на міцність обладнання та трубопроводів атомних енергетичних установок*.
4. (2013) *Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER Nuclear Power Plants (VERLIFE)*. Vienna: Int. At. Energy Agency.
5. Makhnenko, V.I., Pochinok, V.E. (2006) *Strength Calculation of Welded Joints with Crack-Like Imperfections*. E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.
6. Mills, W.J. (1987) Fracture toughness of two Ni–Fe–Cr alloys. *Engineering Fracture Mechanics*, 26(2), 223–238. DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(87\)90199-8](https://doi.org/10.1016/0013-7944(87)90199-8)

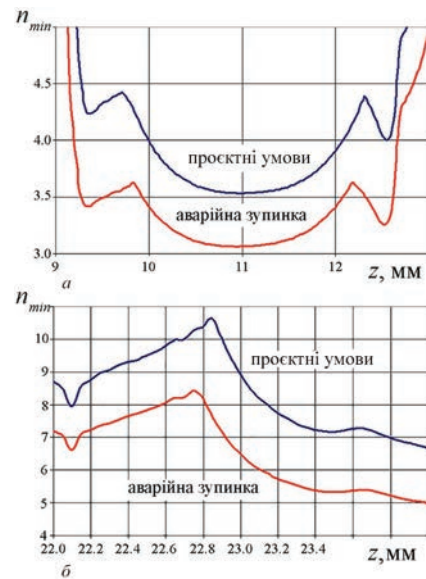


Рис. 4. Розподіл мінімального коефіцієнта запасу міцності  $n_{min}$  вздовж поверхні зварних з'єднань ПС СУЗ: а — конус–оболонка; б — наконечник–оболонка

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ WAAM ВИГОТОВЛЕННЯ БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ

Шаповалов Є.В., Долиненко В.В., Коляда В.О., Ващенко В.М., Новодранов А.С.,  
Ващенко О.Ю., Мангольд А.М., Клішар Ф.С.

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

На даний час Україна знаходиться у стані війни із сусідньою державою та зазнає серйозних втрат як у людських ресурсах, так і в житловому фонді. У післявоєнний період буде проводитись інтенсивне відбудовування України, що може потребувати великих обсягів шнекового буріння та великої кількості технологічного бурового інструменту, який вважається витратним матеріалом. На даний час однією з найбільш перспективних технологій спорудження будівельних паль є технологія CFA, що полягає в облаштуванні буронабивних паль методом безперервного порожнистого шнека. В якості прототипу бурового технологічного інструменту вибрано CFA шнек без головки з діаметром буріння 400 мм (рис. 1).

Розроблено алгоритми декомпозиції CAD-моделі прототипу бурового інструменту на окремі примітиви, що визначають необхідну область наплавлення. Створено комп'ютерне математичне забезпечення, призначене для формування на основі CAD-моделі бурового шнека програми управління робототехнічним комплексом для реалізації WAAM адитивної технології виготовлення бурового шнека. Розроблено алгоритми та програму для роботи моделі Fanuc ARC Mate 100iC/7L, що дозволяють виконувати планування оптимальної траєкторії WAAM наплавлення при виготовленні бурового інструменту. Для відпрацювання технологічного процесу роботизованого наплавлення розроблено імітаційну 3D-модель роботизованої дільниці виготовлення бурового інструменту в рамках пакету моделювання Fanuc Roboguide (рис. 2).

Створено базу даних набору CAD-моделей технологічного бурового інструменту для різних етапів його виготовлення. 3D-модель робототехнічного зварювального комплексу розроблено з урахуванням габаритних і кінематичних характеристик робота, маніпулятора, заготовки бурового шнека та допоміжного обладнання. За допомогою імітаційної моделі виконано моделювання WAAM виготовлення бурового шнека способом багат шарового MIG/MAG наплавлення. Розроблено рекомендації щодо взаємного розміщення обладнання робототехнічного зварювального комплексу для забезпечення оптимального використання взаємної робочої області робота та маніпулятора заготовки при реалізації WAAM технології.

Для зменшення об'ємів зварювальних експериментів виконано математичне моделювання процесу адитивного нарощування. Розроблено термомеханічну модель процесу MIG/MAG наплавлення (рис. 3).

Ця модель зв'язності містить: 1) залежність механічних властивостей від концентрації фаз; об'ємні зміни внаслідок фазових перетворень; пластичність, що обумовлена фазовими перетвореннями; 2) мікроструктурну еволюцію, що базується на температурній історії; 3) мікроструктурну еволюцію, що впливає на температурне поле через приховану теплоту й властивості матеріалів, що залежать від мікроструктури; 4) зв'язність

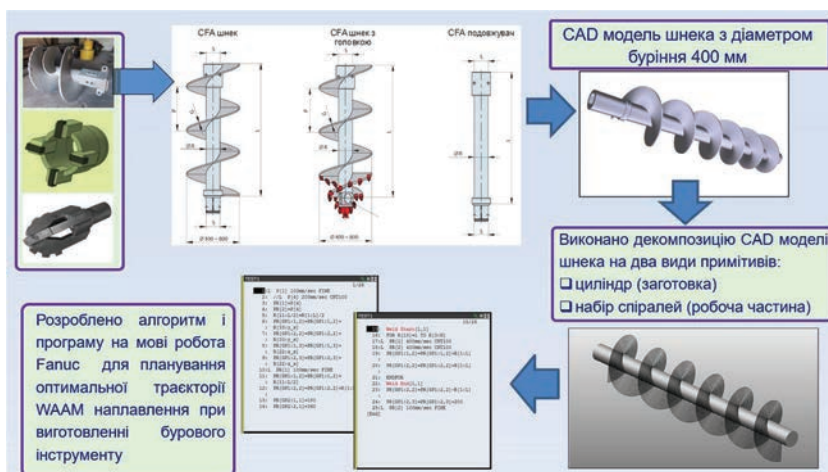


Рис. 1. Розробка CAD-моделі технологічного бурового інструменту

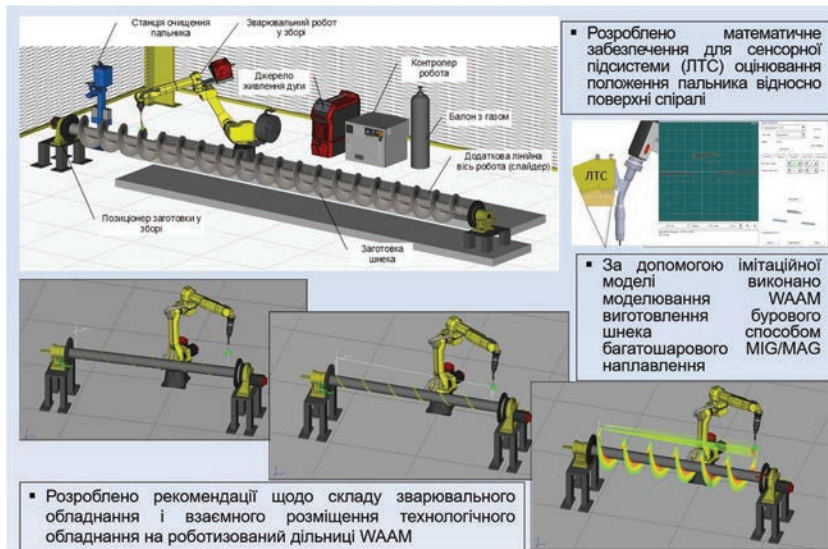


Рис. 2. Розробка імітаційної моделі роботизованої дільниці для WAAM виготовлення бурового шнека завдовжки 6 м (об'єкти Fanuc Roboguide)

через теплове розширення та властивості матеріалів, що залежать від температури; 5) можливий механічний розігрів; 6) вплив напружень на мікроструктурні перетворення. У роботі використано модель об'ємного джерела теплового потоку типу «3D подвійний еліпсоїд» (відомого як модель Голдака), що дозволяє задавати геометричні параметри окремо для його головної і хвостової частин. При моделюванні термомеханічної задачі використано діаграми перетворення аустеніту для сталей 20Г і Св-08Г2С, а також теплофізичні характеристики цих сталей. Використання методології моделі зв'язності та рівняння теплопровідності для багатофазного середовища дозволило дослідити фазові та структурні перетворення в сталі, а також деформації у виробі, що виготовляється за технологією WAAM із використанням MIG/MAG наплавлення.

Розроблено скінченно-елементну модель прототипу бурового шнека завдовжки 620 мм з діаметром буріння 400 мм і досліджено процеси структурних перетворень у деталі. Сформована розрахункова сітка містить близько 294 тис. 3D скінченних елементів. Чисельне моделювання виконано для умов багатофазного середовища твердого тіла. Нагрів поверхні деталі зварювальною дугою моделювався за допомогою рухомої джерела теплового потоку типу «3D подвійний еліпсоїд» з коливаннями пальника. Процес формування валиків присадним металом моделювався за допомогою фіктивної фази з нульовим коефіцієнтом теплопровідності. Отримані результати аналізу деформацій, залишкових напружень і переміщень у деталі показують, що в процесі наплавлення величини переміщень в шнеку завдовжки 2 м можуть досягати 2,5 мм. Тому доцільно застосовувати лазерно-триангуляційний сенсор, що дозволяє реалізувати геометричну адаптацію пальника відносно поверхні спіралі шнека. Для виконання перевірки адекватності математичної

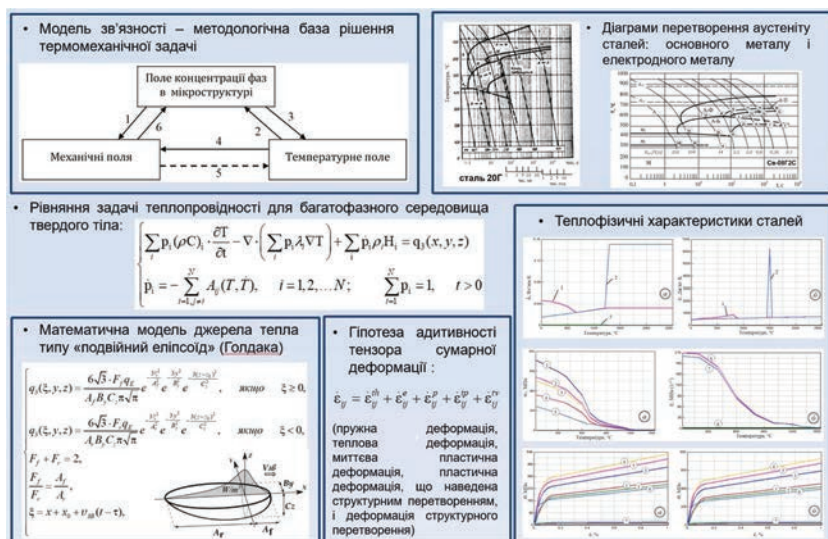


Рис. 3. Розробка термомеханічної моделі процесу MIG/MAG наплавлення



Рис. 4. Підготовлена діюча модель робототехнічної системи WAAM технології

моделі MIG/MAG наплавлення використали вольфрам-ренієві термодари, що дозволило отримати реальні термоцикли при напавленні п'яти шарів металу.

На основі результатів моделювання сформовано декілька варіантів технологічної карти пошарового наплавлення робочої частини бурового інструменту. Однопрохідний варіант 3D наплавлення дозволяє виконати наплавлення однієї спіралі шнека завдовжки 2000 мм приблизно за 19 год. Експериментальним шляхом визначено оптимальну схему формоутворення шарів та уточнено параметри режиму електродугового наплавлення.

Підготовлено макет робототехнічного комплексу в складі антропоморфного робота Fanuc ARC Mate 100iC/7L, контролера зварювального робота Fanuc R-30iB 50/60HZ, зварювального пальника та інверторного зварювального апарата Fronius TPS 320i, механізму подачі дроту WF 25i-R-PAP, підсистеми машинного зору та позиціонера виробу (рис. 4). Це дозволило виготовити заготовку бурового шнеку завдовжки 600 мм з діаметром буріння 350 мм. Наплавлення виконувались у два етапи: основні шари металу — низьковуглецевим дротом, останні чотири — зносостійким дротом. Механічні випробування продемонстрували високі механічні характеристики основних шарів напавленого металу: показники ударної в'язкості  $KCU$  на рівні  $243 \text{ Дж/см}^2$  та показники пластичності:  $\delta \approx 47,7\%$  і  $\psi \approx 77,9\%$ , при цьому демонструючи високий рівень міцності:  $\sigma_B \approx 495 \text{ МПа}$ . Макрошліфи показали високу якість напавленого металу — пори, тріщини, несплавлення та зашлакування відсутні. Мікроструктура основних шарів напавленого металу — ферито-перлітна, зносостійких – мартенситна дрібногольчата. Використання електродугового наплавлення порошковим дротом Esab OK Tubrodur 53 GM верхніх шарів спіралі шнека дозволило отримати зносостійкий шар металу спіралі з твердістю  $51 \dots 53 \text{ HRC}$ .

Отримані результати можуть бути використані для створення мобільних робототехнологічних центрів, призначених для виготовлення чи ремонту як технологічного бурового інструменту, так і інших деталей відповідального призначення.

1. Шаповалов Є.В., Коляда В.О., Новодранов А.С., Мангольд А.М., Топчев Д.Д. (2024) Отримання металевих виробів з використанням роботизованої дугової 3D технології. *Автоматичне зварювання*, 2, 12–15. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.02.02>
2. Долиненко В.В., Шаповалов Є.В., Коляда В.А. (2024) Розробка і моделювання робототехнічної системи для реалізації WAAM адитивної технології виготовлення бурового інструменту. *Електронне моделювання*, 46(4), 112–127.

## **КОЛАБОРАТИВНІ РОБОТИ АОТАЙ — СИСТЕМНЕ РІШЕННЯ КАДРОВИХ КРИЗ, СПРИЧИНЕНИХ НЕСТАЧЕЮ КВАЛІФІКОВАНИХ РОБІТНИКІВ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ**

**Юдін Ю.В.**

*Центр Зварювальних Технологій ТОВ «ВТЦ», Київ*

У цьому виступі представлено поглиблений аналіз та структуру рішень, що стосуються однієї з основних проблем сучасної виробничої галузі — структурної нестачі кваліфікованих зварників. У ньому систематично розглядається негативний вплив цієї кризи на діяльність підприємств, контроль якості та довгострокове стратегічне планування. Результати дослідження чітко показують, що спільні роботизовані зварювальні робочі місця вже не є неонов'язковим оновленням, а необхідним шляхом до підтримки конкурентоспроможності. Окрім простого поняття «заміни людей машинами», у цьому звіті наголошується на створенні виробничої моделі співпраці людини та робота, яка модернізує людські ресурси, трансформує методи виробництва та підвищує рівень усього ланцюжка створення вартості.

### **1. Поглиблений аналіз проблеми: багатовимірний вплив дефіциту кваліфікованих зварників**

#### *1.1 Аналіз першопричин: системний виклик*

- Збільшення розриву між поколіннями: Глобальні дані показують, що понад 35 % нинішніх зварників старші за 55 років і наближаються до пенсійного віку. Тим часом представники покоління Z (народжені 1995–2010 рр.) демонструють постійно знижене бажання розпочати виробництво, особливо у фізично вимогливих професіях, що призводить до того, що кількість нових учасників значно менша за кількість тих, хто щороку залишає робочу силу.
- Невідповідність навичок: Сучасне зварювання вимагає вміння керувати автоматизованим обладнанням, інтерпретувати цифрові креслення та виконувати базове програмування. Однак традиційні системи навчання все ще зосереджені переважно на ручних методах, що створює розрив між можливостями випускників та вимогами галузі.
- Зростання «невидимих» витрат: Окрім вищої заробітної плати, компанії також повинні нести додаткові витрати на утримання найкращих зварників, як то збільшення внесків на медичне страхування (через ризики для здоров'я на виробництві), довшу оплачувану відпустку та додаткові надбавки за кваліфікацію.

#### *1.2 Каскадний вплив на діяльність підприємства*

- Ризики ланцюга поставок: Зварювання є критично важливим процесом для широкого спектру продукції, від важкого машинобудування до точних інструментів. Нестабільність зварювальних потужностей безпосередньо впливає на операції на виробництві, порушуючи графіки закупівлі сировини та спричиняючи затримки в доставці продукції на виробництві, підриваючи загальну надійність ланцюга поставок.
- Неконтрольовані витрати на якість: Дефекти, спричинені некваліфікованими або перевантаженими зварниками, призводять не лише до витрат на матеріали та робочу силу, але й до внутрішніх витрат на відмову (брак, повторна перевірка) та зовнішніх витрат на відмову (скарги клієнтів, повернення, шкода репутації та зниження частки ринку). Статистика показує, що зовнішні витрати на відмову можуть бути в 5–10 разів вищими за внутрішні витрати.
- Обмежені можливості інновацій: Інноваційні продукти, розроблені інженерними та науково-дослідними командами, можуть бути відхилені, якщо процеси зварювання занадто складні або не можуть бути виконані надійно. Як варіант, конструкції можуть бути понижені, щоб відповідати існуючим навичкам робочої сили, тим самим підриваючи довгострокову технологічну конкурентоспроможність компанії.

### **2. Рішення: Колаборативні роботизовані зварювальні системи**

Колаборативні роботи (коботи) — це роботи, призначені для безпечної взаємодії або безпосередньої співпраці з людьми в межах спільного робочого простору. Як нова галузь у промисловій робототехніці коботи наголошують на безпеці, простоті використання та гнучкості порівняно з традиційними промисловими роботами. Вони можуть адаптуватися до широкого спектру робочих сценаріїв, загалом є економічно ефективнішими, компактнішими за розміром та за своєю суттю безпечнішими для операторів-людей.

### 2.1 Чому варто обрати колаборативних роботів замість традиційних промислових роботів?

- Висока безпека: Оснащені датчиками сили та виявленням зіткнень, роботи можуть тісно співпрацювати з операторами-людьми без коштовних фізичних бар'єрів безпеки.
- Гнучке розгортання: Легкі та мобільні, роботи можна швидко перерозподілити на різні робочі станції та для виконання завдань, що робить їх ідеальними для невеликого виробництва багатьох продуктів.
- Легке програмування: Роботи можна програмувати за допомогою портативних навчальних підвісок з інтерфейсами перетягування або прямим керівництвом. Звичайні працівники можуть опанувати операції після короткого навчання, що усуває потребу в спеціалізованих інженерах-робототехніках.
- Швидка окупність інвестицій: Загальна вартість володіння значно нижча, ніж у традиційних промислових роботів, а терміни окупності зазвичай менше 12 місяців.

### 2.2 Класифікація колаборативних роботів

В останні роки, з постійним розширенням низових застосувань та технологічними проривами, колаборативні роботи (роботи) урізноманітнилися за типами. За корисним навантаженням, кількістю осей та структурною схемою роботи можна класифікувати наступним чином:

#### 1. Класифікація за корисним навантаженням

Легке корисне навантаження:  $< 7$  кг

Середнє корисне навантаження:  $7 \leq L < 12$  кг

Важке корисне навантаження:  $12 \leq L < 20$  кг

Надважке корисне навантаження:  $L \geq 20$  кг

З точки зору застосування, роботи з легким корисним навантаженням домінують на ринку завдяки своїй високій економічній ефективності та придатності для таких галузей, як ЗС-електроніка, освіта та дослідження, а також комерційна роздрібна торгівля. Роботи середнього та важкого корисного навантаження зазвичай використовуються у зварюванні, складанні, кріпленні гвинтів, упаковці, обробці матеріалів, логістиці та реагуванні на надзвичайні ситуації. Роботи з надважким корисним навантаженням в основному застосовуються для обробки матеріалів, палетування, обслуговування машин, зтягування гвинтів з високим крутним моментом, завантаження/розвантаження верстатів, пакування та зварювання.

### 2.3 Класифікація за кількістю осей

Роботи також можна класифікувати за ступенями свободи:

4-осьові роботи; 6-осьові роботи; 7-осьові роботи.



Рис. 1. 6-осьовий робот

Шестиосьові колаборативні роботи є найпоширенішим типом, зі схемами руху, подібними до рухів людської руки, що робить їх широко застосовними в різних галузях промисловості. Ступені свободи робота відповідають кількості його осей; шестиосьові роботи забезпечують повну просторову свободу, дозволяючи їм досягати будь-якої точки в тривимірному робочому просторі та пропонуючи високу універсальність. Ця висока гнучкість робить шестиосьових роботів ідеальними для таких завдань, як шліфування, складання, закручування гвинтів, перевірка, сортування та навіть медичні процедури.

#### 2.4 Аналіз світового ринку колаборативних роботів

З розвитком технологій промислової автоматизації виробничі галузі дедалі більше вимагають модернізації автоматизації виробництва та спільних операцій людини й робота. Водночас стандарти для роботів з точки зору безпеки, зручності розгортання, легкої конструкції та експлуатаційної стабільності продовжують зростати. У відповідь на це все більше виробників впроваджують колаборативних роботів, щоб точно відповідати високим вимогам до гнучкого виробництва, стимулюючи виробничі моделі до більшої гнучкості та ефективності.

Згідно з даними GGII, світові продажі колаборативних роботів (включаючи 4-осеві моделі) досягли 115 100 одиниць у 2024 р., що на 15,24 % більше, ніж у попередньому році, з розміром ринку 1,12 мільярдів доларів США (USD), що на 16,15 % більше, ніж у попередньому році. Між 2016 і 2024 роками світовий ринок коботів зазнав сукупних річних темпів зростання (CAGR) у 34,2 %. Завдяки постійному технологічному прогресу безпека, гнучкість та адаптивність колаборативних роботів продовжують покращуватися, тоді як витрати знижуються. Це позиціонує коботів для масштабного розширення як на промисловому, так і на споживчому ринках. GGII прогнозує, що до 2025 р. світові продажі коботів можуть досягти 134 600 одиниць, що на 16,94 % більше, ніж минулого року, а розмір ринку перевищить 1,4 мільярдів доларів США (USD). Очікується, що до 2028 р. світові продажі наблизяться до 280 000 одиниць, а розмір ринку наблизиться до 2,8 мільярдів доларів США (USD).



Рис. 2. Продажі та прогноз світового ринку колаборативних роботів, 2016–2028 рр. (одиниця: 10 000 одиниць, %)

Згідно з даними GGII, світові продажі шестиосєвих і більше колаборативних роботів у 2024 р. Досягли 74 500 одиниць, що на 22,53 % більше, ніж у попередньому році, а обсяг ринку склав 1,13 мільярдів доларів США (USD), що на 18,03 % більше, ніж у попередньому році. Прогнозується, що до 2028 р. світові продажі шестиосєвих і більше коботів перевищать 200 000 одиниць, а обсяг ринку перевищить 2,6 мільярдів доларів США (USD).

Система колаборативного роботизованого зварювання AOTAI

### 3. Мобільна робоча станція для зварювальної платформи

Зварювальна система COBOT в основному складається з кобота, зварювального апарату та зварювальної платформи. Вона пропонує підвищену зручність використання для зварювальних завдань завдяки інтеграції додаткових функцій, таких як гнучка платформа, система лазерного позиціонування та інше допоміжне обладнання. Нижче наведено її ключові характеристики:

#### 3.1. Інтегроване програмне забезпечення для дугового зварювання

Глибока інтеграція з системою керування роботом дозволяє вільно перемикатися між режимами зварювання та легко налаштовувати параметри зварювання.

#### 3.2. Зручний інтерфейс

Програмне забезпечення для дугового зварювання має чітку структуру та інструкції з налаштування, що спрощує процес конфігурації параметрів для користувачів.

### 3.3. Система лазерного зондування

Інтегрована система лазерного зондування дозволяє контролювати положення в режимі реального часу на навчальному підвісці, що сприяє точному позиціонуванню.

### 3.4. Кінцевий інструмент з інтегрованими кнопками

Інструмент на кінці кобота має кнопки для перемикання режимів роботи, запису точок і виконання інших функцій, що забезпечує зручну експлуатацію.

#### 3.4.1. Двигун 4WD + енкодер

Система використовує повністю цифрову систему керування двигуном з точною та стабільною подачею дроту, що живиться від двигуна 4WD + енкодер. Ця система розроблена для забезпечення ефективних, точних і зручних у використанні зварювальних рішень.



#### 3.4.2. Міні-зварювальна станція COBOT



Зварювальна система AOTAI Mini Cobot використовує магнітну основу, а зварювальний візок об'єднує зварювальний апарат і робототехнічну систему для легкої мобільності та керування. Сильна магнітна сила основи дозволяє надійно кріпити робота до сталевих конструкцій. Оснащений 10-метровим кабелем подачі дроту, він забезпечує зручну роботу в широкій робочій зоні.

#### 4. Побудова нової структури роботи для співпраці людини та робота

Впровадження спільних робіт не ліквідує робочі місця; радше створює високоцінні посади та дозволяє структурне оновлення людських ресурсів:

- Від «Зварника» до «Техніка з роботизованого зварювання»

Обов'язки: Щоденна експлуатація спільних робіт, виконання програм, незначні налаштування, базові технічне обслуговування (наприклад, заміна контактних наконечників або сопел) та початкова діагностика несправностей.

Вимоги: Базові знання роботи робота та наявний досвід у процесі зварювання.

- Від «Старшого зварника» до «Програміста/інженера з роботизованого зварювання»

Обов'язки: Розробка програм зварювання для нових продуктів, оптимізація параметрів процесу, програмування складних шляхів і калібрування функцій датчиків.

Вимоги: Глибоке розуміння принципів зварювання, кінематики робіт та сенсорних технологій.

- Від «Керівника групи» до «Керівника підрозділу спільної роботи людини та робота»

Обов'язки: Координація робочого процесу між людьми та роботами, призначення завдань, контроль загального показника ОЕЕ та постійна оптимізація процесів співпраці людини та робота.

## МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ПРОБЛЕМИ ДУГОВОГО АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ДЕТАЛЕЙ ЗІ СПЛАВУ INCONEL 625

Яровицин О.<sup>1</sup>, Черв'яков М.<sup>1</sup>, Мотруніч С.<sup>1</sup>, Волосатов І.<sup>1</sup>,  
Звягінцева Г.<sup>1</sup>, Пестов В.<sup>1</sup>, Хрущов Г.<sup>1</sup>, Томко Д.<sup>2</sup>, Джульвєнь Д.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

<sup>2</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

<sup>3</sup>Мюнхенський технічний університет, Мюнхен, Німеччина

Для структурного стану «as built» згідно з ISO/ASTM 52900 із використанням мініатюрних плоских пропорційних зразків у діапазоні температур 20...1100 °С досліджено механічні властивості та мікроструктуру наплавленого металу сплаву Inconel 625, отриманого з підготовлених зварних заготовок «вертикальна стінка» за п'ятьма технологічними варіантами дугового багат шарового наплавлення. Варіювання дугового багат шарового наплавлення мало два технологічні рівні. На першому рівні відрізнявся спосіб наплавлення — аргонодугове плавким (WAAM) та неплавким електродом (TIG) із використанням присадного дроту, а також мікроплазмове порошкове наплавлення (МПН). На другому рівні при застосуванні одного способу наплавлення змінювалися певні технологічні параметри. Для процесу WAAM — вид захисного газу, що мав перехід від Ar до суміші 97,5 % Ar + 2,5 % CO<sub>2</sub>. Для МПН — виробник присадного порошку (Castolin Eutectic/Carpenter Additive).

Встановлено що у залежності критичної деформації руйнування екран наплавленого металу сплаву Inconel 625 при 20...1100 °С присутні два діапазони зниження його пластичності. У першому при 600...900 °С спостерігаються мінімальні значення  $\epsilon_{кр}$  від 14,5 до 32,8 %. У другому при 1000...1100 °С спостерігаються мінімальні значення  $\epsilon_{кр}$  від 3,2 до 40,8 %. Показано, що найменші значення  $\epsilon_{кр}$  при 1000...1100 °С (3,2...11 %), які в певних умовах жорсткості адитивного виробу можуть призвести до утворення сегрегаційних або кристалізаційних тріщин, співвідносяться з підвищеним вмістом азоту (0,05...0,07 %). Встановлено, що після термічної обробки за режимом 1050 °С 2,5 год, яка наближена до температури гомогенізації сплаву, наплавлений метал Inconel 625 як технологічну спадковість зі структурного стану «as built» зберігає присутність двох описаних вище інтервалів провалу пластичності. Показано, що досліджений багат шаровий наплавлений метал Inconel 625 може суттєво поступатися за показниками короткочасної міцності та пластичності промисловим напівфабрикатам, виготовленим за традиційними технологіями.

# СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ

## А-ТІГ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti-6Al-4V

**Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В.**

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

Аргонодугове зварювання по шару флюсу (А-TIG) є розвитком традиційного TIG-процесу, який передбачає нанесення тонкого шару флюсу на поверхню металу для підвищення стабільності дуги та глибини проплавлення. Застосування багатокомпонентних фторидних систем дозволяє регулювати розподіл теплових потоків і впливати на кінетику фазових перетворень у зоні шва. У дослідженні проаналізовано вплив А-TIG зварювання на формування структури та властивостей зварних з'єднань титанового сплаву Ti-6Al-4V. Використання флюсів забезпечує зміну термодинамічних умов процесу, підвищення стабільності дуги та локалізацію теплової енергії. Це сприяє керованому тепловому циклу, який визначає характер фазових перетворень і морфологію ( $\alpha+\beta$ )-структури. Порівняння А-TIG і традиційного TIG зварювання показало, що активовані флюси покращують мікроструктурну однорідність і знижують залишкові напруження. Отримані результати підтверджують ефективність багатокомпонентних флюсів для вдосконалення технологій зварювання титанових сплавів у високонавантажених конструкціях.

## ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ПЛАВКА ЗЛИВКІВ-СЛЯБІВ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ

**Березос В.О., Єрохін О.Г., Ліпчанчук Є.І.**

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

Основними споживачами продукції з високоміцних титанових сплавів є підприємства авіаційної та ракетно-космічної промисловості, оборонно-промислового комплексу, а також хімічного й енергетичного машинобудування. В умовах зростання потреби у високоефективних конструкційних матеріалах актуальним є створення вітчизняного виробництва листових напівфабрикатів із високоміцних титанових сплавів і впровадження прогресивних ресурсозберігаючих технологій.

Традиційно листові напівфабрикати з титану виготовляють шляхом виплавки зливків круглого перерізу методом вакуумно-дугового переплаву (ВДП), подальшого їх перековування на квадрат та прокатування у плити або листи. Оскільки в Україні відсутні печі ВДП, металургійна переробка титану здійснюється на основі технології електронно-променевої плавки з проміжною ємністю (ЕПП).

Технологія ЕПП має низку переваг порівняно з традиційною технологією ВДП, зокрема можливість отримання зливків прямокутного перерізу. Для виготовлення листових напівфабрикатів із титанових сплавів доцільним є застосування зливків-слябів прямокутного перерізу, що дає змогу виключити енерговитратну стадію перековування зливків круглого перерізу перед їх подальшою прокаткою у плити або листи. Водночас зміна форми перерізу зливка обумовлює необхідність корегування технологічних режимів процесу плавки, що потребує додаткових досліджень.

Таким чином, розв'язання науково-технічної задачі отримання якісних зливків-слябів із високоміцних титанових сплавів методом ЕПП є надзвичайно актуальним. Реалізація зазначеного напряму сприятиме розширенню сировинної бази під час виробництва листових напівфабрикатів і зниженню собівартості продукції із високоміцних титанових сплавів.

Проведено комплексні дослідження з вивчення можливості отримання зливків-слябів із високоміцних сплавів титану методом ЕПП на прикладі титанового сплаву VT23. За технологією ЕПП з проміжною ємністю та порційною подачею металу у водоохолоджуваній кристалізатор було отримано зливки прямокутного перерізу розмірами 530×165 мм і завдовжки до 3 м.

Результати дослідження структури та механічних властивостей зливків-слябів, отриманих методом електронно-променевої плавки, а також листових напівфабрикатів, виготовлених зі сплаву VT23, свідчать про високу якість матеріалу, який відповідає вимогам чинних стандартів. Показано, що електронно-променева технологія є ефективним способом отримання зливків-слябів із високоміцних титанових сплавів та має значний потенціал для подальшого промислового впровадження.

## ЗАСТОСУВАННЯ АРГОНОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДІВ ТИТАНУ

**Білоус В.Ю., Ахонін С.В., Селін Р.В., Радченко Л.М.**

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

Зварювання жароміцних титанових сплавів на основі інтерметалідів титану ускладнено, у першу чергу, у зв'язку з можливістю утворення в зварних з'єднаннях холодних тріщин. Аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом (АДЗ) по шару флюсу є ефективним способом впливу на проплавну здатність дуги, флюс при дуговому зварюванні сприяє збільшенню глибини провару та зміни форми проплавлення. АДЗ по шару флюсу було застосовано для виконання зварних з'єднань титанових сплавів  $Ti-6.5Al-5.3Zr-2.2Sn-0.6Mo-0.5Nb-0.75Si$ ,  $Ti-5.6Al-3.5Zr-2.2Sn-0.4Mo-1V-0.6Si$  та  $Ti-39Nb-16Al-2.6Mo-1.4Zr$ .

Отримало подальший розвиток уявлення про суттєвий вплив попереднього підігріву при аргонодуговому зварюванні на властивості зварних з'єднань титанових жароміцних псевдо- $\alpha$ -сплавів з силіцидним зміцненням і встановлено, що застосування попереднього підігріву з'єднань до 400 °С при АДЗ забезпечує формування в зварному з'єднанні структур кошикового плетіння з пластин  $\alpha$ -фази завтовшки 1...5 мкм і дисперсних зерен  $\beta$ -фази з середнім розміром до 1 мкм та міцність зварних з'єднань сплавів  $Ti-6.5Al-5.3Zr-2.2Sn-0.6Mo-0.5Nb-0.75Si$  і  $Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si$  на рівні 1090 та 1160 МПа відповідно, при показниках ударної в'язкості 5,5...8,5 Дж/см. У металі шва з'єднань сплаву  $Ti-39Nb-16Al-2.6Mo-1.4Zr$  утворюються рівноосні та витягнуті в напрямку тепловідведення первинні  $\beta$ -зерна з дисперсними виділеннями в тілі зерен. У металі шва спостерігаються окремі пластиноподібні виділення завдовжки 20...30 мкм кристалів О-фази (ортогональна фаза  $Ti_2AlNb$ ).

Застосуванням флюсів та попереднього підігріву до 400 °С при АДЗ наскрізним проваром, дозволило отримати зварні з'єднання, які мають найбільші значення міцності на рівні 1091 МПа для сплаву  $Ti-6.5Al-5.3Zr-2.2Sn-0.6Mo-0.5Nb-0.75Si$  та 1160 МПа для сплаву  $Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si$ , що знаходиться на рівні 0,95...1,05 від міцності основного металу.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСІВ ДИФУЗІЇ НА ПИТОМИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР ГРАФІТОВАНИХ ГНТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ

**Богаченко О.Г., Гончаров І.О., Міщенко Д.Д., Нейло І.О.**

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

Проведено дослідження процесів дифузії та їх впливу на питомий електричний опір (ПЕО) тіла графітового гнтового електрода марки ЕГ з вихідним діаметром 350 мм, який пройшов повний цикл нагріву на сталеплавильній печі ДСП ПС-12 з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища і витримкою  $1,2 \cdot 10^5$  год. Встановлено, що в системі «гніт–електрод» має місце активна дифузія всіх основних компонентів гніту (К, Ва, Сu, Сг, Тi,  $O_2$ ) в тіло електрода. Компоненти гноту розподілені досить рівномірно по всьому перерізу електрода. У системі «гніт–електрод» не відбувається повної дифузії компонентів. Питомий електричний опір зразків дуже чутливий до хімічного складу зразка. При цьому, чим більше у зразку міді, барію, титану та інших компонентів гноту, тим менший його ПЕО і навпаки. У результаті активної дифузії компонентів гноту в системі «гніт–електрод» ПЕО тіла гнтового електрода на 35...40 % нижче за ПЕО тіла монолітного електрода.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДВОДНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ ТА РОЗРОБКА СКЛАДІВ ПОРОШКОВИХ ПАСТ

Васильєв Д., Фадєєва Г., Радзиєвська А., Полухін В., Чджун Цицяо  
*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

**Вступ.** Підводне зварювання широко використовується при ремонті гідротехнічних споруд, корпусів суден і підводних трубопроводів. Однією з головних проблем цього процесу є нестабільність горіння дуги у водному середовищі та утворення дефектів у металі шва через наявність водню та кисню. Для покращення якості з'єднань актуальним є підбір складу флюсів і розробка нових способів їх нанесення у вигляді порошкових паст.

**Мета роботи** — розробити базовий склад електродних матеріалів і визначити вплив компонентів флюсу на стабільність дуги та формування шва при підводному зварюванні. Особливу увагу приділено створенню порошкової пасти з використанням різних в'язучих основ.

**Методика досліджень.** Дослідження виконувались у середовищі води при напрузі 30...34 В і швидкості подачі дроту 200...250 м/год. Вивчено роботу флюсів АН-67Б, АН-60СМ, АН-348, а також вплив типу в'язучої основи (рідке скло, ПМС-1000) на плинність пасти, стабільність дуги та якість шва.

### Основні результати

**Склад флюсів.** АН-67Б має збалансований вміст  $Al_2O_3$  і  $CaF_2$ , що забезпечує стабільне горіння дуги. АН-60СМ має підвищений вміст  $SiO_2$  і  $MnO$ , що сприяє утворенню міцного металу шва, але знижує плинність шлаку. АН-348 із ПМС-1000 забезпечує найвищу стабільність процесу при роботі у воді.

**Порошкова паста.** Оптимальним виявився склад на основі АН-348 з добавками  $K_2CO_3$  і  $Na_2CO_3$ . Використання ПМС-1000 як в'язучої основи підвищує адгезію та стабільність пасти при нанесенні.

**Режими зварювання.** Оптимальна напруга дуги 34 В, сила струму 210...260 А, швидкість подачі дроту 200...230 м/год. Пряма полярність забезпечує чисту поверхню шва з мінімальним розбризкуванням, зворотна — глибше проплавлення.

**Вплив параметрів.** Підвищення напруги понад 36 В призводить до розширення шва та зниження стабільності дуги. При зменшенні напруги нижче 32 В зростає ризик непроварів.

### Висновки

- Оптимальним для підводного зварювання є флюс АН-67Б, який забезпечує стабільну дугу та якісне формування шва.
- Порошкова паста на основі АН-348 + ПМС-1000 підвищує стабільність процесу при глибинах до 100 м.
- Рекомендовані режими: 34 В, 210...260 А, 200...230 м/год.
- Отримані результати можуть бути використані при створенні нових зварювальних матеріалів для підводного зварювання складних конструкцій.

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ПІДСИЛЕННЯ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ З ДЕФЕКТОМ СТОНШЕННЯ СТІНКИ ПРИ ВСТАНОВЛЕННІ ЗВАРНОЇ МУФТИ ТА ЗВАРНОЇ НАКЛАДНОЇ ЛАТКИ

**Ворона Г., Махненко О.**

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

Для АЕС України однією з актуальних проблем є виникнення ерозійно-корозійного зношування (ЕКЗ) трубопроводів під час експлуатації [1]. ЕКЗ виникає в результаті одночасного хімічного руйнування через корозію та дію ерозії, внаслідок чого знижується стійкість трубопроводу до навантаження та підвищується схильність до виникнення критичних дефектів в матеріалі.

При виявленні дефекту ЕКЗ на ділянці трубопроводу АЕС ділянку вирізають, а на її місце встановлюють за допомогою зварювання нову трубу. Даний ремонт проводиться при зупинці енергоблоку та зливі рідини, що транспортується. Для продовження робочого ресурсу трубопроводу існують і альтернативні технології, а саме, дефектні ділянки трубопроводів можна підсилити, встановивши ремонтні конструкції, наприклад, зварні муфти (рис. 1, а) або зварні накладні латки (рис. 1, б).

Для обґрунтування доцільності використання при ремонті трубопроводів підсилюючих конструкцій проведено скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ерозійно-корозійного зношення під дією внутрішнього тиску, а також оцінено ефективність розвантаження дефектної ділянки у випадку використання при ремонті підсилюючої конструкції типу зварної муфти (рис. 2, а, б) або зварної накладної латки (рис. 2, в, з).

Оскільки порівняння діючих напружень у стінці трубопроводу від внутрішнього тиску з допустимими напруженнями статичної міцності для матеріалу трубопроводу є занадто консервативним, доцільнішим є використання підходу на основі аналізу утворення пластичних деформацій в зоні дефекту й допущення, що приріст інтенсивності пластичних деформацій не перевищує умовну граничну деформацію, наприклад 1 %. Таким чином, для прогнозування критичного стану при в'язкому руйнуванні під дією внутрішнього тиску матеріалу трубопроводу з дефектом ерозійно-корозійного зношення використано деформаційний критерій [2]:

$$\int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c^p} > 1, \quad (1)$$

де  $d\varepsilon_i^p$  — приріст інтенсивності пластичних деформацій;  $\varepsilon_c^p$  — критичне значення пластичної деформації, що залежить від жорсткості напруженого стану, температури, неоднорідності матеріалу тощо.

Розглядалася прямолінійна ділянка трубопроводу, що має один зі стандартних розмірів і параметрів навантаження для технологічних трубопроводів АЕС: матеріал Сталь 20, зовнішній діаметр трубопроводу  $D = 630$  мм, товщина стінки  $s = 25$  мм, тиск  $P = 11,8$  МПа, температура  $T = 300$  °С. Розміри небезпечного дефекту стоншення стінки (ідеалізований дефект ЕКЗ напівеліпсоїдної форми) можуть бути наступними: довжина  $L = 2s = 50$  мм, ширина  $h = s = 25$  мм, глибина  $a = 20$  мм.

Обрано наступні розміри підсилюючих конструкцій. Зварна муфта: внутрішній діаметр  $D = 630$  мм, довжина  $L_b = 630$  мм, товщина  $W = s = 25$  мм. Зварна накладна латка: товщина  $W = s = 25$  мм, мінімальна відстань

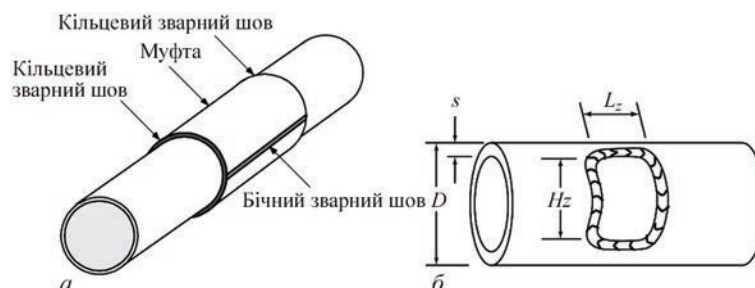


Рис. 1. Підсилення дефектної ділянки трубопроводу зварною муфтою (а) і накладною латкою (б)

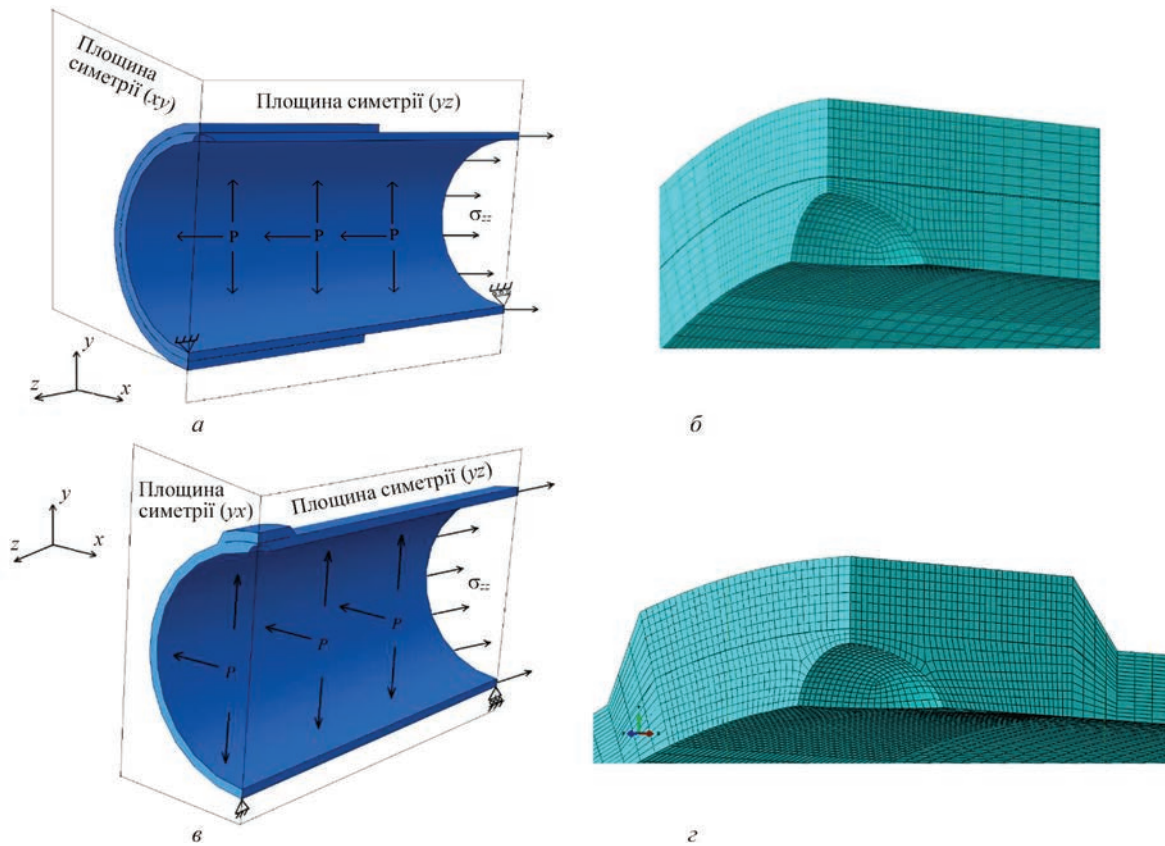


Рис. 2. Геометрична та скінченно-елементна моделі прямолинійної ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки та підсилюючою зварною муфтою (а, б) і зварною накладною латкою (в, г)

від краю дефекту стоншення до краю латки  $B = 70$  мм згідно з [3], довжина латки в окружному напрямку  $H_z = 190$  мм, в осьовому  $L_z = 240$  мм.

Результати розрахунків показали, що на розвантаження дефектної ділянки трубопроводу по різному впливає початковий зазор між трубопроводом і підсилюючою конструкцією (рис. 3, а, б).

У випадку зі зварною муфтою величина початкового зазору відіграє значну роль, оскільки підсилююча конструкція починає розвантаження дефектної ділянки трубопроводу лише після того, як цей проміжок буде вибраний трубопроводом внаслідок радіальної деформації. У той же час при використанні зварної накладної латки величина зазору не впливає на ефективність розвантаження дефектної ділянки. Але ефективність розвантаження при використанні зварної муфти в декілька разів вище, ніж при використанні зварної накладної латки.

Використання ремонтної зварної муфти та зварної накладної латки великої довжини не є доцільним, оскільки при зменшенні довжини до певного значення ефективність розвантаження не змінюється (рис. 4, а), а у випадку з муфтою при збільшенні лінійного розміру латки приріст інтенсивності пластичних деформацій від експлуатаційного навантаження в зоні стоншення стінки значно зростає (рис. 4, б). Для локального дефекту стоншення стінки оптимальна довжина підсилюючої муфти може дорівнювати половині діаметра

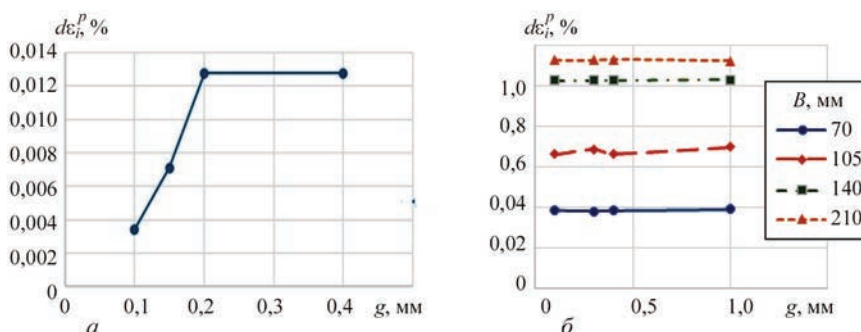


Рис. 3. Залежності максимальних значень приросту інтенсивності пластичних деформацій  $d\varepsilon_i^p$  від початкового проміжку між трубопроводом і зварною муфтою (а) та зварною накладною латкою розміру  $B$  (б)

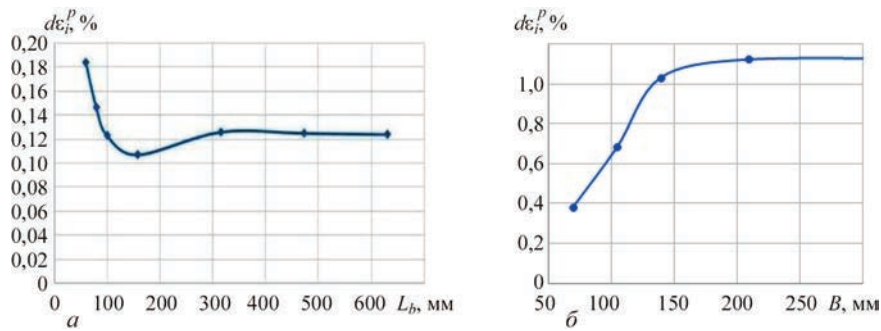


Рис. 4. Залежність максимальних значень приросту інтенсивності пластичних деформацій  $d\varepsilon_i^p$  в зоні дефекту трубопроводу від напівдовжини  $L_b$  зварної муфти (а) і розміру  $B$  накладних зварних латок (б)

трубопроводу, а для зварних накладних латок доцільно використовувати мінімально допустимі розміри, що зменшить витрати на матеріали та час ремонту.

Результати аналізу показали високу ефективність використання зварних муфт і зварних накладних латок. Кожна ремонтна конструкція має свої переваги та недоліки, а отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні впровадження на АЕС України альтернативних технологій ремонту трубопроводів.

1. Ворона Г.В., Ананченко М.С, Махненко О.В. (2023) Автоматизація процедури визначення допустимості ерозійно-корозійного зносу в трубопроводах АЕС. *Mech. Adv. Technol.*, 7(1), 113–121.
2. Milenin A., Velikoivanenko E., Rozyuka G., Pivtorak N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *Inter. J. of Pressure Vessels and Piping*, 171, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>.
3. ASME PCC-2–2018: *Repair of Pressure Equipment and Piping. An American national standard* (Revision of ASME PCC-2-2015).

## ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ ТА ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ЗВАРЮВАННІ МОНОКРИСТАЛІВ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Гах І.С.<sup>1</sup>, Задерій Б.О.<sup>1</sup>, Звягінцева Г.В.<sup>1</sup>, Черв'яков М.О.<sup>1</sup>, Карасевська О.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

<sup>2</sup>Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ

Із залученням комплексу розрахункових та експериментальних методик розглянуті особливості кінетики пружно-деформованого стану, структурних перетворень і схильності до утворення тріщин при зварюванні електронним променем (ЕПЗ) монокристалів жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) у залежності від вихідної кристалграфічної орієнтації. Визначено ступінь небезпеки зварювальних напружень. Показано, що зварювальні напруження можуть досягати або перевищувати величину границі плинності сплаву відповідної кристалграфічної орієнтації.

З позиції мінімізації зварювальних напружень для зменшення вірогідності появи типових поперечних тріщин і небажаних зерен іншої кристалграфічної орієнтації найбільш сприятливою є кристалграфічна орієнтація [001].

Зіставлення результатів розрахунків, металографічних, фактографічних досліджень і даних дифракційного рентгенівського та дифракційного у зворотні відбитих електронах (EBSD) аналізів дозволило встановити, що температура найбільш вірогідного утворення поперечних тріщин при ЕПЗ сплаву ЖС26 знаходиться в інтервалі 800...1200 °С. Визначено, що характерні поперечні тріщини, які виникають при ЕПЗ монокристалів ЖНС слід віднести до типу гарячих підсолідусних, що відповідають класифікації ДСТУ ISO/TR 25901-1:2024 (ISO/TR25901-1:2016, IDT).

Зроблено рекомендації щодо розробки конструкційних зварних вузлів із ЖНС з монокристалічною чи спрямованою структурою. При виборі кристалграфічної орієнтації з'єднання необхідно виконувати не тільки врахування характеристик міцності, а й пов'язаних з ними зварювальних напружень.

## FUNCTIONAL SILVER AND COPPER NANOCOATINGS ON MEDICAL IMPLANTS DEPOSITED BY THE EB-PVD METHOD

**Gornostai O.V., Khokhlov M.A., Stelmakh Y.A., Khokhlova J.A.**

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

One of the critical issues leading to postoperative complications and prolonged recovery time especially in patients with combat-related injuries accompanied by blood loss, systemic exhaustion, and immune suppression is bacterial contamination of implant surfaces. As a result, so-called prosthetic infections often require long-term antibacterial therapy and may necessitate implant removal. Existing prevention and treatment strategies are not always effective, highlighting the need for novel approaches to inhibit bacterial adhesion and biofilm formation on implantable medical devices.

The use of metal nanoparticles, particularly silver and copper, is a promising strategy due to their pronounced antimicrobial properties. Currently, several specialized PVD methods have been developed and are classified based on the energy source used. Among them, the electron beam method (EB-PVD) surpasses other technologies in terms of energy density, controllability, efficiency, and localized heating. EB-PVD also offers high material utilization efficiency up to 50 % when using a directional vapor flow source [1].

A key advantage of EB-PVD is the ability to deposit vapor-phase material directly onto solid, liquid, or powder carrier matrices, which minimizes nanoparticle aggregation. These matrices may include polymer precursors [2] or plant-based oils [3]. This approach enables the formation of pure silver and copper nanocoatings with particle sizes in the 10–40 nm range, which significantly enhances their biological activity and effectiveness in biomedical applications.

1. Gornostai, O., Khokhlov, M., Stelmakh, Y. et al. (2024) Increasing the productivity of EBPVD process for obtaining of Ag and Cu antimicrobial nanocoating on Mg-based alloy implants in osteosynthesis. In: *Proc. of 2024 IEEE 14th Inter. Conf. on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, Riga, Latvia, 2024, 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP62956.2024.10739760>
2. Savelyev, Yu., Gonchar, A., Movchan, B. O. et al. (2017) Antibacterial polyurethane materials with silver and copper nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 4(1), 87–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.196>
3. Minarchenko, V.M., Kutsyk R.V., Kovalska, N.P. et al. (2017) Effect of silver nanoparticles on the physical and chemical properties of plant oil sand the antimicrobial activity. *Biotechnologia Acta*, 10(6), 35–44. DOI: <https://doi.org/10.15407/biotech10.06.035>

## ОСОБЛИВОСТІ МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВАНТАЖЕНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ

Глуховський В.Ю., Литвиненко В.А.

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

Останнім часом у галузі моніторингу та технічного діагностування промислових об'єктів і виробів набувають популярності дистанційні методи неруйнівного контролю, одним з яких є тепловізійний, що дозволяє дистанційно та оперативно виявляти аномалії поверхневих температурних полів, які формуються під дією теплових потоків, що проходять крізь неоднорідності конструктивних шарів. Перевагами методу є дистанційність, висока інформативність, безпека контролюючого персоналу та можливість контролю без виведення об'єктів і виробів з експлуатації.

Для стаціонарних, нерухомих промислових об'єктів, до яких належать системи газоочищення газів, технологічні трубопроводи, котли, промислові димарі, вже існують певні напрацювання щодо їх дистанційної оцінки методом тепловізійного контролю. Проте оцінку стану металевих конструкцій на сьогодні, в основному, виконують контактними методами. І лише в окремих випадках застосовують дистанційний візуальний огляд засобами безпілотних систем, що свідчить про потребу в дистанційних діагностичних засобах і методах, особливо у випадку об'єктів підвищеної небезпеки, таких як мостові (опорні) та підвісні крани. Навантаження від кранів можуть бути значними, вони мають змінний динамічний характер і здійснюють суттєвий силовий вплив на конструкції виробничих будівель.

Аналіз особливостей роботи металевих конструкцій мостових кранів, які пропрацювали значний термін, показав, що дефекти в металоконструкціях можуть виникати внаслідок використання кранів не за призначенням, конструктивних недоробок і недоліків їх виготовлення та монтажу, а також внаслідок їх тривалої експлуатації. Руйнування металоконструкцій передусім пов'язано з циклічними навантаженнями в процесі експлуатації, які сприяють утворенню мікротріщин з їх поширенням та ростом.

Під час навантаження металоконструкції в місцях концентрації напружень може виникати пластична деформація, що супроводжується виділенням тепла. При цьому наявність зон пластичної деформації може не впливати на безпеку експлуатації всієї конструкції, що притаманно підйомним кранам, де концентраторами напружень виступають зварні шви та елементи стиків. Область пластичної деформації існує навіть при дуже малих напруженнях у товщі конструкції для випадку тріщиноподібних дефектів, внаслідок чого виникає процес тепловиділення.

Розповсюдження тепла в конструкції призводить до утворення складної форми температурного поля, фіксація якого дає змогу відновити розподілення тепла з джерела та визначити положення й розміри виявленого дефекту за допомогою розв'язку оберненої задачі нестационарної теплопровідності. Тому визначення осередків тріщиноутворень є основним напрямком моніторингу стану зазначених об'єктів.

Відомо, що підвищення температури металевого зразка в області пластичної деформації при розповсюдженні тріщини може досягати 70 °С, що дає змогу створити систему дистанційного моніторингу стану підйомних кранів методом тепловізійного контролю. Це вимагатиме кількісної оцінки збурення температурного поля під час навантажень за допомогою аналітичного розв'язку задачі нестационарної теплопровідності для заданої геометрії конструкції, де визначальними факторами мають виступати величина концентратора напружень та оптимальні умови навантаження металоконструкції.

## ВПЛИВ ТЕКСТУРИ ПОКРИТТІВ Co–Ni НА РІВЕНЬ ЇХ ДЕМПФУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ

Демченков С.О.<sup>1</sup>, Кулініч М.В.<sup>1</sup>, Клепко О.Ю.<sup>1</sup>, Поліщук С.С.<sup>2</sup>, Устінов А.І.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

<sup>2</sup>Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ

Амплітуду резонансних коливань окремих елементів складних механічних систем можна значно зменшити шляхом осадження на їх поверхню покриттів з високим рівнем демпфуючої здатності (ДЗ). Феромагнітні сплави, наприклад системи Co–Ni, розглядають як перспективні матеріали для створення на їхній основі таких покриттів через високий рівень ДЗ, обумовлений незворотним переміщенням границь магнітних доменів під дією знакозмінних механічних напружень. Разом з тим, рівень ДЗ феромагнітних покриттів визначається не тільки їх хімічним складом, але й характеристиками мікроструктури. Зважаючи на це, при розробці технології отримання таких покриттів важливо встановити взаємозв'язок між параметрами процесу осадження, характеристиками мікроструктури матеріалу покриття та рівнем їх ДЗ.

У роботі на прикладі високодемпфуючого сплаву Co–35Ni (ат. %) проведено дослідження впливу параметрів електронно-променевого осадження на характеристики мікроструктури покриттів і рівень їх ДЗ. Покриття Co–35Ni отримували на титанових пластинах VT6 у вакуумі при температурах осадження в діапазоні 450...750 °С. Мікроструктуру покриттів досліджували методами скануючої електронної мікроскопії та рентгенівської дифрактометрії. Рівень власних значень ДЗ матеріалу покриття розраховували виходячи з амплітудних залежностей ДЗ пластин з покриттям і пластин без покриття.

Встановлено, що рівень ДЗ матеріалу покриттів у залежності від амплітуди коливання зростає майже лінійно, а нахил кривої збільшується з підвищенням температури осадження (рис. 1). Мікроструктура покриттів, незалежно від температури осадження, має стовбчасті зерна, поділені на домени паралельними границями двійників по площині (111) (рис. 2). Методами рентгенівської дифрактометрії встановлено, що при підвищенні температури осадження кристалграфічна орієнтація стовбчастих зерен змінюється. При температурах осадження нижче за 600 °С формуються стовбчасті зерна, орієнтовані переважно в напрямку <110> (рис. 3, а), а при температурах вище за 600 °С — переважно в напрямку <100> (рис. 3, б). У зернах, орієнтованих у напрямку <110>, границі двійників нахилені до осі зерна під кутами 35° або 90°, а у випадку зерен, орієнтованих в напрямку <100> — під кутом 55°.

скільки при зміні орієнтації стовбчастих зерен у покритті з <110> на <100> орієнтація границь двійників по відношенню до напрямку дії напружень стає більш сприятливою (фактор Шмідта збільшується), це буде сприяти збільшенню об'ємної долі зерен, в яких досягається критичний рівень напружень зсуву в площині двійникування. Враховуючи, що розсіяння механічної енергії в цих матеріалах пов'язують з незворотним переміщенням границь двійникових (магнітних) доменів під дією зовнішніх напружень, прийшли до висновку, що підвищення рівня ДЗ матеріалу покриття при зміні типу його аксіальної текстури з <110> на <100> обумовлено збільшенням об'ємної долі зерен, в яких переміщення границь доменів під дією напружень критичної величини стає можливим.

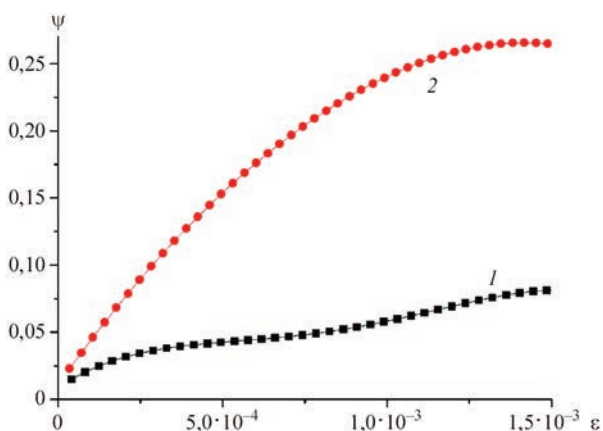


Рис. 1. Амплітудна залежність ДЗ матеріалу покриття Co–35Ni, осадженого при температурі 450 °C (1) і 750 °C (2)

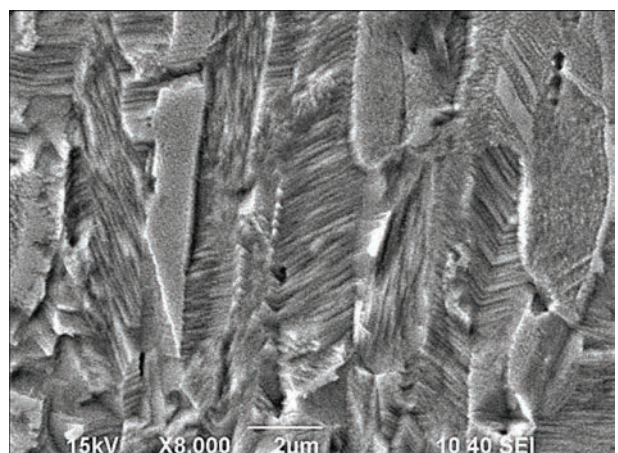


Рис. 2. Мікроструктура поперечного перерізу покриття Co–35Ni, осадженого при температурі 750 °C

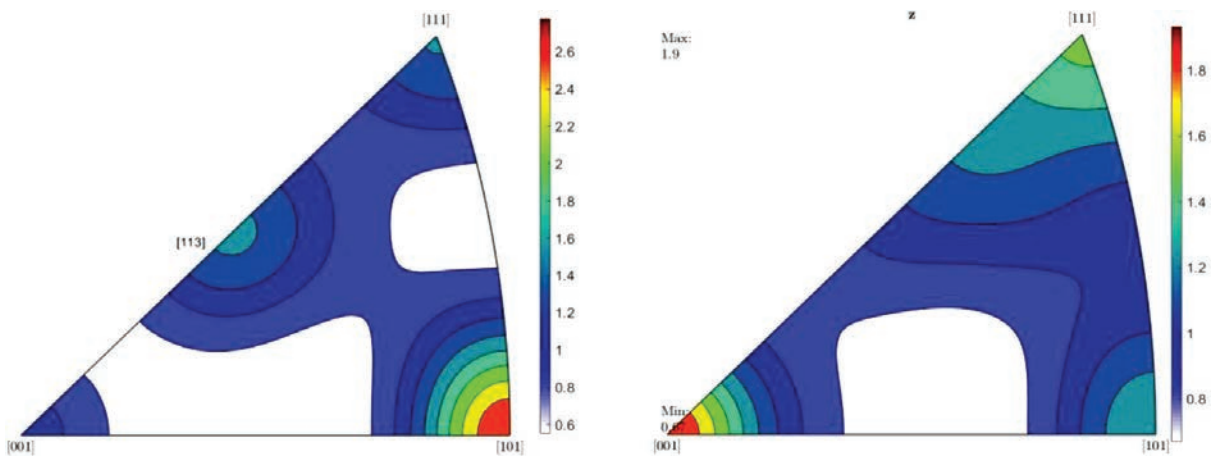


Рис. 3. Обернені полюсні фігури покриттів Co–35Ni, осаджених при температурі 450 °C (а) і 750 °C (б)

Таким чином, збільшення нахилу амплітудної залежності рівня ДЗ матеріалу покриття при збільшенні температури осадження може визначатися, головним чином, зміною домінуючого типу аксіальної текстури покриття з  $\langle 110 \rangle$  на  $\langle 100 \rangle$ . Для забезпечення високого рівня ДЗ матеріалу покриття умови його осадження повинні сприяти збільшенню в ньому об'ємної долі текстурної компоненти  $\langle 100 \rangle$ .

## ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ Cu–Fe З ВИСОКОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Демченков С.О., Устїнов А.І., Мельниченко Т.В.**

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

Проблема ефективного захисту від впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) є критично важливою як у цивільній сфері, так і в оборонно-безпековому секторі. Особливої гостроти ця проблема набуває для України в контексті сучасних тенденцій розвитку оборонних технологій і методів ведення бойових дій: електроніка бойових безпілотних апаратів, засоби зв'язку, розвідувальні системи — усе це потребує захисту від зовнішнього електромагнітного впливу. Саме тому існує потреба в надійних, ефективних і технологічно доступних екранах для захисту від ЕМВ у широкому діапазоні частот. На сьогодні захисні екрани виготовляють із широкого спектру матеріалів, екрануюча дія яких базується на механізмах поглинання та розсіювання ЕМВ. Показано, що тонка фольга із матеріалу з високою електропровідністю (наприклад, чиста мідь, срібло) за рахунок скін-ефекту забезпечує повне відбивання ЕМВ надвисокої частоти (у діапазоні ГГц), а при низьких частотах — більш ефективні магнітні матеріали (сплави на основі Fe, Co, Ni) за рахунок поглинання магнітної складової. Особливу увагу дослідників привертають матеріали на основі вуглецю, для яких характерним є значне поглинання ЕМВ в обмеженому діапазоні частот.

Для створення екрану з високою ефективністю екранування в широкому діапазоні частот ЕМВ (від кГц до ГГц) перспективним є застосування композитних матеріалів, компоненти яких здатні забезпечити реалізацію різних механізмів послаблення енергії. З цієї точки зору, особливу увагу привертають композитні матеріали на основі незмішуваної системи Cu–Fe, компоненти якої поєднують високу електропровідність (мідь) і феромагнітні властивості (залізо). Проте виготовлення композитів системи Cu–Fe традиційними металургійними технологіями пов'язане зі значною складністю технологічного процесу. Незмішуваність компонентів, різна пластичність і схильність до фазового розшарування суттєво обмежують можливості виготовлення тонкої фольги Cu–Fe з різним типом композитної структури шляхом сплавлення або спікання основних компонент з наступною прокаткою та термомеханічною обробкою заготовок.

У той же час, технологія електронно-променевого випаровування та фізичного осадження у вакуумі (ЕВ-РВД) дозволяє формувати безпосередньо із парової фази композити системи Cu–Fe у вигляді тонкої фольги або покриттів, нанесених на підкладки різної конфігурації (у тому числі гнучкі полімери, вуглецеві тканини тощо). Окрім того, технологія ЕВ-РВД дозволяє формувати різні типи композитів (шаруваті, матрично-дисперсні, біметалеві, градієнтні, пористі тощо), а також варіювати вміст компонентів у широких концентраційних межах і товщину конденсату (від кількох мікронів до сотень мікронів).

У роботі, застосовуючи різні схеми технологічного процесу ЕВ-РВД, були отримані вакуумні конденсати у вигляді відокремленої фольги (завтовшки від 20 до 200 мкм) з двома типами композитної структури: матрично-дисперсною та шаруватою (рис. 1).

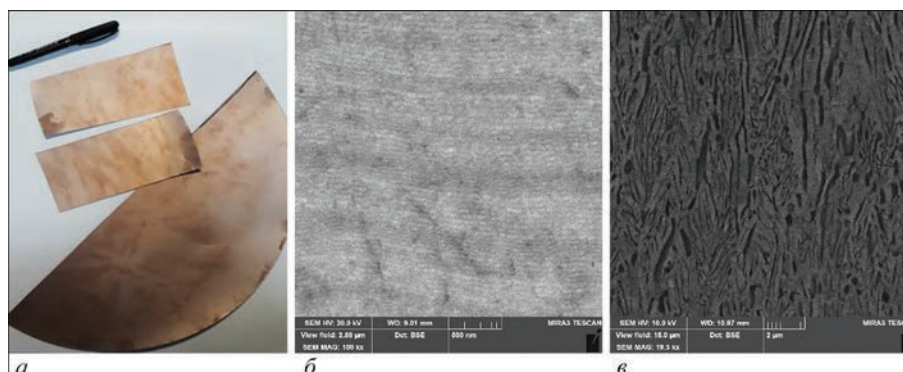


Рис. 1. Загальний вигляд вакуумного конденсату Cu–Fe у вигляді фольги (а) та різні типи композитної структури отриманих конденсатів: шарувата (б), матрично-дисперсна (в)

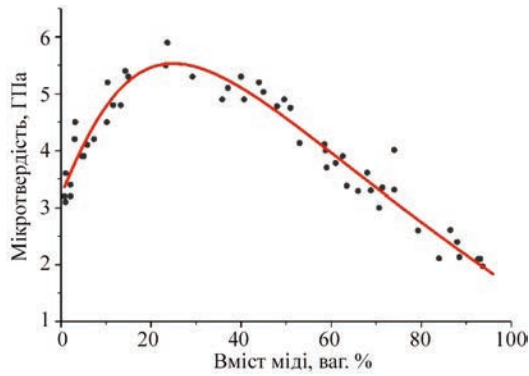


Рис. 2. Залежність мікротвердості вакуумних конденсатів Cu–Fe від хімічного складу

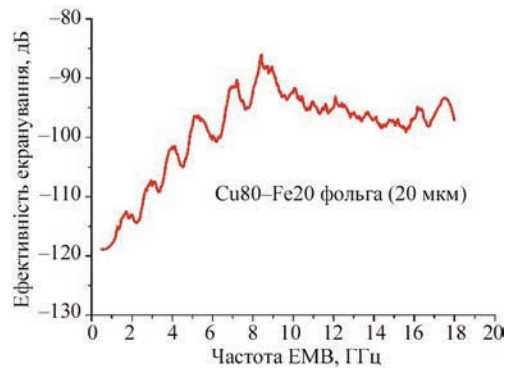


Рис. 3. Частотна залежність ефективності екранування ЕМВ композитною фольгою Cu80–Fe20, отриманою методом EB-PVD

Змінюючи співвідношення інтенсивності випаровування зливків-мішеней, були отримані вакуумні конденсати в концентраційному діапазоні від Cu90–Fe10 до Cu10–Fe90 (ваг. %). Встановлено, що виготовлені композити мають високі значення механічних характеристик (рис. 2) та ефективності екранування ЕМВ (рис. 3).

Отримані результати слугуватимуть науковими засадами розробки технології виготовлення захисних екранів, які забезпечуватимуть високу ефективність екранування ЕМВ у широкому діапазоні частот у поєднанні з високою міцністю та пластичністю.

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ І КОНТРОЛЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Драченко М.П.

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

Енергоефективність у зварюванні — це комплексний підхід, що містить вибір сучасного устаткування, оптимізацію режимів, використання якісних витратних матеріалів і навчання персоналу. Вона дозволяє не лише скорочувати витрати, але й підвищувати якість кінцевої продукції. У зв'язку з сучасними тенденціями щодо поліпшення енергозбереження [1, 2] у ІЕЗ ім. Є.О. Патона розглядається метод комплексного контролю зварювальних джерел живлення в сукупності з процесами електродуг. Запропонований метод повинен дозволяти олределять загальний коефіцієнт корисної дії джерела зварювального струму ДЗС (від живлячої мережі до зварювальної дуги), а також загальний енергетичний коефіцієнт використання ДЗС за певний проміжок часу (кількість спожитої електроенергії відносно встановленої потужності ДЗС). Запропонований метод припускає використання лічильників кількості електроенергії на вході [3] і виході [4] ДЗС. Це також дає можливість досліджувати взаємозв'язок між кількістю використаної електроенергії і кількістю наплавленого металу. Отримані в результаті таких досліджень параметри можуть визначати узагальнену енергоефективність досліджуваних ДЗС, а також міру їх використання в сукупності з різними електродуговими зварювальними процесами.

1. Лебедев В.А. (2007) Оценка затрат энергии при механизированной дуговой сварке плавящимся электродом. *Электротехника и электромеханика*, 6, 48–51.
2. [https://ozlib.com/924976/prochee/ekonomiya\\_elektroenergii\\_elektrosvarochnyh\\_us](https://ozlib.com/924976/prochee/ekonomiya_elektroenergii_elektrosvarochnyh_us)
3. <https://satecuk.com/?srsltid=AfmBOooBDmFK6I7NhuH39s2iNh7jqKtNyrVjYzihCRghmPrNZJ3aaFQ4>
4. <https://www.wbsensor.com/showroom/dc-measuring-device-dc-used-in-ev-charger-dc-smart-meters.html>

## INNOVATIVE FABRICATION OF HIGH ENTROPY ALLOY VIA WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

**Ji Junwen<sup>1</sup>, Zavdoveev Anatoliy<sup>2</sup>, Kopylov Viacheslav<sup>1</sup>, Klapatyuk Andrej<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv*

*<sup>2</sup>Department of Welding Production (WPP), E.O. Paton Institute of Materials Science and Welding,  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*

High-entropy alloys (HEAs) represent a modern category of materials formed through a multi-component approach, wherein alloying elements are combined to create a supersaturated solid solution. HEAs typically consist of equal proportions of these elements. Notably, these materials exhibit outstanding mechanical characteristics, including high strength, ductility, corrosion resistance, and wear resistance.

Integrating Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) with High-Entropy Alloys (HEAs) presents numerous benefits. Foremost among these advantages is the ability to efficiently and cost-effectively produce large-scale components. To successfully implement WAAM for HEAs manufacturing, a crucial component is the presence of a filament with a specific chemical composition, such as a welding wire. While for softer HEAs like Cantor alloys, solid wire or multi-component wire cords can be utilized, the challenge arises with high-hardness alloys where fabricating a solid wire with the required composition becomes impractical. Addressing this intricate technological challenge forms the focal point of the current study.

The proposed method revolves around Gas Metal Arc Welding (GMAW) employing Metal Powder-Cored Wires (MPCW). These wires are filled with powder components in equal proportions to each other. This approach offers several advantages compared to alternative methods such as vacuum or argon-plasma melting, primarily due to its dominance in the molten volume of the workpiece. The evolution of this method is elaborated upon using a high-hardness eutectic high-entropy FeCoNiAl alloying system doped with Ta as a case study. The resulting WAAMed alloy exhibits nearly zero plasticity, a characteristic that becomes pronounced following a specialized heat treatment procedure.

## ТЕХНОЛОГІЇ СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ЧЕРЕЗ ПЕРЕХІДНИЙ ЕЛЕМЕНТ

**Зяхор І.В., Левчук А.М., Шило Ю.А., Гущин К.В., Завертанний М.С., В.В. Кольцов**  
*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

Способи зварювання тиском (ЗТ) успішно використовуються для нероз'ємного з'єднання різних металів і сплавів. Однак існує значна кількість сполучень матеріалів, при безпосередньому зварюванні яких не забезпечується одержання якісних з'єднань або виникають проблеми утворення крихких прошарків при термічній обробці виробів. Для вирішення цієї проблеми при способах ЗТ розроблено технологічні рішення, які ґрунтуються на використанні перехідного елементу (ПЕ) з інших металів і сплавів. При відповідному виборі матеріалу ПЕ забезпечується формування якісних з'єднань, які не втрачають свої властивості в процесі експлуатації зварного вузла.

Аналіз наукових публікацій і практичного досвіду показує, що ПЕ при ЗТ може виконувати декілька функцій, а саме: «бар'єрну» (запобігання утворенню крихких прошарків внаслідок дифузії легуючих елементів), «активаційну» (інтенсифікація дифузійних процесів та активація поверхонь для утворення якісного з'єднання), «інтенсифікації нагрівання» (локалізація процесу виділення тепла в зоні контакту при ЗТ сплавів зі значною теплопровідністю), «деформаційна» (інтенсифікація пластичної деформації зсуву при ЗТ матеріалів, що важко деформуються). В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України на основі результатів багаторічних досліджень розроблено низку технологій ЗТ із використанням ПЕ.

Так, при виготовленні залізничних хрестовини виконується контактне стикове зварювання (КСЗ) оплавленням осердя зі сталі 110Г13Л з рейками із перлітної сталі евтектоїдного складу через ПЕ із аустенітної хромонікелевої сталі 08Х18Н10Т («бар'єрна функція» ПЕ). Заміна рейок М76 зі сталей мартенівського виробництва на рейки К76Ф із конверторної сталі вимагала вдосконалення технології КСЗ оплавленням для забезпечення дозованого енерговкладення в комбіноване зварне з'єднання для запобігання його окрихчуванню. Проблему вирішували шляхом застосування технології КСЗ пульсуючим оплавленням, яка забезпечує дозоване енерговкладення та можливість реалізації заданих термічних циклів для запобігання утворенню крихких структурних складових у комбінованому з'єднанні 110Г13Л/08Х18Н10Т/К76Ф. Встановлено, що термічний цикл КСЗ другого стику (при заданій величині енерговкладення) може призводити до нагрівання сталі К76Ф у зоні з'єднання першого стику до температури нижче або вище за температури структурних перетворень у залежності від ширини ПЕ зі сталі 08Х18Н10Т. Тому важливим при виготовленні хрестовини є забезпечення заданих значень величини енерговкладення та ширини ПЕ для контрольованого нагрівання другого стику комбінованого з'єднання й гарантування отримання регламентованої перлітної структури заданої дисперсності (сорбіт, троостит) у першому стику з боку рейкової сталі К76Ф.

При КСЗ оплавленням алюмінієвих сплавів запропоновано технологічну концепцію використання ПЕ із матеріалу з високим омичним опором для інтенсифікації процесу попереднього нагріву заготовок. Розрахунковим шляхом та експериментально підтверджено ефективність процесу попереднього нагріву опором при КСЗ товстостінних деталей із алюмінієвого сплаву 2219 завдяки використанню ПЕ (багаторазової проміжної вставки зі сталі 12Х18Н10Т або титангу). У якості критерію ефективності нагріву опором вважали досягнення заданої температури в характерних точках деталей – у зоні контакту таї на відстані 30 мм від торців деталей за найменший час при заданому значенні щільності струму  $J$ . Встановлено суттєве зростання градієнта температурного поля в деталях при нагріві через ПЕ: температура в зоні контакту при  $J = 12,5 \dots 15$  А/мм<sup>2</sup> складала  $T = 300 \dots 420$  °С у порівнянні з  $T = 180 \dots 270$  °С при нагріві без ПЕ. Вказаний результат важливий для стабільності наступного етапу КСЗ оплавленням і гарантує відсутність дефектів зварювання при суттєво меншій потужності джерела живлення зварювальної машини.

Запатентовано технічне рішення, що полягає у використанні при ЗТ однорідних і різнорідних сполучень матеріалів ПЕ, який перед зварюванням розташовують у заглибленні форми однієї із заготовок.

Проводили експерименти із ЗТ заготовок діаметром 18 мм зі сталі 20 через локальний ПЕ зі сталі 12Х18Н10Т, розміщений у центральній частині перерізу заготовок. Попередньо до зварювання в центрі поперечного перерізу однієї із заготовок співвісно її осі виконували заглиблення, площу поперечного перерізу якого задавали в діапазоні 0,05...0,5 від площі перерізу заготовок. У заглибленні урівень торцевої поверхні заготовки закріплювали перехідний елемент зі сталі 12Х18Н10Т. Після цього виконували ЗТ із заданим припуском на осадку. Дослідженнями встановлене явище, яке полягає в тому, що в процесі ЗТ пластифікований матеріал ПЕ із центральної частини перерізу заготовок при своєму переміщенні в напрямку периферійної частини відтісняє приконтатні об'єми металу сталі 20 у радіальному напрямку та одночасно – в осьовому напрямку углиб заготовок. При досягненні деякої величини осьової деформації заготовок зона контакту заготовок формується тільки з матеріалу ПЕ, а саме зі сталі 12Х18Н10Т. За результатами досліджень розроблено технологію зварювання тертям жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) через локальний ПЕ із деформованого ЖНС.

Для нероз'ємного з'єднання сплавів, які значно відрізняються за своїми механічними та теплофізичними властивостями, розроблено технологію ЗТ через ПЕ, особливість якої полягає в поєднанні операцій виконання заглиблення та закріплення перехідного елемента. Ці дві операції виконують одночасно методом ЗТ першої заготовки та заготовки із матеріалу перехідного елемента, який має більший коефіцієнт теплопровідності в порівнянні з матеріалом першої заготовки. При металографічних дослідженнях з'єднань, отриманих за розробленою технологією ЗТ, встановлено, що забезпечується повне заповнення матеріалом ПЕ всього перерізу заготовок у вигляді суцільного прошарку. Товщина ПЕ становить до 500 мкм, що забезпечує можливість реалізації ефекту контактного зміцнення зварних з'єднань.

## **БІОСУМІСНІ ПОКРИТТЯ З АНТИБАКТЕРІАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ, ОТРИМАНІ МЕТОДОМ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ**

**Калюжний С.М.<sup>1</sup>, Максимов С.Ю.<sup>1</sup>, Войнарович С.Г.<sup>1</sup>, Кислиця О.М.<sup>1</sup>,  
Теплюк В.М.<sup>1</sup>, Свірідова І.С.<sup>1</sup>, Ульянович Н.В.<sup>2</sup>, Коломієць В.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

<sup>2</sup>*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ*

Досліджено процес створення методом мікроплазмового напилення (МПН) біосумісних покриттів на основі гідроксиапатиту, легованого сріблом (ГАП–Ag), для титанових імплантатів. Проаналізовано вплив технологічних параметрів МПН (сила струму, витрата плазмоутворюючого газу, дистанція напилення, розмір частинок порошку) на ступінь розплавлення частинок, морфологію поверхні та фазовий склад покриттів. Встановлено, що оптимізація режимів МПН дозволяє керувати процесом термічного розкладання ГАП + Ag та співвідношенням кристалічної та аморфної фаз під час формування покриття.

Експериментально підтверджено виражену антибактеріальну активність отриманих покриттів щодо грамнегативних (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*) та грампозитивних (*Staphylococcus aureus*) мікроорганізмів. Спостерігалось повне пригнічення росту *E. coli* та значне зниження життєздатності інших тест-культур *S. aureus* (до 46,6 %) і *P. aeruginosa* (до 39,5 %).

Встановлено, що при використанні підшару з цирконію адгезійна міцність покриттів перевищує 15 МПа, що відповідає вимогам до покриттів на імплантатах (згідно зі стандартом ISO 13779-2). Такий результат свідчить про ефективність проміжного цирконієвого шару для забезпечення оптимального зчеплення біокерамічного покриття з титановою основою.

Таким чином, метод мікроплазмового напилення підтвердив свою ефективність як перспективна технологія формування бактерицидних біосумісних покриттів для титанових імплантатів. Отримані шари покриттів мають високі показники міцності зчеплення та виражений антибактеріальний ефект, що забезпечує підвищення надійності, довговічності та біосумісності деталей імплантатів.

Роботу виконано в межах проекту «Розробка інноваційних біосумісних антибактеріальних покриттів та технології їх нанесення на ортопедичні імплантати для застосування при лікуванні травм у військовослужбовців та цивільних громадян» за грантової підтримки Національного фонду досліджень України (договір № 032/0070 від 03.03.2025, конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України»).

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРНОЇ БУДОВИ НЕРОЗНІМНИХ З'ЄДНАНЬ НАДПРУЖНИХ НІТИНОЛОВИХ ДРОТІВ, ОТРИМАНИХ ДУГОВИМ І КОНДЕНСАТОРНИМ ЗВАРЮВАННЯМ

**Квасницький В.В., Зворикіна А.К., Зворикін Л.О., Зворикін К.О.**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ*

У сучасному приладобудуванні при виготовленні виробів спеціального призначення, у медицині та інших галузях промисловості все ширше використовуються сплави з ефектом пам'яті форми (SMA). Їх особливістю є здатність до відновлення заздалегідь заданої форми при нагріванні до певної температури попередньо деформованого виробу (пам'ять форми). Важливою властивістю таких сплавів є також прояв значної пружної деформації, яка перевищує величину, характерну для більшості інших металів та сплавів (надпружність).

Здатність матеріалу відновлювати початкову форму зумовлена фазовим переходом аустеніт→мартенсит→аустеніт, який відбувається в певному температурному діапазоні. Суть цього ефекту полягає в тому, що під час деформації під дією механічних напружень відбувається термопружний перехід аустеніт–мартенсит, а при знятті навантаження або підвищенні температури настає зворотний перехід мартенсит–аустеніт, що супроводжується відновленням початкових розмірів і форми матеріалу.

Для успішного створення конструкцій із використанням матеріалів з ефектом пам'яті форми необхідно отримувати нерознімні з'єднання елементів із цих матеріалів. Традиційними способами виконання таких з'єднань є зварювання або паяння. Однак під дією термічного циклу нагрівання відбуваються зміни структурно-фазової будови зони термічного впливу та зварного шва, що впливає на ступінь відновлення форми та пружні властивості отриманих нерознімних з'єднань. Таким чином, дослідження спрямовані на встановлення закономірностей впливу параметрів режиму та умов формування з'єднань на їх структурну будову та фазовий склад, є актуальними.

Основними проблемами, що виникають під час утворення нерознімних з'єднань нітинолу методами зварювання, є зміни елементного та фазового складу, а також мікроструктури матеріалу в області зварного шва та зоні термічного впливу (ЗТВ). Це спричиняє зміну параметрів фазових переходів, які забезпечують прояв ефекту пам'яті форми, і, відповідно, різний ступінь його реалізації в металі зварного з'єднання. Додатковим негативним чинником є утворення крихких інтерметалідів, поблизу яких наявні деформаційні напруження можуть стабілізувати термопружний мартенсит, що обмежує повне відновлення форми. Утворення інтерметалідів  $Ti_2Ni$  та  $TiNi_3$  у нітинолі після зварювання має практично незворотний характер, що призводить до локальної зміни співвідношення титану й нікелю та, відповідно, до зміни ступеня прояву ефекту пам'яті форми.

У роботі досліджували вплив параметрів режиму та умов формування з'єднань тонкого дроту з нітинолу на їх структурну будову, фазовий склад і здатність поновлювати форму при за умови застосування дугових джерел зварювального нагріву (TIG, PAW зварювання) та конденсаторного імпульсного зварювання. Особливістю процесів дугового зварювання було використання для нагрівання зразків електричної дуги опосередкованої (непрямої) дії.

Експериментальна частина дослідження полягала у створенні нерознімних з'єднань тонких дротів зі сплаву нітинол. Для цього використовували дроти діаметром 0,8 та 2,4 мм. З'єднання виконували способами дугового зварювання неплавким електродом у середовищі інертного газу (TIG) та мікроплазмового зварювання (PAW). Як захисний та плазмоутворюючий газ застосовували аргон найвищої чистоти ( $Ar > 99,993$  об. %) виробництва компанії Linde. Під час зварювання зразків способом TIG величина зварювального струму була в межах 21...23 А, напруга дуги 13...14 В, витрати захисного газу аргону 10...13 л/хв., час нагріву 1...3 с. Для покращення захисту металу зварювальної ванни та ЗТВ використовували газову лінзу. Мікроплазмового зварювання, залежно від застосованого обладнання, здійснювали на струмі плазмової дуги 18 та 7 А при напрузі 14 та 46 В відповідно. Витрати плазмоутворюючого газу 4...5 л/хв., захисного 7...8 л/хв. Час нагріву 1...2 с.

Конденсаторне імпульсне зварювання виконували на машині для точкового конденсаторного зварювання трансформаторного типу ТКМ-15У4. Рекомендовані параметри режиму конденсаторного імпульсного зва-

рювання: ємність батареї конденсаторів 600...1000 мкФ; напруга зарядки конденсаторів 600 В; кількість витків дроселя 80 шт.; зусилля стиснення електродів ~ 30 Н; коефіцієнт трансформації зварювального трансформатора 100.

Металографічний та мікрорентгеноспектральний аналізи отриманих з'єднань здійснювали за стандартними методиками. Попередньо запресовані в бакелітові шайби зразки з'єднань із нітинолового дроту механічно шліфували та полірували до шорсткості  $Rz \sim 0,2$  мкм. Потім поверхню зразків піддавали хімічному травленню.

Дослідження зразків проводили з використанням скануючого електронного мікроскопа TESCAN VEGA 3 з енергодисперсійним рентгенівським аналізатором з детекторами SE, BSE, EDS. Для визначення механічних властивостей здійснювали механічну фіксацію області зварного з'єднання з подальшим відхиленням одного з дротів на кут  $30^\circ$  та вільним поверненням у вихідний стан. Відхилення та повернення повторювали 10 разів до руйнування зразка або до виникнення залишкової деформації, що перевищували  $4^\circ$ . Зразки, що успішно витримали перший цикл механічних випробувань, піддавалися подальшим дослідженням у режимі багаторазового відхилення та повернення — загалом 10 циклів — на кут  $60^\circ$  до моменту руйнування або появи залишкової деформації, що перевищувала  $4^\circ$ .

Попередній аналіз поверхні з'єднань, виконаних способом TIG-зварювання, не виявив макродефектів у матеріалі. Водночас було встановлено, що зона зі сторони зварного шва, найбільш віддалена від з'єднаних дротів, має структуру, відмінну від структури як основного матеріалу, так і самого зварного шва. У зовнішній зоні зварного шва фазові новоутворення з зернами 10..20 мкм виявлені лише на глибині до 15 мкм, тоді як приповерхневий шар до 200 мкм містить евтектичні структурні утворення. Евтектичні утворення в приповерхневій зоні містять до 6 % кисню, вказуючи на  $NiTi_2O$  та можливий  $Ti_2O$ . Металографічні структури дроту, шва та ЗТВ схожі, з наявними включеннями розміром 1...5 мкм. Зварні з'єднання отримані при збільшенні до 13 л/хв витраті аргону витримують багаторазове згинання на  $30^\circ$  та  $60^\circ$  без руйнування.

Аналіз поверхні зразків з'єднань, отриманих мікроплазмовим зварюванням (PAW), свідчить про наявність макродефектів матеріалу, зокрема макропор розміром 30...100 мкм. Приповерхнева ділянка зварного шва має структуру, що відрізняється від структури основного матеріалу. Товщина шару зі зміненою структурою сягає до 400 мкм. Елементний склад оксидних фазових утворень відповідає складу фаз  $NiTi_2O$ , які були виявлені в зразках після зварювання способом TIG із недостатнім ступенем захисту аргонем. Метал зварного шва та зони термічного впливу має металографічну структуру з точковими включеннями розмірами 1...5 мкм. Мікрорентгенівський аналіз ідентифікував нову фазу як  $Ti_2Ni$ . Механічні випробування показали, що за умови багаторазового згинання на кут  $30^\circ$  приблизно 30 % зварених з'єднань дротів руйнувалися, а всі з'єднання руйнувалися до досягнення кута  $60^\circ$ .

У зварних з'єднаннях, отриманих способом конденсаторного імпульсного зварювання, виявлено макродефекти, зокрема макротріщини розміром 150...250 мкм. Мікрорентгеноспектральний аналіз різних ділянок приповерхневого шару зварного шва показав наявність міді, що свідчить про перенесення матеріалу мідного електроду до зварного шва. У зоні зміненої структури не виявлено надлишкових фаз, окрім евтектичних зерен  $TiNi + TiNi_3$ . Не спостерігається змін щодо кількості та розміру включень  $Ti_2Ni$ . Отримані з'єднання мають незадовільні механічні властивості: при багаторазовому згинанні дротів на кут  $30^\circ$  відбувається їхнє руйнування. Крім того, наявність міді накладає додаткові обмеження на застосування цього способу для отримання нерознімних з'єднань із нітинолу, особливо для виробів медичного призначення.

Дослідження проведені за фінансування НФДУ з виконання наукового дослідження та розробки на 2025 рік № 2023.04/0074 «Прецизійне з'єднання для виготовлення елементів медичних біосумісних імплантів» згідно з Договором № 58/0074 від 03 березня 2025 р.

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ GMAW-CMT/PULSE І PAW-CW СПОСОБІВ WAAM НАПЛАВЛЕННЯ ТА СКЛАДУ ЗАХИСНОГО ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРУКОВАНИХ ЗВАРНИХ ВИРОБІВ

Квасницький В.В.<sup>1,2</sup>, Лагодзінський І.М.<sup>1,2</sup>, Чорний А.В.<sup>1</sup>, Черній В.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

<sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Для дугових процесів пошарового наплавлення характерною є досить значна нерегулярність (хвилястість) поверхні, що отримана пошаровим наплавленням. На геометричну точність і нерівномірність поверхні кожного наплавленого шару впливає багато взаємозв'язаних параметрів: режим наплавлення (струм, напруга дуги, швидкість подачі дроту та переміщення пальника), напрямок траєкторії при генеруванні наступного шару та спосіб і метод подачі зварювального струму (Pulse/CMT — імпульсна подача струму або з короткими замиканнями, PAW-CW — спосіб наплавлення з холодним дротом). Також важливим параметром впливу є склад захисної газової суміші. Суттєвий вплив на нерівномірність поверхні має теплопровідність кожного конкретного газу суміші. Також склад захисного газу суттєво впливає на ступінь іонізації дугового проміжку та, як наслідок, на стабільність горіння електричної дуги. Важливою характеристикою отриманих заготовок виробів є величина нерівномірності сформованої поверхні, що вимагає введення необхідного припуску на її обробку для отримання готового виробу.

Особливістю перебігу GMAW-CMT процесу (металоперенос з короткими замиканнями) є явище розбрикування металу в процесі наплавлення. Однак зі зміною складу газової суміші змінюється теплопровідність газового середовища та, як наслідок, рівень тепловкладення у зварювальну ванну. Заміна захисної газової суміші M21 (Ar + 18 % CO<sub>2</sub>) на M11 (Ar + 2 % CO<sub>2</sub>) сприяє зменшенню ефективної ширини кожного окремого наплавленого валика з 3,9 мм при M21 до 3,6 мм при застосуванні M11 та збільшенню ефективної висоти окремих валиків з 1,3 мм при M21 до 1,5 мм при M11. З точки зору якості утвореної поверхні, зміна газової суміші M21 на M11 призводить до суттєвого збільшення показників нерівномірності поверхні, про що свідчать значення середньої нерівномірності профілю 2,34 та 2,6 мм відповідно. Враховуючи низьку теплопровідність аргону (Ar), при зменшенні частки вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) з більшою теплопровідністю, у комбінації зі зменшеним тепловкладенням GMAW-CMT процесу, час існування зварювальної ванни зменшується. Це призводить до зменшення обсягу переплавленого металу попередніх шарів і нерівномірного розтікання металу зварювальної ванни з наступною кристалізацією. Такий механізм впливу теплопровідності газового середовища пояснює взаємозв'язок між ефективною висотою, шириною та нерівномірністю бокових поверхонь наплавлених шарів. З використанням імпульсної подачі зварювального струму (метод Pulse) також спостерігається чітка залежність ефективної висоти стінки (0,98 мм — M21, 1,13 мм — M11) від складу застосованої газової суміші. Результати схожі з GMAW-CMT процесом. Цікавою є залежність ефективної товщини стінки від складу газового середовища. Так, на відміну від GMAW-CMT процесу, застосування суміші M11, викликає збільшення ефективної товщини виготовленої стінки на 10...11 % (до 5 мм) у порівнянні з використанням суміші M21 (до 4,8 мм) з одночасним збільшенням нерівномірності профілю від 3 до 3,35 мм. Як і у випадку з ефективною висотою, це пов'язано зі значним зменшенням втрат металу на розбрикування при зменшенні частки вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) у складі газової суміші.

Окрім впливу на геометричну форму валиків, різні газові суміші впливають на формування структури наплавленого металу та його мікротвердість. При наплавленні низьковуглецевих сталей (G3Si1 — аналог 09Г2С) GMAW-CMT/Pulse та PAW-CW методами, формується щільна структура металу, з дисперсними неметалевими включеннями оксидів і силікатів округлої форми, що рівномірно розподілені по всьому перерізу наплавленого металу. На окремих ділянках спостерігаються ланцюжки та компактні скупчення неметалевих силікатних включень. Розраховане усереднене значення мікротвердості зерен відрізняється на різних ділянках наплавленого металу та знаходиться в межах 1845 МПа для GMAW-CMT та 1790 МПа — для GMAW-Pulse процесу. PAW-CW спосіб пошарового наплавлення демонструє найменші показники мікротвердості —

до 1730 МПа. За результатами механічних випробувань усі наплавлені зразки зі сталі G3Si1 демонструють границю міцності на рівні 540...570 МПа. Наплавлений GMAW-CMT методом із застосуванням газової суміші M11 метал зразка демонструє більшу на 5...7 % (до 601 МПа) границю міцності у порівнянні з іншими зразками, однак має дещо меншу пластичність відносно інших варіантів отриманого наплавленого металу.

При виготовленні виробів дуговими способами пошарового наплавлення (GMAW-CMT/Pulse, PAW-CW) практично завжди присутня нерівномірність бокової поверхні готового виробу. Під час фінішної механічної обробки поверхні необхідне видалення зовнішнього шару задля отримання необхідних геометричних розмірів виробу. Для прогнозування коефіцієнту втрат металу виробів при механічній обробці використовують коефіцієнт втрат, що враховує відхилення профілю наплавленої поверхні відносно ефективної товщини шару з урахуванням циклічної повторюваності хвилеподібних виступів і западин (нерівномірності) окремих шарів. Зокрема PAW-CW та GMAW-CMT методи пошарового наплавлення із застосуванням захисної газової суміші M21 забезпечують найменші значення коефіцієнтів втрат при механічній обробці для низьковуглецевих сталей у межах 0,06...0,093 та 0,06...0,1 відповідно. Коефіцієнти втрат на обробку для інших комбінацій метод наплавлення-захисний газ знаходяться у межах 0,096...0,177.

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПЛАТФОРМА МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТІВ НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ І МОДЕЛЕЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

**Книш В.В., Мірянін В.М., Мальгін М.Г., Кот В.Г., Кадишев А.А.**

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

Інтелектуальна інформаційна платформа для оцінки міцності та надійності експлуатованих мостових споруд розробляється як нове рішення, що поєднує сучасні методи цифрового сканування, безпілотний моніторинг, великі мовні моделі та модулі комп'ютерного зору. Основна мета — перейти від фрагментарних обстежень і ручної звітності до безперервного циклу «збір даних – інтерпретація – формування висновків – управління експлуатацією», де кожна операція технологічно й семантично пов'язана з попередньою.

В основі платформи лежить цифровий двійник мосту, сформований із хмар точок, отриманих методами фотограмметрії або лазерного сканування. Така «3D модель» не лише відтворює геометрію споруди з високою деталізацією, але й слугує опорною просторовою основою для прив'язки всіх подальших спостережень, коментарів, фотографій і розрахункових результатів. Вона спрощує аналіз геометричних параметрів, формування тривимірної моделі та креслень, а також верифікацію відповідності фактичних розмірів проектним рішенням. Етап сканування базується на використанні комбінації стаціонарних і портативних камер, а також систем БПЛА. Дрони застосовуються переважно для зйомки, необхідної під час побудови хмар точок і текстур, що стають вихідними даними для цифрового двійника, а також для фотофіксації дефектів у важкодоступних місцях. Додатково розробляється функціонал побудови тривимірної геометричної моделі на основі хмари точок: об'єднання сканів, очищення та розрідження даних, виділення опорних ліній і площин, побудова поверхонь конструктивних елементів (балок, плит, діафрагм, опор). Хмара точок виступає «опорним шаром» 3D моделювання, забезпечуючи метричну точність і простежуваність від первинних даних.

Окремий напрям розробки — застосування великих мовних моделей (LLM) для фіксації дефектів і автоматизованого документування. Під час інспекції інженер не відволікається на ручне заповнення форм: голосом фіксує виявлені дефекти, уточнює їх локалізацію та передбачувану природу, паралельно робить знімки мобільним пристроєм і короткі відеоролики. Ці дані надходять до хмарного сервісу розпізнавання мовлення, а потім — до мовної моделі, яка автоматично виконує транскрипцію, нормалізує термінологію, зіставляє текст із шаблонами звітів і структурує інформацію за типами даних: таблиці спостережень, описи за зонами, посилання на медіа та листи з ілюстраціями. Завдяки прив'язці до ідентифікаторів зон цифрового двійника мосту забезпечується простежуваність ланцюга «3D вузол – коментар», що дозволяє під час подальших інспекцій швидко порівнювати стан елементів у часі й виявляти динаміку розвитку дефектів. Додатково використовується комп'ютерний зір на базі згорткових нейронних мереж (CNN), які виконують сегментацію та класифікацію дефектів безпосередньо за зображеннями.

Переваги підходу проявляються у скороченні часу обстежень і підготовки звітності, зменшенні впливу людського фактора та ранньому виявленні критичних змін. Науковий внесок полягає у зв'язаній архітектурі «цифровий двійник – потокові дані – LLM-документування – діагностика». У результаті формується відтворена методологія, придатна для масштабування на різні типи мостів і розширення на інші експлуатовані конструкції.

**ПІДВИЩЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ  
СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 15ХСНД,  
ЗМІЦНЕНИХ КОМБІНОВАНОЮ ОБРОБКОЮ  
ВИСОКОЧАСТОТНИМ ПРОКОВУВАННЯМ  
З МЕХАНІЧНИМ ЛЕГУВАННЯМ УЛЬТРАДИСПЕРСНИМ НІКЕЛЕМ**

**Книш В.В., Ткач П.М., Мальгін М.Г., Кот В.Г., Кадишев А.А.**

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

Одним із поширених видів руйнування зварних металоконструкцій тривалої експлуатації, які зазнають змінних навантажень, є втома. З метою запобігання впливу корозії зварні металоконструкції захищають лакофарбовим покриттям. При несвоєчасному відновленні захисного лакофарбового покриття відбувається порушення його цілісності й до дії механічних навантажень додається вплив корозійного середовища, що суттєво знижує проектний строк служби конструкції. З метою підвищення характеристик опору корозійній втомі зварних з'єднань експлуатованих металоконструкцій (з накопиченими втомними пошкодженнями) можуть застосовуватися різні методи поверхневого пластичного деформування металу, у тому числі й комбіновані. Одним із таких комбінованих методів є зміцнення металу зони сплавлення з'єднань технологією височастотної механічної проковки (ВМП) з одночасним застосуванням механічного легування ультрадисперсним нікелем.

Проведено втомні випробування у 3 % розчині NaCl зразків стикових зварних з'єднань низьколегованої сталі 15ХСНД з накопиченими втомними пошкодженнями, які зміцнювали технологією ВМП із застосуванням механічного легування ультрадисперсним нікелем. Зразки стикового зварного з'єднання розмірами 360×70×12 мм виготовляли автоматичним зварюванням під флюсом. Накочення 30 % частки втомних пошкоджень проводили при віднульовому циклічному розтягуванні з максимальними прикладеними напруженнями циклу 225 МПа. Після накопичення втомних пошкоджень зразки зміцнювали технологією ВМП з одночасним механічним легуванням зони переходу металу шва на основний метал. У подальшому зразки випробували на втому у 3 % розчині NaCl також при віднульовому змінному розтягуванні з максимальними напруженнями циклу 225 МПа з частотою 5 Гц до повного руйнування.

Експериментально встановлено, що залишкова циклічна довговічність стикових зварних з'єднань, зміцнених за комбінованою обробкою після накопичення 30 % втомних пошкоджень, у 3 % розчині NaCl збільшується в 6...10 разів у порівнянні з незміцненими з'єднаннями.

## **A-TIG WELDING OF STAINLESS STEEL UP TO 12 mm THICK WITH FULL PENETRATION**

**Kovalenko Dmytro**

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

It is known that the use of A-TIG welding (TIG welding over an activating flux layer) significantly increases the arc penetration capacity. One of the optimal applications of the A-TIG process is the welding of flat welded structures or pipes (including orbital ones) up to 6 mm thick.

The E.O. Paton Electric Welding Institute (PWI), in collaboration with AICHI SANGYO (Japan), conducted experimental studies of A-TIG welding of 10 mm thick 304 stainless steel. PATIG S-A activating flux in the form of an aerosol can (developed by the PWI) and FIBACK optical fiber backing tape (developed by AQUASOL CORP., USA) were used.

It was shown that when using automatic A-TIG welding of butt joints made of 10 mm thick stainless steel, it is possible to obtain high-quality welds in a single pass without edge preparation and with full penetration. The possibility of similar use of A-TIG welding for thicknesses of 12 mm was also demonstrated.

Compared to TIG welding, the use of the A-TIG process significantly increases the productivity of the welding process by 6–8 times. The possibilities of using the A-TIG process for welding various steels up to 12 mm thick appear to be very promising.

## ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ІМПОРТНОГО ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ ПЛАВКИМ МУНДШТУКОМ

**Козулін С.М., Міщенко Р.М.**

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

Відновлення деталей машин і механізмів, схильних до зношування в процесі експлуатації, — важливий спосіб економії матеріальних і трудових ресурсів у багатьох галузях промисловості України. Оскільки собівартість відновлення деталей становить 50...60 % від вартості їхнього виготовлення, збільшення обсягів відновлення деталей є реальним шляхом зниження витрат на ремонт машин і агрегатів. Особливе значення відновлення має при ремонті великогабаритних, коштовних деталей машин з великою вагою і технологічного устаткування імпортного виробництва.

Існуючі методи відновлення зубів великомодульних шестерень із застосуванням багатопрохідного електродугового наплавлення покритими електродами, механізованого в захисному газі та автоматичного під шаром флюсу не знайшли широкого застосування у зв'язку з низькою продуктивністю процесу, негарантованою якістю сплавлення присадного матеріалу з основним, небезпекою утворення міжшарових дефектів у вигляді неметалевих включень, пор, тріщин, викришування активних поверхонь зубів і т.і.

Відомо, що найбільші технічні можливості для підвищення продуктивності та якості ремонтних робіт має електрошлакове наплавлення плавким мундштуком (ЕШН ПМ), яке знайшло широке застосування при відновленні великогабаритних деталей машин, які експлуатуються у важкій, металургічній, енергетичній, цементній та інших галузях промисловості.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено науково обґрунтовану технологію та спеціальне технологічне оснащення для відновлення зношених евольвентних і пітчевих профілів зубів  $m = 18...50$  (висота зубів 40,5...112,5 мм), а також ґрунтозацепів башмаків. Суттєвою перевагою є те, що дана технологія та обладнання дозволяє у багатьох випадках виключити їх подальшу механічну обробку.

Досвід експлуатаційних випробувань показав, що відновлені шестерні, встановлені в привод повороту платформи гусеничних (MARION-204M) та крокуючих (ЕШ-15/90) екскаваторів, у привод окорувального барабана, а також башмаки, встановлені в гусеничне полотно трактора Komatsu, мають хорошу плавність ходу та стійкість наплавлених профілів під час роботи в реверсивному режимі та в умовах значних знакозмінних і контактних навантажень. Тривалість їх експлуатації відповідає терміну експлуатації нових деталей, що дозволило суттєво продовжити ресурс експлуатації приводних механізмів машин, а також зменшити підприємствам закупівлю коштовних імпортних деталей.

## ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ НАВОДНЮВАННЯ В ОБЕРТОВИХ МЕХАНІЗМАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПНВП-МЕТОДІВ ОБРОБКИ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

Комарницький Б.Р.<sup>1</sup>, Личак О.В.<sup>1</sup>, Юзефович Р.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Сучасні методи вібраційної діагностики обертових механізмів ґрунтуються на використанні статистичних оцінок параметрів вібраційних сигналів, відібраних у визначених місцях обертових вузлів механізмів. Величини критичних значень таких оцінок (середньоквадратичних значень віброприскорення чи віброшвидкості) є стандартизованими за ІСО 10816 і дозволяють встановити загальний вібраційний стан механізму в цілому. Такі методи обробки вібросигналів базуються на їх моделі як стохастичного сигналу чи процесу. Однак оцінки загального стану механізму не дозволяють вчасно діагностувати дефекти на ранній стадії розвитку, коли їх вплив на роботу механізму не призводить до виходу за діапазон допуску контрольованих параметрів. Особливістю корозійних пошкоджень, викликаних наводнюванням металів, є так званий крихкий механізм руйнування матеріалу, тобто раптове руйнування матеріалу без його пластичної деформації. Корозійне наводнювання має місце у багатьох обертових механізмах, що застосовуються в енергетиці, хімічній, нафтохімічній, авіаційній промисловості тощо. Тобто зародження та розвиток дефектів, викликаних корозійним наводненням, вимагає нових підходів до обробки вібросигналів і розробки спеціалізованих індикаторів для їх виявлення.

У Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України проводяться дослідження вібрацій вузлів обертових механізмів за умови їх наводнення для побудови та верифікації сучасних методів вібродіагностики на основі моделей вібраційних сигналів як періодично нестаціонарних випадкових процесів (ПНВП). Методи обробки вібросигналів на основі ПНВП дозволяють розділяти регулярні та стохастичні складові вібросигналу й проводити їх аналіз та оцінювання окремо, застосовуючи відповідні підходи окремо до кожної зі складових. Такий підхід дозволяє отримати оцінки та усунути вплив регулярних коливань, викликаних приводом механізму (регулярних базових частот) та дослідити походження прихованих коливань функції дисперсії, котрі дозволяють побудувати індикатори виявлення та оцінювання прихованих дефектів на ранніх стадіях розвитку. Такі індикатори будуються на основі співвідношення потужностей періодичних складових коливань функції дисперсії та приростів фонових стохастичних складових нульового порядку.

## **АВТОНОМНІ ЗВАРЮВАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ НАКОПИВАЧІВ ЕНЕРГІЇ**

**Коротинський О.Є., Жерносєков А.М., Скопюк М.І., Вертецька І.В.**

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

Автономні зварювальні комплекси (АЗК) призначені для вирішення різних технологічних завдань у польових умовах. Найперспективнішими для створення таких систем є міні-електростанції (МЕС), оснащені сучасними накопичувачами електричної енергії з метою підвищення їхньої енергоефективності. Наприклад, система АЗК може бути використана для проведення ремонтно-відновлювальних робіт на залізничному та міському транспорті. Це переважно стосується ремонту трамвайних колій. Переважно ця система орієнтована для ремонтних робіт з наплавлення, які пов'язані з відновленням стрілок і хрестовин без їх демонтажу.

Оснoву даних АЗК складають МЕС потужністю до 10 кВт, встановлені на спеціальному транспортному пристрої типу автомобіля або автодрезини. До складу комплексу входить три підсистеми, які виконані у вигляді окремих блоків і модулів. Це дозволяє швидко його розгортати під час підготовки до транспортування та функціонування.

До складу АЗК входить:

1. Транспортна підсистема (у разі використання на залізничному транспорті рекомендується полегшена автодрезина з місцями для розміщення всіх блоків і модулів для встановлення технологічних вузлів).
2. Технологічна підсистема, яка є, по суті, універсальним зварювальним агрегатом з великим набором технологічних функцій.
3. Підсистема автоматизованого контролю та паспортизації режимів зварювання та наплавлення.

На першому етапі система контролю буде виконана з урахуванням персонального комп'ютера. Надалі передбачається створити спеціалізований контролер, призначений для реєстрації інформації щодо поточних режимів основних технологічних параметрів на електронному носії (флеш-пам'ять).

## ПЕРЕРОБКА ЛОМУ ТА ВІДХОДІВ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ

**Костецький Ю.В., Педченко Є.О., Полішко Г.О.,  
Зайцев В.А., Петренко В.Л., Трикозенко Д.І.**

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

Актуальність рециклінгу лому та відходів нікелевих сплавів зумовлена необхідністю збереження ресурсів і мінімізації впливу на довкілля. Метою роботи є дослідження ефективності електрошлакового переплаву (ЕШП) для переробки технологічних відходів сплаву ЕП648. Запропоновано використання сучасної двоконтурної схеми ЕШП зі струмопідвідним кристалізатором, що забезпечує гнучкість до геометрії електродів і точний тепловий контроль. Проведені експериментальні дослідження показали, що технологія ЕШП ДС дозволяє отримувати високоякісні злитки зі збереженням хімічного складу, придатні для подальшого використання у виробничому циклі.

The importance of recycling nickel alloy scrap and waste stems from the need to conserve resources and minimize environmental impact. This study aims to investigate the efficiency of electroslag remelting (ESR) in processing the EP648 alloy's technological waste. A modern dual-circuit ESR scheme with a current-conducting crystallizer is proposed to provide flexibility for electrode geometry and precise thermal control. Experimental research has demonstrated that ESR DS technology can produce high-quality ingots with a preserved chemical composition suitable for further use in the manufacturing cycle.

## ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ МЕТАЛІЗАЦІЇ (ЕДМ) ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ТА ЗМІЦНЕННІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ

Крилов С.В.<sup>1</sup>, Лаврик В.П.<sup>2</sup>, Суглобов В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТЦ «Промавтосварка», Київ

<sup>2</sup>ДВНЗ «ПДТУ», Дніпро

Електродугова металізація є високопродуктивним і економічним процесом, що дає змогу наносити покриття завтовшки від часток до кількох міліметрів. При цьому нагрівання виробу до температури, що не перевищує 120 °С, не викликає деформації та зміни фізичних властивостей основного металу. Величина адгезійної міцності покриття залежить від способу попередньої підготовки поверхні перед металізацією. У результаті застосування такого різновиду газотермічної технології, як ЕДМ, вдається отримати на поверхні виробу шар матеріалу з особливими властивостями, такими як корозійна стійкість, антифрикційні властивості, висока твердість і зносостійкість, жаростійкість.

Нанесення електродугової металізації здійснюється за допомогою комплексу КЕМ-1 (рис. 1), який відповідає вимогам, що висуваються до цього виду обладнання. Він сертифікований у ДП НТЦ «СЕПРОС» НАН України (сертифікат відповідності № UA10350.00005-18).



Рис. 1. Комплекс для дугової металізації КЕМ-1

**Склад комплексу КЕМ-1:** зварювальний випрямляч інверторного типу; блок подачі дроту на базі двох синхронізованих мотор-редукторів; металізатор у зборі зі шланг-пакетами; компресор (постачається за бажанням замовника).

### Технічні характеристики комплексу КЕМ-1:

- діаметр застосовуваного дроту: 1,2...1,6 мм;
- робочий тиск стисненого повітря: 5...6 бар;
- витрата повітря: не менше 1,7 м<sup>3</sup>/хв;
- робочий струм: 50...400 А;
- напруга дуги: 17...40 В;
- потужність дуги: до 16 кВт;
- маса металізатора (без шланг-пакетів): 1,7 кг.

Науково-технологічний центр «Промавтосварка», який є розробником комплексу для електродугової металізації КЕМ-1, спільно зі співробітниками ДВНЗ «ПДТУ» та ІЕЗ ім. Є.О. Патона має великий досвід у відпрацюванні технології нанесення покриттів із використанням різних за складом зварювальних і наплавлювальних дротів.

Відпрацьована технологія нанесення покриттів перевіряється та контролюється на технологічних зразках і містить такі процедури:

- візуальний огляд поверхні покриття на предмет однорідності та відсутності зовнішніх дефектів (сколів, відшарувань, здуттів, тріщин, пор);
- визначення величини адгезійної міцності зчеплення покриття з матеріалом основи;
- визначення процентного вмісту мікропор за товщиною металізаційного шару;
- вимірювання твердості покриття;
- металографічні дослідження структури металізаційного покриття;
- проведення спеціальних випробувань (наприклад, визначення стійкості до газообразивного зношування, опору механічному стиранню тощо).

У світовій практиці металізаційні покриття активно застосовуються для створення надійного та довготривалого антикорозійного захисту металевих конструкцій у різних галузях промисловості, зокрема:

- несучі та огорожувальні конструкції мостів;
- металоконструкції вантажо-підйомних кранів;
- металоконструкції опор ЛЕП і щогл освітлення;
- корпуси та палубне обладнання суден;
- резервуари для зберігання й переробки нафти;
- металоконструкції шельфових бурових платформ;
- фільтраційне та газоохолоджувальне обладнання в металургії;
- гідротехнічні споруди.

Результати проведених досліджень були успішно апробовані при вирішенні конкретних виробничих завдань. Зокрема під час ремонту локальних дефектів антифрикційного шару підшипників ковзання енергетичного обладнання на ММК ім. Ілліча (рис. 2). Також НТЦ «Промавтосварка» тісно співпрацює з НДКПі АТ «Укрзалізниця» у напрямку відновлення широкого застосування електродугової металізації у вирішенні питань відновлення зношених поверхонь деталей рухомого складу (рис. 2). При цьому були виготовлені зразки з напленням сталевими дротиками різного хімічного складу з твердістю напленого шару в діапазоні *HRC* 21...44.

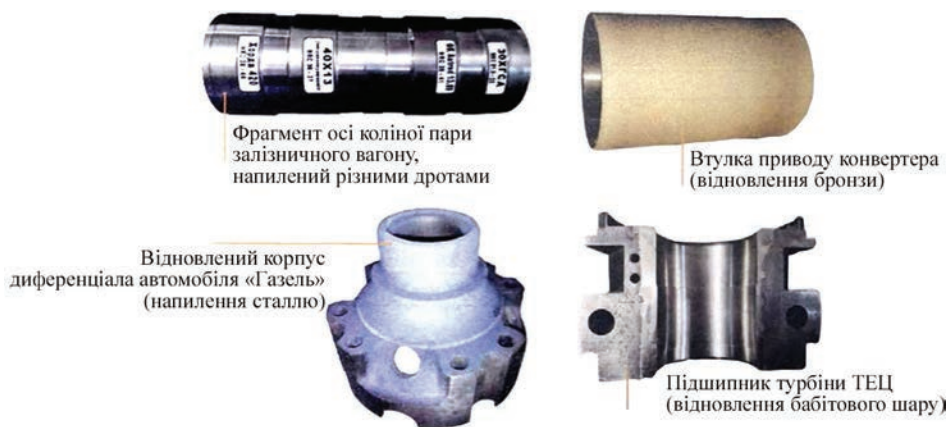


Рис. 2. Приклади успішної реалізації технології відновлення деталей

Широке застосування способу ЕДМ у різних галузях промисловості обумовлене такими перевагами: напленням можна наносити різні покриття на вироби із найрізноманітніших матеріалів. Обладнання для ЕДМ досить мобільне та порівняно просте в експлуатації та обслуговуванні; ЕДМ є найбільш зручним та високо-економічним методом, рівномірне покриття можна напилити як на велику площу, так і на обмежені ділянки виробів; ЕДМ є найбільш ефективним способом відновлення та ремонту зношених деталей зі збереженням початкової форми деталі та фізико-механічних характеристик основного металу. Цей метод дозволяє наносити шари завтовшки від кількох десятків мікронів до кількох міліметрів; для наплення можна використовувати різні метали та сплави, а також різноманітні їх поєднання (рис. 2). Можна напилувати різні матеріали в кілька шарів, що дозволяє отримувати покриття зі спеціальними характеристиками; технологічний процес ЕДМ забезпечує високу продуктивність нанесення покриття, має відносно невелику трудомісткість та можливість повної або часткової автоматизації процесу.

## RESULTS OF MATHEMATICAL MODELLING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN ELECTRON BEAM MELTING OF COPPER INGOTS

**Krivtsun I.V., Akhonin S.V., Rymar S.V., Hubatiuk R.S., Berezos V.O., Khomutskiy S.V.**  
*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

The results of mathematical modelling of laminar heat and mass transfer processes in electron beam melting (EBM) of copper ingots of circular cross-section are presented. A three-dimensional mathematical model of stationary thermal and hydrodynamic laminar processes based on the Navier–Stokes equations in molten copper in a cylindrical ingot, which is melted by the EBM method, in which the beam moves in a circle along the periphery of the bath with the melt according to the Gaussian distribution of thermal power from the beam, has been developed. According to the results of mathematical modelling, the temperature fields and hydrodynamic flows of the molten metal in a copper ingot with a diameter of 195 mm were obtained. Mathematical modelling enabled us to calculate the shape of the crystallisation front of the metal during ingot formation. The shape of the crystallisation front is a significant factor in determining the quality of the ingot metal. The flatter the shape of the crystallisation front profile, the higher the quality of the ingot metal. Based on the calculated data, it was found that heat transfer in the liquid phase of the ingot is primarily due to heat and mass transfer resulting from the movement of the molten metal. The distribution of the electron beam power on the surface of the bath significantly affects both heat and mass transfer. The following calculated parameters of the melting process were selected — electron beam heating power of 55 kW and melting rate of 90–100 kg/h, which ensure high quality indicators of copper ingots — without shells and discontinuities, with crystals close to equiaxed.

## MODELING OF THE HEAT TREATMENT PROCESS OF WELDED JOINTS OF TRAM RAILS

**Krivtsun I.V., Gubatyuk R.S., Prokofiev O.S., Pantelejmonov E.O.,  
Rymar S.V., Abdulakh V.M., Kostin V.A., Hryhorenko S.H.,  
Zhukov V.V., Goncharov I.O., Kuzmenko G.V.**

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

The results of physical modeling on model samples of heat treatment of metal of welded joints of tramway rails are presented. Model samples, in the form of rods, are cut from real welded joints of rail heads. Welded joints of heat-strengthened rails of type P65 made of steel K76F are made by automatic arc welding in the bath method with a fusible mouthpiece (ADZPM) with filler flux-cored welding wire of type ANPM-3. Theoretical results and novelty: for the first time, parts of thermokinetic diagrams of decomposition of supercooled austenite during continuous cooling of the weld metal and the fusion zone of steel K76F with the filler wire metal under ADZPM conditions were constructed, which allowed to determine changes in the metal structure and its hardness at different cooling rates. Practical results: physical modeling on model samples showed that heat treatment of welded joints of tramway rails with reaching austenization temperature of weld metal 930–950 °C at a heating rate of 8 °C/s and its holding at this temperature for 70 s to obtain a homogeneous austenitic structure and subsequent rapid cooling within 8–14 °C/s with the formation of a tempered martensite structure in individual areas of the weld metal and the heat-affected zone is a factor that will improve the operational properties of welded rail joints and predict an increase in the service life. The use of induction heat treatment will increase the reliability of welded rail joints, which is important for the construction, repair and post-war restoration of tramways in Ukraine.

## ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ З ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ

**Кривцун І., Демченко В., Крикент І.**

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

Під час ТІГ зварюванні приелектродні границі, утворені стовпом дуги з катодним та анодним шарами, не є еквіпотенціальними. Тому традиційне тлумачення напруги як різниці потенціалів на кінцях провідника не може бути застосовано для визначення напруги та потужності на стовпі та анодному шарі дуги з тугоплавким катодом. Для подолання цієї проблеми введено поняття ефективних потенціалів приелектродних границь. Показано, що відповідно до рівняння енергетичного балансу стовпа дуги ефективні потенціали приелектродних границь визначаються як інтегральне середнє потенціалів, розподілених вздовж границь стовпа дуги з катодним та анодним шарами. Ядром усереднення слугує щільність струму, а нормуючим дільником — сила струму. Напряга на стовпі дуги визначається як різниця ефективних потенціалів приелектродних границь, а падіння напруги на анодному шарі — як різниця ефективного потенціалу дугової сторони анодного шару та потенціалу анода. Проведено чисельне моделювання процесів переносу енергії, маси, імпульсу та заряду в аргоновій дузі завдовжки 2 і 3 мм під час ТІГ зварювання в діапазоні струмів 50...300 А. Виходячи з отриманих результатів комп'ютерного моделювання, визначено струмові залежності ефективних потенціалів приелектродних границь і величини падіння напруги на стовпі та анодній області дуги. Наведено результати розрахунків енергетичних характеристик дуг з тугоплавким катодом у залежності від величини зварювального струму та довжини дуги. Зазначається, що напруга на анодному шарі, як і потужність, яка витрачається на його підтримку, є від'ємними. Наведено розрахунково-експериментальну оцінку катодної напруги та потужності катодного шару. Визначено ККД дуги з тугоплавким катодом у залежності від довжини дуги та величини зварювального струму.

**ДОСЛІДНЕ УСТАТКУВАННЯ  
ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ  
ПЛАВКИМ МУНДШТУКОМ МЕТАЛУ ЗАВТОВШКИ  
ДО 60 мм КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ**

**Кузьменко Г.В., Гончаров І.О., Тагановський В.М.**

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

Для гарантованого сплавлення крайок при дуговому зварюванні нерухомим плавким мундштуком металу завтовшки 15...60 мм необхідно використовувати від одного до трьох порошкових або суцільних дротів  $\varnothing$  1,2...1,6 мм. При цьому для забезпечення зварювального струму в діапазоні 250...750 А швидкість подачі дротів повинна плавно регулюватись у межах 2...8 м/хв. Було виготовлено діючий макет апарату, який складається з металевої рами, на якій змонтовано механізм подачі дротів із використанням колекторного електродвигуна на постійних магнітах Д-90А потужністю 130 Вт, три гальмівні механізми для касет з дротом, вузол кріплення плавкого мундштука з коректором його положення відносно крайок, що зварюються, та пульт керування. Також виготовлено комплект водоохолоджуваних формуючих пристроїв. Для забезпечення захисту розплавленого металу від повітря при піднятті зварювальної ванни до верхньої крайки зразків на формуючих пристроях було змонтовано сопла для подачі захисного газу. У якості джерела живлення використовується зварювальний випрямляч ВДУ-1201. Обладнання було випробувано при зварюванні стикових з'єднань зі сталі S460N завтовшки 40 мм.

## СТРУКТУРНІ ПАРАМЕТРИ ТА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПІСЛЯ ВПЛИВУ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Кушнарєва О.С., Берднікова О.М., Алексеєнко Т.О., Григоренко С.Г., Позняков В.Д.,  
Гайворонський О.А., Завдовєєв А.В., Гончаренко О.І.

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

У роботі розглянуто закономірності формування структурно-фазового складу зварних з'єднань броньової сталі Arтох 500 при використанні зварювального дроту аустенітного типу (Св-08Х20Н10Т) після зварювання та циклічного навантаження. Зварювання проводили без попереднього підігріву в середовищі захисних газів Ar + CO<sub>2</sub> на режимі  $I_{зв} = 180$  А;  $U_d = 25 \dots 26$  В;  $V_{зв} = 18$  м/год. Циклічні навантаження зварних з'єднань проводили при  $\sigma = 60$  МПа з кількістю циклів  $N_{ц} = 1080000, 1450000, 1800000$ . Для дослідження мікроструктури зварних з'єднань використовували світлову мікроскопію (мікроскопи Versamet-2, Neophot-32), аналітичну растрову (СЕМ-515) та просвічувальну електронну мікроскопію (JEM-200СХ).

Встановлено, що у металі шва у вихідному стані (ВС) присутня аустенітна структура з розміром зерен  $D_3 = 20 \dots 90$  мкм та мікротвердістю  $HV = 1700 \dots 2450$  МПа. Після циклічного навантаження  $D_3$  зменшується у 1,3, 1,5 та 1,6 разів при підвищенні  $HV$  на 10 та 20 %, відповідно при  $N_{ц} = 1080000, 1450000, 1800000$ . У зоні термічного впливу (ЗТВ) присутня мартенситно-бейнітна (М-Б) структура з  $D_3 = 80 \dots 200$  мкм,  $HV = 4010 \dots 4640$  МПа (ділянка перегріву) та  $D_3 = 25 \dots 65$  мкм,  $HV = 4640 \dots 5140$  МПа (ділянка повної перекристалізації). У ЗТВ при збільшенні  $N_{ц}$  підвищується  $HV$  на 20 % за рахунок рівномірного подрібнення пакетної мартенситно-бейнітної структури у 1,25, 1,5 та у 1,6 разів. Щільність дислокацій ( $\rho$ ) у структурі рівномірно підвищується (у 1,4...1,5 разів) у порівнянні з ВС до  $\rho = 3 \dots 7 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> та  $\rho = 3,5 \dots 7,8 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> відповідно. У ЗТВ при підвищенні  $\rho$  у 1,17...1,2 рази її градієнти відсутні. Також подрібнюється у 1,15...1,2 рази субструктура: для  $N_{ц} = 108000$   $d_c = 0,15 \dots 1,6$  мкм; для  $N_{ц} = 1450000$   $d_c = 0,12 \dots 1,45$  мкм. При  $N_{ц} = 1800000$  присутні градієнти  $\rho$ , що буде призводити до зниження тріщиностійкості металу. Структура в шві є неоднорідною при її подрібненні у 1,5 рази в порівнянні з ВС та підвищенні  $\rho$  у 4 рази (до  $\rho = 5 \cdot 10^9 \dots 2 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>). У ЗТВ субструктура у 1,5 рази дрібніша, а  $\rho$  підвищується у 2,3 рази ( $4 \cdot 10^{10} \dots 2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>).

Таким чином, у металі зварного з'єднання броньової сталі Arтох 500 при збільшенні кількості циклів ( $N_{ц} = 1080000; 1450000$ ) у металі швів та ЗТВ спостерігається диспергування субструктурних складових при відносно невеликих градієнтах щільності дислокацій. Це буде забезпечувати зміцнення металу швів і ЗТВ, а також їх тріщиностійкість. При  $N_{ц} = 1800000$  у металі зварних з'єднань спостерігаються градієнти розподілення щільності дислокацій, що сприяє можливості утворення мікротріщин.

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ ПІСЛЯ ІМПУЛЬСНО-ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ

Кушнар'ова О.С., Берднікова О.М., Колісниченко О.В.,  
Алексеєнко І.І., Тітков Є.П., Андрійчук Є.Б.

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

У роботі представлено результати досліджень поверхневих шарів інструментальної штампової сталі 4X5MФ1С (попередньо термічно оброблена — гартування та відпуск) після імпульсно-плазмової обробки (ІПО). Застосовували два варіанти ІПО з прямою дією імпульсного електричного розряду: режим I — відстань від плазмотрону до зразка 50 мм; режим II — 55 мм. Для вивчення структурно-фазових перетворень, зеренної та субзеренної структури, розподілу щільності дислокацій тощо використовували світлову мікроскопію (мікроскоп Versamet-2), аналітичну растрову (СЕМ-515, фірма PHILIPS, Нідерланди) і просвічувальну електронну мікроскопію (JEM-200СХ, фірма JEOL, Японія).

У результаті ІПО при режимі I на поверхні металу формується тонкий шар глибиною  $\delta$  до 2 мкм. На  $\delta = 2 \dots 40$  мкм відбувається утворення зміцненого шару з дисперсною (розмір зерен  $D_3 = 1 \dots 5$  мкм) структурою дрібногочастого мартеніту (М, 40 %), залишкового аустеніту (А, 50 %) та виділеннями карбідних фаз (10 %). Це сприяє рівномірному по глибині металу збільшенню мікротвердості  $HV$  до 5700 МПа, що в 1,5 рази більше  $HV$  основного металу (ОМ). При цьому на  $\delta$  до 40 мкм у зернах залишкового А подрібнюється субструктура. Встановлено рівномірне підвищення щільності дислокацій ( $\rho \sim 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), формування розорієнтованої блочної структури, подрібнення субструктури мартенітної складової (у 2 рази в порівнянні з ОМ) до  $h_p = 0,16$  мкм при  $\rho \sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . У внутрішніх об'ємах аустенітної структури виявлено дисперсні карбіди типу  $\text{Me}_6\text{C}$  розміром 0,03...0,5 мкм.

При використанні режиму II в оброблених поверхнях (ОП) спостерігається: зменшення товщини зміцненого шару (до 25 мкм) при зменшенні  $HV$  на 18 % у порівнянні з режимом I. При цьому зменшується  $\rho$ , збільшується об'ємна частка структур відпуску (субструктура, блоки), спостерігається рівномірна зміна параметрів тонкої структури ( $0,075 \leq h_p \leq 1$  мкм) до значень в основного металу при  $\rho = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Доведено, що в результаті ІПО на режимі I у поверхневих шарах інструментальної штампової сталі 4X5MФ1С не спостерігаються осередки зародження та розповсюдження тріщин. Це підтверджується відсутністю зон з різкими градієнтами по дислокаційній щільності та протяжних дислокаційних скупчень. ІПО забезпечує суттєве зміцнення поверхневих шарів штампової сталі та їх тріщиностійкість. Цьому сприяє загальне диспергування структури, збільшення щільності дислокацій при її відносній рівномірності, формування дисперсних карбідів ( $\text{Me}_6\text{C}$ ).

## ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ТА ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОАКТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ У 3D АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Лисенко О.М.

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

**Вступ та актуальність.** Відновлення України вимагає використання інноваційних і високоточних технологій виготовлення та ремонту конструкцій. Якість кінцевих виробів, зокрема полімерних і металевих, прямо залежить від контролю над процесом формування для мінімізації дефектів (таких як пори чи тріщини) та забезпечення необхідної мікроструктури. Для досягнення цієї мети ключовим є використання інтелектуальних інформаційно-обчислювальних систем у технологічних процесах зварювання та 3D-друку, що дозволяють перейти від реактивного до проактивного управління якістю.

**Гібридне моделювання для достовірного прогнозування термомеханічних властивостей.** Для достовірного прогнозування термомеханічних властивостей матеріалів у зоні з'єднання, що є критично важливим для визначення мікроструктури та механічних властивостей, необхідне впровадження гібридних ШІ/МН систем.

1. *Математичне та чисельне моделювання.* Фундаментальна задача полягає у математичному моделюванні розподілу та зміни температури, а також рівня напружено-деформованого стану в зоні з'єднання, при цьому чисельне моделювання (наприклад, метод скінченних об'ємів на основі сітки ЕБФВМ) широко застосовується для аналізу термічної поведінки, наприклад, у сталях TIG 316L та 304.

2. *Інтеграція фізичних знань (PI-GPR).* Дослідження підтверджують ефективність гібридного підходу, де фізичні моделі (такі як МСЕ — Метод Скінченних Елементів, або FEM) інтегруються в алгоритми машинного навчання. Використання регресії Гауссового процесу, інформованої фізикою (Physics-Informed Gaussian Process Regression, PI-GPR), дозволяє вбудовувати попередню інформацію з МСЕ-моделювання безпосередньо в алгоритм через фізично інформовані ядра (PIK).

3. *Результативність.* Застосування оптимізованих параметрів зварювання, отриманих цим адаптивним гібридним методом, продемонструвало значне зменшення втрат оптичної потужності на 34,1 %, підтверджуючи ефективність підходу.

**In-Situ Характеристика та семантична сегментація для надійного контролю якості.** Для забезпечення об'єктивного та надійного контролю якості у процесах 3D-друку та зварювання необхідне застосування Комп'ютерного зору (Computer Vision) та Глибокого навчання (ГН).

1. *Семантична сегментація дефектів.* Була розроблена модель U-Net(L)++ для 3D-семантичної сегментації, що використовується для точного визначення форми та об'єму зварного шва (або шару 3D-друку) на основі 3D-точкових хмар.

2. *Переваги моделі.* Модель U-Net(L)++ демонструє меншу обчислювальну складність, ефективно фільтрує шум від розплавленого металу та досягає високої точності. Точність ідентифікації зварних швів, виміряна за коефіцієнтом схожості Дайса (DSC), становить 0,941. Ця технологія дозволяє точно визначати мікродфекти (такі як пори та тріщини) у процесі формування полімерних виробів, що є ключовим для їхньої якості.

3. *Загальна придатність.* Методи, засновані на архітектурі U-Net, широко використовуються в адитивному виробництві металів (AM) для щільної піксельної сегментації дефектів, таких як пористість, тріщини, виявлення розбризкування та аналіз якості друку.

**Розробка проактивних адаптивних систем для запобігання незворотним дефектам.** Вирішальною проблемою є критична повільність (Latency), оскільки повільна реакція керуючої системи на відхилення параметрів виготовлення полімерів призводить до незворотних дефектів.

1. *Цифрова перевага (Швидкість).* Для автоматичної зміни параметрів під час процесів необхідна швидкість у мілісекундах. Сучасні сенсори ОКТ (Оптична когерентна томографія) працюють з частотою до 70 кГц, а системи Edge AI досягають швидкості 6666 висновків на секунду.

2. *Діагностика за допомогою LLM-агентів.* Для проактивного керування розробляється концепція інтелектуального агента. Наприклад, при діагностиці дефекту «Нитковість (Stringing)» у PETG інтелектуальний агент проводить аналіз проблеми, перетворюючи візуальний ввід на технічний діагноз.

3. *Автономна корекція.* Велика мовна модель (LLM, наприклад, Gemini) виступає в ролі Supervisor Agent (керуючий агент), який використовує механізм In-Context Learning для діагностики першопричини (висока температура та недостатня ретракція). Агент автономно генерує план корекції (наприклад, «Зниження температури», «Збільшення ретракції»), підтверджуючи потребу в адаптивній системі, що проактивно корегуватиме параметри для підтримки стабільності та оптимальних операційних властивостей.

**Висновки.** Проведені дослідження підтверджують актуальність переходу до інтелектуальних і гібридних систем у сфері адитивних технологій. Можливості 3D-семантичної сегментації (DSC 0.941) та високошвидкісного контролю (6666 висновків/с), поєднані з методами гібридного прогнозування (PI-GPR), забезпечують необхідну адаптивність для виробництва високоякісних полімерних виробів, що є важливим внеском у технологічну базу для швидкого та якісного відновлення критичної інфраструктури та виробничих потужностей України. Результати можуть бути інтегровані в системи адитивного виробництва для відновлення об'єктів критичної інфраструктури.

## FRACTAL PARAMETERISATION OF WELDED JOINT ZONES

Markovska Sofia<sup>1</sup>, Shtofel Olha<sup>1,2</sup>, Holovko Viktor<sup>2</sup>

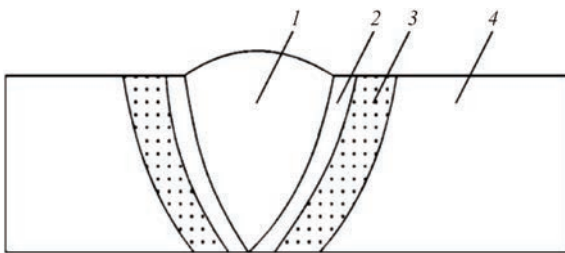
<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv

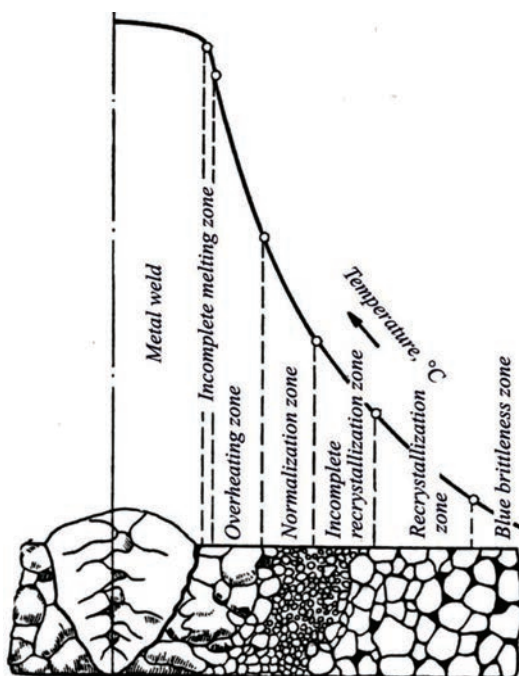
Modern approaches to the diagnosis of welded joints are quite extensive and require resources in the form of equipment, specialists and time. The idea behind this work is to start searching for correlations in welded joint areas using fractal analysis. Fractal analysis is a structurally sensitive method and, accordingly, it can be used to «detect» defects at an early stage of their formation.

*Keywords: fractal dimension, metallography, analysis, weld metal, heat-affected zone*

Current trends in engineering and materials science require the optimisation of welding parameters in order to achieve maximum process speed while reducing costs and minimising resource use [1]. Scientific works investigating the quality of welded joints usually focus on the weld metal zone. The quality of the weld zone also affects the quality of the weld [2]. It accumulates the strength, reliability and durability characteristics of the welded joint. Defects (pores, cracks, inclusions) in any part of the welded joint can lead to a decrease in strength characteristics and, subsequently, to destruction. Only the selection of a high-quality mode for the corresponding material, the selection of suitable materials and the control of welding temperature, speed and energy can prevent or minimise the occurrence of defects.



**Fig. 1.** Schematic arrangement of zones in a cross-section of a welded joint: 1 — weld metal (WM); 2 — fusion zone (full melt); 3 — heat-affected zone (HAZ); 4 — base metal (BM)



**Fig. 2.** Detailed diagram of a welded joint

Usually, welded joints are schematically studied in 3–4 zones (Fig. 1). Particular attention is usually paid to the weld metal, but the heat-affected zone is no less important [3]. Despite the fact that it does not melt, its structure and properties change under the influence of heating during welding.

The heat-affected zone requires a more careful approach to its study (Fig. 2). The quality and mechanical properties in the heat-affected zone may be worse than in the base metal: hardness and brittleness increase (especially in the weld), and impact toughness and corrosion resistance decrease. Its width depends on the speed of the process: at high welding speeds and rapid cooling, the heat-affected zone is smaller, and at low speeds, it is larger.

It can be seen that the thermal impact zone includes a number of zones with structural components of different parameters and geometry. Accordingly, the mechanical and fractal parameters in these zones will vary. It is proposed to consider the zones of the welded joint from the point of view of fractal analysis and to search for correla-

**Table 1.** Dynamics of change in fractal dimension for different zones of the welded joint

Zone	Sample					
	1	2	3	4	5	6
WM	Red	Red	Red	Red	Red	Green
HAZ	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
BM	Yellow	Green	Green	Green	Green	Red

tions with mechanical characteristics. In the experiment, six samples of welded joints made of 09G2S steel were taken, which were manufactured using the same welding mode. Each sample was divided into three zones using metallographic studies: the weld zone, the heat-affected zone, and the base metal zone. When calculating the fractal parameter, it was found that 83.3 % (5/6) of the samples had  $D_{max}$  for the weld zone, 83.3 % (5/6) had  $D_{average}$  for the heat-affected zone, and 66.7 % (4/6) had  $D_{min}$  for the base metal zone (Table 1).

The data on the fractal parameters of the zones correlate with the strength and yield boundaries (Fig. 3). Therefore, they can serve as a marker of changes in mechanical properties with changes within the zones.

**Conclusion.** It is proposed to apply the method of fractal analysis as a marker of defects in welded joint zones, dividing the zones according to visual and geometric parameters.

1. Gu Yu, Xiao Furen, Zhou Yongsheng, Li Jin, Xu Caiyun, Zhou Xiaodong (2019) Behaviors of embrittlement and softening in heat affected zone of high strength x90 pipeline steels. *Soldagem & Inspeção*, **24**. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si24.15>
2. Anatoliy Zavdoveev, Valeriy Poznyakov, Thierry Baudin, Massimo Rogante, Hyoung Seop Kim, Mark Heaton, Yuriy Demchenko, Victor Zhukov, Mykola Skoryk (2021) Effect of heat treatment on the mechanical properties and microstructure of HSLA steels processed by various technologies. *Materials Today Communications*, **28**, 102598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mt-comm.2021.102598>
3. Ferreira, Dario Magno, Silva Alves, Antonio do, Cruz Neto, Rubelmar, Ferreira Martins, Thiago, Brandi, S D. (2018) A new approach to simulate HSLA steel multipass welding through distributed point heat sources model. *Metals*, **8(11)**, 951. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8110951>

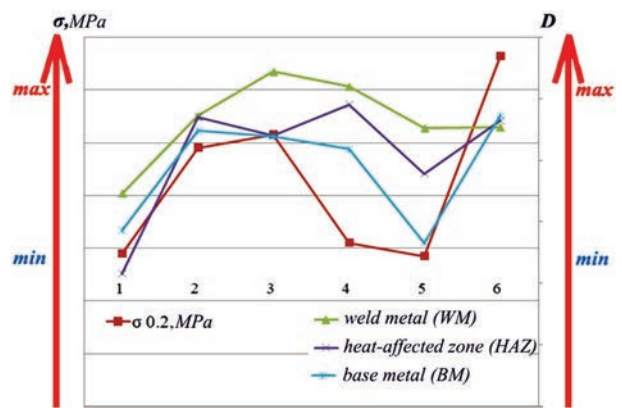


Fig. 3. Correlation between fractal dimension and mechanical characteristics

## PLASTIC FLOW OF MULTILAYER NI/AL FOILS AT HEATING UNDER LOAD AND ITS EFFECT ON THE DIFFUSION BONDING OF DIFFICULT-TO-DEFORM MATERIALS

**Melnychenko T.V., Ustinov A.I.**

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

Multilayer foils (MFs) based on reaction systems that undergo plastic deformation under thermomechanical loading are considered promising materials for use as intermediate layers in diffusion welding. In this regard, when optimising the chemical composition and structure of the MF, it is necessary to take into account factors that affect not only the change in the chemical composition in the joint zone, due to the presence of the MF as an intermediate layer, but also its deformation behaviour under diffusion welding conditions. In view of this, the influence of the chemical composition of the MF on its deformation behaviour during heating under constant load conditions was considered using the example of the Ni/Al MF with component ratios of 1:3, 1:1, and 3:1, which correspond to the intermetallics  $\text{Al}_3\text{Ni}$ ,  $\text{AlNi}$ , and  $\text{AlNi}_3$ , respectively. It was found that with an increase in the nickel content from 1:3 to 3:1, the deformation behaviour of MF changes qualitatively: at a ratio of 1:3, the rate of its plastic deformation during heating increases monotonically, and at a ratio of 1:1 or 3:1, this dependence becomes non-monotonic. To clarify the nature of this phenomenon, a study was conducted on the phase and structural transformations in MF with different component ratios during heating without load and under uniaxial tension. It was shown that the difference in the deformation behaviour of MF of different compositions is due to the implementation of various mechanisms of plastic deformation in them. The monotonic increase in the rate of plastic deformation upon heating of MF with a ratio of Ni and Al of 1:3 is due to its superplastic flow by the mechanism of intergranular slip. The non-monotonic temperature dependence of the rate of deformation of MF with a Ni:Al ratio of 1:1 or 3:1 is realised by both the mechanism of intergranular slip and superplastic flow due to phase transformations that occur only within certain temperature intervals.

The features of the formation of the structure and deformation properties of reactive MF Ni/Al of different compositions upon heating determine the possibility of its use as an intermediate layer when joining materials by the diffusion pressure welding method. It has been demonstrated that the plastic deformation of the Ni/Al MF ensures physical contact between the joint surfaces, promoting diffusion mixing of the alloy and foil components and the formation of joints between nickel alloys, aluminium composites, and titanium intermetallics.

## ЗАСТОСУВАННЯ ТІГ ЗВАРЮВАННЯ-ПАЯННЯ ДЛЯ ХУДОЖНІХ ВИРОБІВ

Мінаков С.М.<sup>1</sup>, Чвортко Є.П.<sup>1</sup>, Стреленко Н.М.<sup>1</sup>, Мінаков А.С.<sup>1</sup>,  
Степанов Д.В.<sup>1</sup>, Вдовиченко І.М.<sup>2</sup>, Вдовиченко Д.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ

<sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Особливостями конструкції художніх виробів є наявність елементів різної товщини та різної геометричної форми, несиметричність конструкції в цілому та розташування на ній нероз'ємних з'єднань зокрема. На додачу, місця з'єднання деталей та конфігурація з'єднань у першу чергу залежать від художнього задуму, через що вони не завжди є оптимальними.

**Мета роботи** — розробити технології електродугового зварювання-паяння методом ТІГ для отримання якісних нероз'ємних з'єднань художніх виробів із квадратного профілю 10×10 мм суцільного перерізу. Матеріал виробу — низьковуглецева сталь.

Електродугове ТІГ зварювання-паяння із застосуванням дроту CuSi3 дозволяє заповнити зазор присадкою між крайками без її значних витікань завдяки покращеному змочуванню. Через це отримане з'єднання майже не потребує механічної обробки, а якщо вона й потрібна, то її легко виконати внаслідок меншої міцності

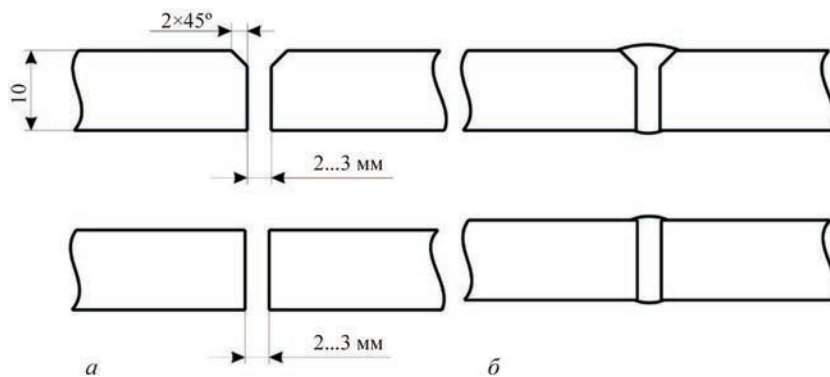


Рис. 1. З'єднання із суцільного профілю 10×10 мм: а — підготовка крайок; б — схема з'єднання

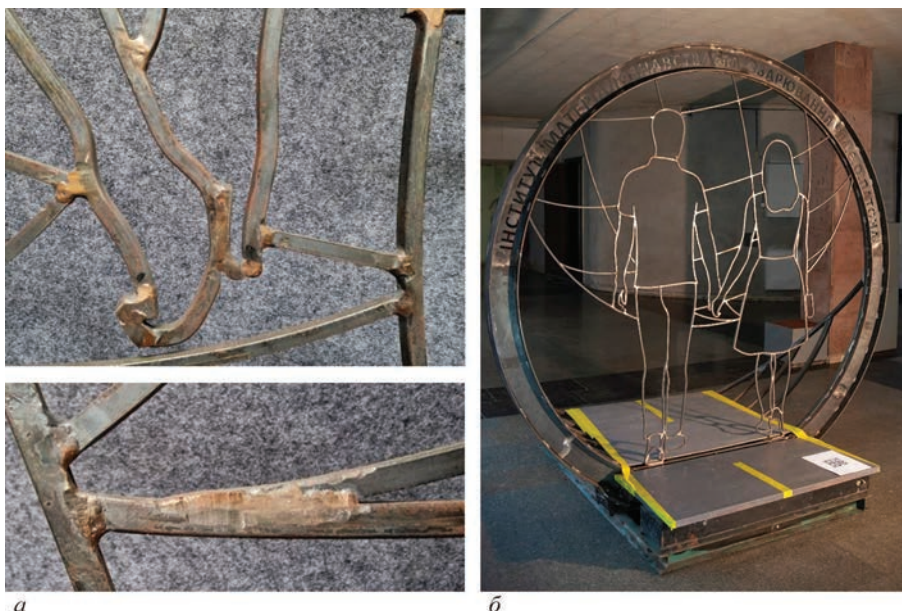


Рис. 2. Зовнішній вигляд з'єднань (а) та роботи в цілому (б)

присадки та її гарної здатності до механічної обробки. Беручи до уваги досить велику для процесів електродугового ТІГ зварювання-паяння товщину металу, перед з'єднанням суцільних профілів 10×10 мм на їхніх крайках на одній із граней профіля необхідно зробити скоси (рис. 1, *a*) та/або встановити їх із зазором 2...3 мм. Нагрівання дугою крайок деталей слід починати зі сторони скосів. На крайках формується тонкий прошарок розплаву. Необхідно прогріти профіль по всьому перерізу до температури, вищої за температуру плавлення присадки. Нагрівання має бути рівномірним. Важливо вловити момент, коли ділянка розплаву досягає максимальних розмірів — це значною мірою залежить від практичних навичок митця-зварника. На цьому етапі в зазор вводять присадку — дріт  $\text{CuSi3}$ . Якщо в процесі підігріву ділянки розплаву на протилежних кромках зливаються в єдину область розплаву, то присадку слід подавати максимально швидко. Підігрів проводять до заповнення присадкою всього перерізу (рис. 1, *б*). Рівень заповнення шва присадкою супроводжується різким зниженням рівня розплавлення присадки. Отримані таким способом з'єднання наведено на рис. 2.

Розроблені технології електродугового ТІГ зварювання-паяння з присадкою  $\text{CuSi3}$  успішно застосовані при виготовленні скульптури «В Майбутнє» (рис. 2). Роботи проведені у творчому гуртку Smart Art на кафедрі зварювального виробництва НН ІМЗ ім. Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського, творчий задум та дизайн Сергія Мінакова.

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ  
ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ГУСТИНИ ЕНЕРГІЇ ДЕФОРМАЦІЇ (ESED)  
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ЗА МЕЖАМИ ПРУЖНОСТІ  
В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ  
ЗАЛИШКОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ**

**Молтасов А.В.<sup>1</sup>, Каток О.А.<sup>2</sup>, Томко Д.С.<sup>3</sup>, Ткач П.М.<sup>1</sup>, Димань М.М.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

<sup>2</sup>*Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ*

<sup>3</sup>*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ*

Внаслідок спільної дії напружень від активного навантаження та залишкових напружень навіть при величині номінальних напружень, які відповідають багатоциклової області втоми, у локальних зонах концентраторів можуть виникати пластичні деформації. За відсутності залишкових напружень для визначення коефіцієнтів концентрації напружень і деформацій за межами пружності застосовують метод «ведучої функції», запропонований Г. Нойбером, та метод еквівалентної густини енергії деформації (ESED), запропонований К. Молскі та Г. Глінкою. Спрощений пружно-пластичний аналіз за наявності локальних залишкових напружень зазвичай заснований на різних модифікаціях формули Нойбера, найпоширенішою з яких є формула Лоуренса. Однак експериментальні дослідження показали, що класичний підхід Нойбера дає завищені значення напружень і більш прийнятним є метод ESED. Тому удосконалення методу ESED у частині можливості урахування залишкових напружень є актуальною науково-практичною задачею в області міцності, надійності та довговічності зварних з'єднань і конструкцій.

Графоаналітичним шляхом визначено внесок залишкових напружень у питому енергію деформації та обґрунтовано аналітичну формулу для визначення питомої енергії деформації, викликані спільною дією номінальних і залишкових напружень. З умови балансу енергій за припущення про те, що крива деформування за межами пружності описується схематизованою діаграмою з лінійним або ступеневим зміцненням, отримано аналітичні вирази для визначення діючого максимального напруження в концентраторі з урахуванням залишкових напружень.

З використанням співвідношень удосконаленого методу ESED визначено максимальне напруження у стиковому зварному з'єднанні сталі А36 з наявними залишковими напруженнями в околі концентратора. Також для цього ж з'єднання були проведені розрахунки за найбільш вживаною формулою Лоуренса. У результаті було встановлено, що напруження, розраховане за формулою Лоуренса, на 8 % вище за відповідну величину, отриману за удосконаленим методом ESED. Тому використання більш точного підходу, розробленого в даній роботі, дозволить уникнути надмірної консервативності результатів розрахунку характеристик опору втомі.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН І МІСЦЯ ЙМОВІРНОГО РОЗТАШУВАННЯ ПОР У НАПАЯНОМУ ШАРІ ЗАГОТОВОК З ЛАТУННОЮ ОСНОВОЮ

**Несін В.В.**

*Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки  
та судових експертиз Служби безпеки України, Київ*

Виготовлення латунних заготовок з напаяним шаром припою в фторопластовій оснастці супроводжується утворенням пор. Застосовується для виготовлення відпрацьований маршрут технологічної обробки. Детальна технологія не застосована через те, що впровадженою формою експериментального виробництва є штучне та дрібносерійне виробництво. Виконавці основних операцій змінюються через різноплановість вирішуваних задач та уніфіковану спрямованість виробничого підрозділу. Індивідуальні навички та досвід не завжди фіксуються у впроваджених раціоналізаторських пропозиціях [1–4], доповідях, практичних порадах чи наукових статтях.

Аналіз загальних і специфічних причин утворення пор у припої на латунних заготовках і фіксація синтезованих методів їх упередження та параметрів допуску присутності в заготовках проводиться в Українському науково-дослідному інституті спеціальної техніки Служби безпеки України з 2017 р. Результати кропіткої роботи відображені в ряді публікацій [5–7]. Роботи над постійним підвищенням якості продукції і пов'язаний з цим постійний інформаційний пошук не припиняються.

Застосування фторопласту в якості матеріалу оснастки (поз. 1 на рисунку) для заливки олов'яно-свинцевим припоєм (поз. 3 на рисунку) латунних заготовок (поз. 2 на рисунку), пов'язане з можливим внесенням пористості в шар припою. Фторопласт має широкий температурний діапазон застосування від  $-269$  до  $260$  °С, не реагує на агресивні середовища, достатньо міцний, стабільний за структурою, стійкий до стирання, має низький коефіцієнт тертя (близько  $0,05 \dots 0,10$ ), піддається механічній обробці [8]. Температури застосування основних поширених припоїв (ПОС-61:  $183$  °С [9]; ПОІн-52:  $138 \dots 140$  °С [10]; ПОСК 50-18:  $142 \dots 145$  °С [11]) – нижче від заявлених робочих температур фторопласту. Проте фторопласт, як і інші пластичні матеріали, може насичуватися водою. Вода і, зокрема, перегріта водяна пара є однією з причин утворення пор (поз. 4–6 на рисунку).

Плоска латунна заготовка розташовується на фторопластовій оснастці зі заниженням під заливання рідкого припою. Крім напайки знизу, припій наноситься на торець латунної деталі і зверху шаром  $1,5 + 0,5$  мм. Пори формуються в рідкому припої і, за аналогією з порами в зварному шві, витискаються в напрямку градієнта температур і меншої щільності матеріалу. Найвищу температуру та найменшу щільність у зварювальній ванні має точка горіння дуги, а для рідкого припою таким місцем на певному етапі процесу стає поверхня деталі, на яку припій наплавляється. Теплопровідність латуні вища за теплопровідність повітря. Тому тепло перерозподіляється з припою в латунь. До поверхні твердої латуні в розплавленому припої прямують пори. Після кристалізації пори залишаються на межі твердої латуні й наплавленого м'якого припою. Частина газів на верхній залитій припоєм поверхні виходить із розплаву в атмосферу. Тому концентрація пор на верхній межі розділу твердої-м'якої частини деталі (поз. 4 на рисунку) менша, ніж на нижній (поз. 6 на рисунку). Посередньою між варіантами зверху та знизу є концентрація пор з торця латунної деталі (поз. 5 на рисунку).

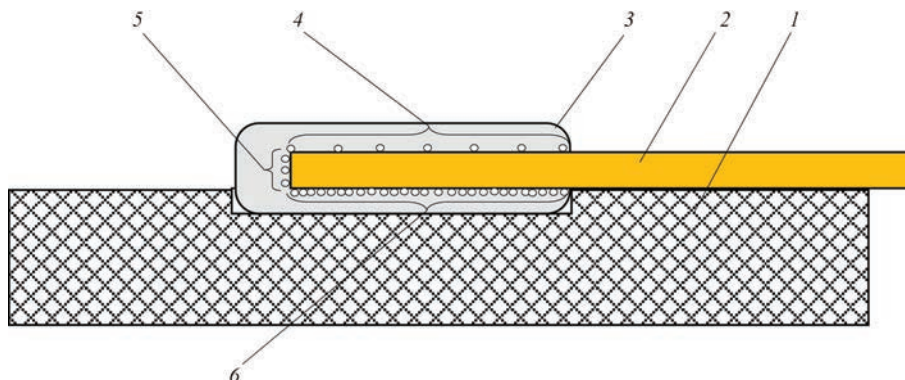


Схема паяної заготовки на оснастці та розподілу пор у припої (Рисунок — Несін В.В.)

Таким чином, у висновку по роботі зазначаємо, що:

1. Матеріал фторопластової оснастки, насичений вологою, є джерелом утворення пор при напайці шару припою завтовшки 1,5 + 0,5 мм. Засобом боротьби з активним утворенням пор за цієї причини є просушування оснастки перед використанням. Рекомендований режим просушування 60...80 °С протягом 2 год.

2. Нагріта латунна частина заготовок, на які напаяється припій, зокрема торець, нижня та верхня площини стають місцем зосередження пор. Концентрація пор на нижній поверхні сплавлення переважає їх концентрацію на верхній поверхні деталі.

1. Несін В.В. (2017) *Творча раціоналізаторська діяльність людини на виробництві в умовах старіння основних засобів, технології та обмеження інноваційної складової*. Матеріали XX Всеукраїнської наук.-практ. конф. студентів та аспірантів «Дні Науки», 20–21 квітня 2017 р. м. Київ. Укладачі: А.А. Мельниченко, В.А. Прищеп, С.О. Клейно. Київ, ТОВ НВП «Інтерсервіс», сс. 52–53.
2. Несін В.В., Ковальов К.С., Топчій Н.В., Лук'янюк С.В. (2019) Особливості впровадження результатів раціоналізаторської творчості в малосерійному експериментальному виробництві в умовах обмеження інноваційних можливостей. *Матеріали наук.-практ. конф. «Створення, охорона, захист і комерціалізація об'єктів інтелектуальної власності»*, 26 квітня 2019 р., м. Київ. Укладачі: В.М. Фурашев, С.Ю. Петряєв, В.Б. Барбаш. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», сс. 166–169.
3. Козюба М.М., Павленко О.А., Несін В.В. (2017) Запобігання утворенню пор в напайці. *Тези доп. XI Всеукр. наук.-техн. конф. «Досконалість зварювання – комплексний підхід»*. 25–26 травня 2017 р., м. Київ, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, с. 10.
4. Каглинський О.С., Лахтадир С.Л., Несін В.В. (2017) Характерні відхилення механічних властивостей, дефекти термообробки та паяння латуні ЛС59-1 *Тези доп. XI Всеукр. наук.-техн. конф. «Досконалість зварювання – комплексний підхід»*. 25–26 травня 2017 р., м. Київ, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, сс. 9–10.
5. Григоренко В.А., Лазебний В.М., Несін В.В. (2018) Нормування розмірів поверхневих пор напайки з умов технології, конструкції, матеріалу та доступних методів контролю якості. *Тези доп. XVII Міжнародної наук.-техн. конф. «Приладобудування: стан і перспективи»*, 15–16 травня 2018 р. м. Київ, ПБФ КПІ ім. Ігоря Сікорського, сс. 152–153.
6. Борисевич В.М., Каглинський О.С., Несін В.В. (2018) Формування напаяного шару без поверхневих пор застосуванням технологічного циклу «фрезерування – візуальний контроль – запайка». *Тези доп. XVII Міжнародної наук.-техн. конф. «Приладобудування: стан і перспективи»*, 15–16 травня 2018 р. м. Київ, ПБФ КПІ ім. Ігоря Сікорського, сс.60-61.
7. Стежко С.М., Кузьменко Т.М., Лахтадир С.Л., Несін В.В. (2020) Збільшення потоку дефектів паяння типу «пора» внаслідок зміни стандарту на склад латуні. *Тези доп. VII Міжнародної наук.-техн. конф. «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології і системи (МІВТС-2020)»*, м. Харків, сс.137–138.
8. Властивості фторопласту: термостійкість, міцність та хімічна інертність. <https://city-afisha.com/vlastyvoli-ftoroplastu-termostiikist-mitsnist-ta-himichna-inertnist/#:~:text=Фторопласт%20—%20це%20матеріал%2C%20який%20не%20боїться%20високих,хімічній%20промисловості%2C%20медицині%2C%20харчовому%20виробництві%2C%20електроніці%20та%20машинобудуванні>
9. ПОС 61: температура плавлення, склад і властивості. <https://tchnolist.com.ua/korisno/pos-61-temperatura-plavlennya-sklad-i-vlastyvoli/#:~:text=Температура%20плавлення%20ПОС%2061%20становить%20183%20°С.%20Це,і%20знижує%20ризик%20пошкодження%20компонентів%2C%20чутливих%20до%20перегріву>
10. ПОІн-52 (Олово-Індій) — легкоплавкий припій. <https://zpsplav.com.ua/priпой/priпой-legkoplavkij/priпой-poin-52/#:~:text=Припій%20ПОІн-52%20-%20високоточний%20легкоплавкий%20сплав%20на%20основі,деталей.%20Сплав%20відрізняється%20високою%20текучістю%20та%20чудовою%20змочуваністю>
11. Припій олов'яно-свинцевий ПОСК 50-18. URL: <https://zpsplav.com.ua/priпой/posk50-18>

# IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF WELDING OF HIGH-STRENGTH STEELS WITH CONTROLLED TRANSFER (AHSS) PROCESSES BASED ON THE ANALYSIS OF THERMAL AFFECTED ZONE MODELING

**Nosov D.G., Peremitko V.V., Shevtsov V.B., Makarenko M.V.**

*Dniprovsky State Technical University, Kamianske*

This study is devoted to improving AHSS welding technology by developing an adequate model for predicting HAZ parameters when using modern GMAW processes.

The relevance of the work is due to the spread of high-strength steels (Advanced High-Strength Steels, AHSS) generations DP, TRIP and 22MnB5, used to reduce the mass of critical structures. The specific multiphase microstructure of these steels is highly sensitive to thermal cycles of welding. Uncontrolled heat input initiates microstructural degradation, which manifests itself in weakening (softening) of the heat affected zone (HAZ) due to the decomposition of martensite or tempering of bainite, as well as in the formation of brittle quenching structures in the overheating zone. This determines the scientific and technical problem of ensuring a controlled welding process to maintain the homogeneity of the mechanical properties of the joint.

Effective joining of AHSS requires the use of GMAW (Gas Metal Arc Welding) processes. Metal Arc Welding) with adaptive metal transfer control. The research focuses on three key technologies. CMT (Cold Metal Transfer) technology Metal Transfer) is characterized by mechanical reciprocating movement of the wire and droplet separation at minimum current (in the short-circuit phase). This provides the lowest effective heat input, minimizes the HAZ width and the risk of softening, which is a priority for thin-sheet steels (e.g., DP, TRIP up to 2.0 mm thick). PMC (Pulse Multi Control) is an advanced pulsed arc with stabilization based on multifactor analysis (voltage, current and inductance monitoring). The process allows for deep penetration at high welding speeds, which is in demand for joining materials of greater thickness (2–4 mm), for example, 22MnB5. The LSC (Low Spatter Control) optimizes the short-circuit phase to stabilize the process and radically reduce spatter, offering a technological compromise between the ultra-low heat input of CMT and the high performance of PMC.

The central hypothesis of the study is the lack of informativeness of the traditional parameter of energy per unit time ( $E_{\text{eff}}$ ) for predicting metallurgical consequences in welding AHSS. It is established that nominally identical values of  $E_{\text{eff}}$  achieved by different combinations of parameters (e.g., «low current/low speed» versus «high current/high speed»), lead to the formation of significantly different characteristics of the HAZ.

This discrepancy is determined by differences in arc physics — plasma pressure and convective flows — and, as a result, in weld pool dynamics.

To improve the adequacy of the prediction of the width of the HAZ ( $W_{\text{HAZ}}$ ), a modified calculation model is proposed. At the first stage, a correction term of the arc time  $t_{\text{arc is introduced}} = c_1(U/D) + c_2$ , which indirectly reflects the stability of the arc. In the second stage, the modified linear energy  $E_{\text{eff is calculated}} = (Ut_{\text{arc}})/(v_{\text{mm/s}} \cdot 1000)$ .

The final calculation of the HAZ width  $W_{\text{HAZ}}$  (mm) is carried out according to the equation that takes into account the convection and impulse factors:

$$W_{\text{HAZ}} = k_2 \left( \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{A_0}} \right)^{0.5} (1 + \alpha_{\text{conv}})^{0.3} (1 + \beta_{\text{pulse}})^{0.5},$$

where  $k_2$  — thermal conductivity coefficient;  $A_0$  — conditional heat dissipation area (mm<sup>2</sup>);  $\alpha_{\text{conv}}$  — coefficient of convective influence, which takes into account the influence of plasma pressure;  $\beta_{\text{pulse}}$  — impulse attenuation coefficient, which takes into account the nature of the transfer.

The results confirm that the preservation of the properties of AHSS joints is achieved when using adaptive processes (CMT, PMC, LSC) with controlled heat input. It is proven that  $E_{\text{eff}}$  is not a sufficient criterion for predicting HAZ heterogeneity because it ignores arc physics. The proposed  $W_{\text{HAZ model}}$  demonstrates higher predictive ability by integrating the  $\alpha_{\text{conv}}$  and  $\beta_{\text{pulse}}$ , and is a tool for optimizing modes, focused not only on the amount of energy, but also on the nature of its input.

## ВИКОРИСТАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ АНАЛІТИЧНОЇ ФУНКЦІЇ БІПЕРІОДИЧНО НЕСТАЦІОНАРНО ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

Пелипець Р.І.<sup>1</sup>, Юзефович Р.М.<sup>1,2</sup>, Яворський І.М.<sup>2,3</sup>, Личак О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>3</sup>Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

Біперіодичний нестационарний випадковий процес (БПНВП) є ефективною моделлю для опису сигналів із подвійною ритмічністю, котрі часто спостерігаються як при діагностиці технічних систем, так і при дослідженні природних процесів. Під час аналізу кореляційної та спектральної структури таких сигналів особливу увагу приділяють застосуванню перетворення Гільберта. Проаналізовано особливості аналітичного сигналу, сформованого на основі БПНВП, та його перетворення Гільберта, проведено дослідження умов його стаціонарності. Встановлено, що властивості перетворення Гільберта тісно пов'язані зі структурою основних і комбінаційних гармонік модулюючих процесів. Показано, що у випадку високочастотної модуляції несучих гармонік кореляційно-спектральна структура сигналу та його перетворення Гільберта не змінюються.

Запропоновано ефективні підходи до оцінки базових частот у сигналах із подвійною періодикою, включно з використанням методів квазіоптимального оцінювання методом найменших квадратів. Визначення спектральних компонентів функцій математичного сподівання та дисперсії сигналу дозволяє сформувати інформативні показники стану досліджуваних об'єктів. Показано, що для задач моніторингу стану технічних систем, зокрема підшипників із пошкодженнями, доцільно враховувати як адитивні, так і комбінаційні гармоніки у структурі моментних функцій. Це значно підвищує чутливість алгоритмів діагностики та дає можливість раннього виявлення дефектів.

Моделювання діагностичних сигналів за допомогою БПНВП, комплексний аналіз їх моментних функцій та врахування властивостей перетворення Гільберта при аналізі аналітичного сигналу забезпечує підвищення достовірності результатів моніторингу складних технічних об'єктів.

## ВПЛИВ ДОДАВАННЯ ФТОРВМІСНОГО ПОЛІМЕРУ ДО ШИХТИ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ НА ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНИХ ШАРІВ

Перемітько В.В.<sup>1</sup>, Євдокимов А.В.<sup>2</sup>, Голякевич А.А.<sup>3</sup>, Сухомлин В.І.<sup>1</sup>, Сергєєв М.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське

<sup>2</sup>ТОВ «СТІЛ ВОРК», Кривий Ріг

<sup>3</sup>ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК», Київ

Дане дослідження присвячене вивченню впливу фторвмісного полімерного матеріалу як додаткової компоненти шихти порошкового дроту на зміни у складі, структурі та властивостях наплавленого металу системи Fe–Cr–C. Раніше вже було встановлено, що додавання пластику до складу шихти порошкової наплавної стрічки уповільнює кристалізацію шарів, сприяє активній дифузії вуглецю до місць кристалізації первинних карбідів хрому та спричиняє часткове збіднення на цементит прилеглого аустеніту.

Для дослідів використовували зразки зі низьколегованої сталі S355 (09Г2С) розміром 250×150×8 мм, на які порошковими дротами діаметром 2,4 мм у два проходи наплавляли зносостійкий шар металу. Дріт з базовим складом шихти забезпечував одержання у верхньому шарі структури білого високохромистого чавуну (склад наплавленого металу, мас. %: С – 3,10, Mn – 1,41; Si – 0,95; Cr–13,16; Mo – 0,03; S – 0,015; P – 0,017). Партія дроту № 1 додатково містила у шихті компоненти, що забезпечили перехід до наплавленого шару ніобію, а партія № 2 — нікелю та бору.

Для порівняння проводили наплавлення дротами того ж складу шихти з додаванням фторвмісного порошкоподібного полімеру, із розрахунку 30...40 г на 1 кг шихти. Електродугове наплавлення проводилося в автоматичному режимі ( $I_{\text{н}} = 300...320$  А,  $U_{\text{д}} = 27...29$  В,  $v_{\text{н}} = 500$  м/год) на установці порталного типу «Кристал ПНП-2,5».

Виконували спектральний аналіз хімічного складу наплавленого металу (оптико-емісійний спектрометр СРЕКТРО МАХх), металографічні дослідження отриманих структур на фотомікроскопі НЕОРНОТ 21 та вимірювання твердості за методом Роквелла (ТК-14-250).

Порівняння хімічного складу металу, наплавленого з використанням порошкових дротів з додаванням пластику, виявило збільшення присутності вуглецю від додавання пластику (до 3,20 мас. % (склад № 1) та до 3,37 мас. % (склад № 2)). Хрому зберігається також більше (до 13,42 мас. % (склад № 1) та до 15,99 мас. % (склад № 2)). Вміст додатково внесених компонентів склав у металі, наплавленому дротами з додаванням пластику, мас. %: Nb – 3,0; Ni – 7,32 та В – 0,11.

Фіксується також зростання твердості металу поверхневого шару зразка при додаванні пластику: HRC 56...59 (склад № 1) проти HRC 52...55 без додавання та HRC 45...47 (склад № 2) проти HRC 43...45 без додавання.

За рахунок теплового ефекту від внесення вуглеводню розміри карбідів хрому зростають. Карбіди ніобію при цьому розподіляються за об'ємом більш рівномірно, без значних скупчень.

## УДОСКОНАЛЕНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ

Перемітько В., Коломоєць І., Чумак М.

*Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське*

У роботі представлена конструктивна реалізація пристрою для наплавлення тонкостінних плоских деталей, що забезпечує стабілізацію температурного режиму процесу, зменшення теплових деформацій і залишкових напружень, а також підвищення якості сформованого наплавленого шару.

Поставлена задача полягала у створенні пристрою, в якому за рахунок введення до конструкції нових функціональних елементів — формувальної канавки у станині, системи примусового охолодження та контактних роликів притискачів — досягається керованість геометрії поверхні деталі в зоні наплавлення. Це дозволяє підвищити ефективність процесу, стабілізувати тепловий баланс і запобігти виникненню деформацій, характерних для тонкостінних заготовок.

Згідно із запропонованою конструкцією (рис. 1) пристрій містить: станину (1) з мідною основою, оснащеною каналами для примусового рідинного охолодження, формувальну канавку U-подібного профілю (2), індукційний нагрівач (3), обмежувальну камеру (4) та систему контактних роликів притискачів (7, 8). Обмежувальна камера встановлена на станині з можливістю регулювання положення у площині, перпендикулярній до осі переміщення деталі, та має виріз для розміщення джерела нагріву.

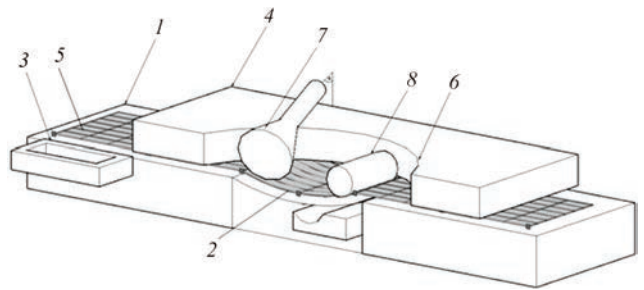


Рис. 1. Будова пристрою для наплавлення тонкостінних деталей

Особливістю конструкції є наявність двох типів притискачів — вхідного конічного, орієнтованого під кутом  $10 \dots 15^\circ$  до поперечної площини деталі, та вихідного циліндричного. Така конфігурація забезпечує поступове прилягання заготовки до охолоджуваної станини, посилює теплообмін, стабілізує зону дії нагріву та запобігає зміщенню деталі під час процесу наплавлення.

Формувальна канавка, яка розташована в охолоджуваній мідній основі станини, виконує функцію елемента, що компенсує термічне деформування кромки. Завдяки її U-подібному профілю забезпечується направлене деформування металу, що перешкоджає дії термічних напружень і сприяє рівномірному формуванню наплавленого шару.

Регульоване розташування обмежувальної камери дозволяє адаптувати пристрій до деталей різної товщини, концентруючи теплову дію лише у зоні наплавлення, що знижує втрати тепла та запобігає перегріву основного металу.

Робота пристрою полягає у послідовному переміщенні тонкостінної деталі вздовж станини, де відбувається її попередній підігрів індукційним нагрівачем, механічне притискання у зоні формувальної канавки та наплавлення. Примусове охолодження станини забезпечує стабілізацію структури металу після термічного впливу.

Запропоноване технічне рішення дозволяє знизити теплові деформації та ризик викривлення тонкостінних деталей; забезпечити стабільність геометрії наплавленої зони; підвищити рівномірність і якість нанесеного шару; розширити діапазон застосування пристрою для різних типів і товщин заготовок.

Застосування такого пристрою у виробничих умовах сприятиме підвищенню ресурсу деталей, ефективному використанню матеріалів та розширенню технологічних можливостей процесів наплавлення у сучасному машинобудуванні.

## FEATURES OF WEAR AND RESTORATION OF WORM SCREW SEGMENTS IN A BEAD MILL

**Peremitko V.V., Plitchenko S.O., Gerasimov V.V., Yermak D.A., Ocheretko O.S.**

*Dniprovsky State Technical University, Kamianske*

Bead mills of the MT-140 type are used in the paint and coatings industry for high-quality grinding of pigment components. During operation, the grinding segments of the worm screw undergo intensive wear, leading to reduced grinding efficiency, prolonged equipment downtime, and significant economic losses. An analysis of operating conditions revealed a combined mechanism of hydro-abrasive wear caused by the simultaneous action of abrasive bead elements and the process suspension.

Wear is uneven along the height of the grinding chamber: the lower segments are predominantly subjected to abrasive action, while the upper ones experience hydro-abrasive effects. A wavy surface profile forms on the segments, reducing their effective service life and increasing the risk of fracture.

Segment replacement is both structurally and economically challenging, making the extension of their service life through restoration highly relevant. Restoration of worn surfaces of cast iron segments (ChKh1 grade) was proposed using mechanized arc surfacing with flux-cored wires of different chemical compositions — SK A43-O and VELTEK H-590. Surfacing was performed in two layers with preheating to 400–450 °C.

Comparative analysis of the base and deposited metal compositions confirmed the effectiveness of alloying with Cr, Mn, Si and Nb. It was found that SK A43-O wire forms a structure with high wear resistance, while VELTEK H-590 provides increased plasticity. However, microcracks and porosity were detected in the fusion zone, necessitating additional machining to meet standard parameters.

Microstructural analysis showed that the lower surfacing layer contains austenitic chromium-carbide eutectic, trigonal chromium and niobium carbides, while the upper layer consists of martensite, retained austenite, troostite, and sorbite. This phase combination ensures a balance between hardness and impact toughness. In the initial state, ChKh1 cast iron has a ferrite-pearlite structure with lamellar graphite inclusions, which determines its baseline wear resistance. The deposited layers significantly exceed it in mechanical properties, as confirmed by hardness measurements and microstructural analysis.

The proposed restoration technology is expected to reduce repair costs, extend the maintenance interval, and improve mill performance. Further research should focus on optimizing the composition of surfacing materials, heat treatment regimes, and elimination of microdefects.

## ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ, РЕМОНТ І ВІДНОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

**Посипайко Ю.М.**

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

Відновлення надійної і безпечної експлуатації резервуарних баз зберігання нафтопродуктів є важливим завданням сьогоднішнього дня в Україні. Фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України та наші партнери мають багаторічний досвід комплексного діагностування технічного стану та дефектоскопії зварних резервуарів для зберігання нафтопродуктів, рідкого аміаку, спиртів та інших рідин з метою визначення можливості подальшої безпечної експлуатації, програми й термінів ремонтів і випробувань.

Комплекс робіт з діагностування технічного стану резервуарів містить:

1. візуальний контроль внутрішньої та зовнішньої поверхні резервуарів, виявлення та оцінка нерівностей і деформацій стінки та днища;
2. неруйнівний контроль зварних з'єднань і металу стінки різними видами випробувань, вимірювання товщини листів днища, стінки та покрівлі;
3. контроль герметичності зварних з'єднань днища;
4. вивчення корозійного стану листів днища, стінки та покрівлі;
5. вимірювання просідання днища шляхом нівелювання;
6. вимірювання відхилень стінки від вертикалі шляхом її теодолітної зйомки;
7. перевірку стану основи, вимощення, несучих конструкцій, понтону;
8. визначення механічних характеристик металу на зразках;
9. металографічні дослідження металу та зварних з'єднань стінки;
10. розрахунок внутрішніх механічних напружень у металі стінки;
11. аналіз технічної документації, дефектів і відхилень від нормативів елементів конструкцій резервуара;
12. складання обґрунтованого технічного висновку.

Нормативною базою комплексного технічного контролю резервуарів є міжнародні та національні стандарти, технічні регламенти, рекомендації й технічні умови, що діють на підприємстві Замовника.

При необхідності нами можуть бути виконані роботи, що виходять за рамки наведеного переліку, наприклад, аналіз акустичної емісії та магнітних полів об'єкта контролю тощо.

Спільно з нашими партнерами ми також можемо виконати:

1. зачищення резервуарів від осадів хіміко-механічним способом;
2. капітальний або відновлюваний ремонт резервуарів із використання зварювання;
3. градування резервуарів методом лазерного 3D моделювання;
4. нанесення на металоконструкції багатошарового антикорозійного покриття, першим шаром якого є суспензія лускатого металевого цинку в розчині полімерних в'язучих, так зване «холодне цинкування» матеріалом Liquid Zinc®. Наступними трьома шарами є двокомпонентне рідкокерамічне покриття ZingaMetall CeramCoat CN1-N.

В останні 40 років нами виконано технічний контроль близько 400 різних резервуарів, що експлуатуються на підприємствах Держрезерву, Укрнафтопродукту, хімпрому, військово-промислового комплексу, на нафтопереробних заводах, нафтобазах, автозаправках тощо.

Ретельне технічне обстеження резервуарів і технологічних трубопроводів дозволяє оцінити їх експлуатаційну надійність, розробити рекомендації щодо їхньої безаварійної експлуатації, своєчасно виявити дефекти та відхилення від встановлених нормативів.

## **ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ У МЕТАЛІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ, ВИКОНАНИХ ПІД ВОДОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ**

**Прилипко О. О., Максимов С. Ю., Берднікова О.М., Ромашко Д.В.**

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

Технологічні характеристики металоконструкцій відповідального призначення, які зварюються у водному середовищі, часто за рівнем механічних властивостей не повинні поступатися швам, виконаним на суші. Зміна умов зварювання істотно змінює характер протікання газообмінних реакцій. Процес кристалізації і формування структури металу шва тим сильніше, чим більший гідростатичний тиск.

Для керування процесами плавлення та кристалізації перспективним є застосування зовнішнього електромагнітного впливу (ЗЕВ). ЗЕВ сприяє зниженню хімічної мікронеоднорідності, рівномірному розподілу легуючих елементів, зниженню пористості та формуванню дрібнокристалічної структури. Проведені раніше експерименти показали значне зниження розмірів пор і їхнє більш рівномірне розташування в об'ємі металу зварних швів, зменшення параметра кристалічної ґратки.

Метою проведених досліджень було визначення особливості структуроутворення у металі зварних з'єднань при ЗЕВ. З використанням світлової мікроскопії вивчено параметри зони термічного впливу, мікроструктуру, фазовий склад і мікротвердість зварних з'єднань, отриманих без ЗЕВ та із застосуванням ЗЕВ. При застосуванні ЗЕВ у металі низьколегованих швів структура подрібнюється при рівномірному рівні мікротвердості та відсутності великих неметалевих включень. Структура більш дисперсна, розподіл густини дислокацій носить безградієнтний характер при наявності наночастинок карбідних фаз, рівномірно розподілених по об'єму. У металі легуваних зварних швів формується аустенітна структура з зернами подовженої форми. При ЗЕВ зеренна структура металу швів подрібнюється в середньому в 1,5 рази при незначному зменшенні мікротвердості. У результаті проведених робіт встановлено умови одержання якісних зварних з'єднань при зварюванні під водою, які формується в умовах ЗЕВ, що забезпечує необхідний рівень механічних властивостей та високу тріщиностійкість.

## РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ СТЕНДІ

Романенко О.В., Лопаткіна К.Г., Грабовський С.Д.,  
Васильченко В.А., Ткаченко В.А., Чвертко Н.А.

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

**Актуальність.** Застосування гібридних технологій зварювання біологічних тканин є сучасним перспективним напрямком для надання хірургічної допомоги пацієнтам. Ці технології мають потенціал змінити уявлення про обробку та з'єднання біологічних тканин, а саме: зменшити тривалість, травматичність хірургічного втручання, покращити загоєння ран і підвищити міцність і герметичність з'єднань тощо.

У відділі № 17 ІЕЗ ім. Є.О. Патона було створено експериментальний стенд для дослідження зварювання за гібридною технологією, а саме, комбінацією ультразвукового та високочастотного впливу на живу тканину. ВЧ генератор ЕКВЗ-300-2 було модифіковано, що дозволило створити нові алгоритми, які дають можливість вкладати УЗ та ВЧ енергію за певною програмою — одночасно або послідовно, а також контролювати стан тканини, вимірюючи її опір (зворотний зв'язок для керування процесом зварювання).

**Мета роботи** — експериментальне дослідження технічної, програмної, експлуатаційної можливості апарату ЕКВЗ-300-2 для керування гібридною технологією зварювання біологічних тканин.

**Матеріали та методи.** Для проведення експериментальних досліджень використовували ВЧ генератор ЕКВЗ-300-2, УЗ генератор з частотою 40 кГц та вдосконалений стенд з новими комбінованими електродами. Досліджували експериментальні гібридні режими з різною комбінацією впливу високочастотної та ультразвукової енергії на дослідні зразки біологічних тканин (сухожилки, судини та тонка кишка). Зміну основних параметрів процесу спостерігали на осцилографі, дисплеї генератора ЕКВЗ-300-2 та фіксували на ПК з подальшою їх обробкою та проведенням аналізу.

**Результати.** Застосування генератора ЕКВЗ-300-2 як складової гібридної технології зварювання біологічних тканин забезпечує: стабільність подачі високочастотної енергії в діапазоні високих частот (орієнтовно  $\approx 440 \pm 44$  кГц) та керування процесом впливу ультразвуком.

**Висновки.** Експериментальний генератор ЕКВЗ-300-2 має технічні та експлуатаційні властивості для здійснення гібридного зварювання біологічних тканин. Поєднання впливу ВЧ струму, який здійснює нагрівання біологічних тканин, з ультразвуковим ущільненням, у результаті якого відбувається сплавлення колагенових і білкових структур, може забезпечити більш міцні, однорідні та біосумісні шви в порівнянні з окремим застосуванням будь-якої з технологій.

Після створення відповідного гібридного інструменту та оптимізації алгоритмів створене обладнання буде придатне для проведення *ex vivo* досліджень і може бути впроваджене в медичну практику.

## ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ГІБРИДНОГО ЗВАРЮВАННЯ СУХОЖИЛКІВ

Романенко О.В., Лопаткіна К.Г., Ткаченко В.А., Чвертко Н.А.

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

**Актуальність.** З'єднання пошкоджених сухожилків є складною клінічною проблемою, що дуже часто призводить до довгої реабілітації, втрати функції кінцівок та інвалідності. З'єднання сухожилок традиційним хірургічним методом при використанні шовного матеріалу має певні недоліки: присутність стороннього матеріалу в зоні з'єднання, розвиток запальних процесів, нерівномірність натягу, пошкодження тканин, грубе рубцювання. Зростає цікавість до безниткового з'єднання, що може забезпечити фізичні методи, такі як високочастотне (ВЧ) та ультразвукове (УЗ) зварювання біологічних тканин.

**Мета роботи** — повести аналіз принципів, параметрів та ефективності гібридного зварювання сухожилків, яке поєднує комбіноване використання високочастотної та ультразвукової енергії для отримання міцного, однорідного шва.

**Матеріали та методи.** Аналіз проведено на основі доступних публікацій останніх десяти років (Scopus, PubMed, Google Scholar), які описують експериментальні дослідження *ex vivo* і *in vivo* із застосуванням фізичних методів з'єднання колагенових структур біологічних тканин.

Дослідники, як правило, використовували наступні параметри процесу:

- високочастотний вплив: частота 13...40 МГц, потужність 10...25 Вт, тривалість впливу 2...5 с;
- ультразвуковий вплив: частота 20...25 кГц, амплітуда 15...25 мкм, тривалість 1...3 с.

Було проведено порівняльний аналіз механічних, морфологічних і термографічних характеристик зварних швів.

**Результати аналізу.** Гібридне використання високочастотної та ультразвукової енергії забезпечує синергетичний ефект, що виражається у покращенні структури тканин та однорідності білкового з'єднання:

- високочастотна енергія створює рівномірне підвищення температури (60...80 °С), пом'якшуючи колагенові волокна та зменшуючи вологість тканини;
- ультразвукова енергія сприяє локальній денатурації білків і утворенню когезійного прошарку між волокнами;
- сформований шов має високу механічну міцність (міцність з'єднання зростає на 15...20 %) і мінімальну зону впливу.

Гібридний метод показує стабільні результати, скорочує тривалість операції та може бути у майбутньому автоматизованим.

Виявлено недоліки та обмеження в процесі комбінованого зварювання сухожилок.

- складність узгодження параметрів двох типів енергії;
- необхідність точного термоконтролю для уникнення перегріву тканини;
- складністю контролю енергії;
- недостатня кількість експериментальних досліджень і клінічних випробувань для стандартизації методу.

**Висновки.** Гібридне зварювання сухожилків є сучасним і перспективним напрямом розвитку реконструктивної хірургії, що дає можливість створювати міцні та малотравматичні з'єднання без застосування шовного матеріалу.

Результати проведеного аналізу підтверджують актуальність і доцільність проведення експериментальних досліджень з оптимізації параметрів високочастотного та ультразвукового впливу та розробки необхідного медичного обладнання нового покоління.

## ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ЕЛЕКТРОХІРУРГІЧНИЙ МОБІЛЬНИЙ АВТОНОМНИЙ ГЕНЕРАТОР МАВ-200. РОЗРОБКА ТА МОЖЛИВОСТІ

Романенко О.В., Ткаченко С.В., Грабовський С.Д.,  
Самойлова Т.Г., Бісько В.О., Чвертко Н.А.

*Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

Нагальною потребою в теперішній воєнний час стала швидка зупинка кровотеч за рахунок перекриття ушкоджених судин під час поранень на полі бою. Надання такої медичної допомоги захищає воїнів від інвалідності та зберігає їхнє життя. Проблемами використання традиційних методів є: ненадійність зупинки кровотеч в екстремальних умовах, відсутність мобільної апаратури для здійснення цих процесів, нестабільність отриманих результатів. Тримання турнікетів та стискаючих пов'язок на ураженій кінцівці має обмежений термін дії (не більше ніж 2 год). Наслідки можуть бути дуже серйозними: некроз тканин, тромбоз судин, накопичення токсичних продуктів розпаду тканин.

Метою роботи було створення високочастотного електрохірургічного мобільного автономного апарата для надання екстреної медичної допомоги із зупинки кровотеч різного типу в польових умовах і клініках з отриманням стабільно надійних результатів.

В основу розробки високочастотного електрохірургічного мобільного автономного апарата МАВ-200 покладені результати численних комплексних лабораторних і клінічних досліджень, проведених на біологічних тканинах різних типів (судини, сухожилки, тонка кишка). Вони достеменно довели, що з використанням нової елементної бази, нової оригінальної схеми керування та програмного забезпечення можливо створити малогабаритний мобільний автономний апарат з новими можливостями.

Створено лабораторну модель високочастотного мобільного автономного електрохірургічного апарата МАВ-200, який складається з: спеціального високочастотного генератора, блоку зарядки, спеціальних медичних інструментів.

Подача керованої високочастотної енергії для впливу на біологічну тканину дозволяє здійснювати перекриття судин, зупинку поверхневих кровотеч та зупинку кровотеч з глибоких проникаючих ран з отриманням стабільно якісних результатів.

Модель високочастотного електрохірургічного мобільного автономного апарата має оригінальний алгоритм роботи, який дає можливість оперативного керування вихідною енергією з малими затратами потужності. Завдяки автоматичному регулюванню процесу подачі енергії за допомогою зворотного зв'язку реалізується можливість гнучкого впливу на м'які тканини різної щільності на різних режимах.

МАВ-200 може працювати як від зовнішнього джерела електроенергії, так і автономно — від внутрішніх акумуляторів. Середня потужність – 30 Вт, потужність в імпульсі — до 300 Вт, тривалість автономної роботи — 50–100 робочих циклів, залежно від об'єкта впливу.

Малі габаритні розміри — 220×200×85 мм та незначна вага — 1,5 кг дозволяють здійснювати легке транспортування апарата одним медичним працівником.

Сферами використання апарата МАВ-200 є: військові шпиталі, військові медичні підрозділи, Державна служба медицини катастроф України.

## ЕТАПИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ СТРУМОМ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Семікин В.Ф., Ланкін Ю.М., Романова І.Ю., Байштрук Є.М.

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

Включення баластного реостата або дроселя в ланцюг постійного струму дозволило обмежувати струм короткого замикання та внаслідок цього досягти меншого розбризкування металу. У розвиток цього напрямку пропонувались приставки до джерел живлення, наприклад у вигляді з RLC-ланцюгів з дугою, які є актуальними й донині завдяки їх специфічним властивостям — імпульсним хаотичним коливанням струму зварювальної дуги. З розвитком електроніки створювались джерела імпульсного дво- та багатоступінчастого струму. Це призвело до появи технологій імпульсно-дугового зварювання плавким електродом (ІДЗПЕ). Спосіб ІДЗПЕ показав свою високу ефективність для з'єднань різноманітних матеріалів, коли потрібно забезпечити перенос електродного металу в різних просторових положеннях з невеликими розбризкуваннями. Існує так званий «ідеальний» цикл зварювання в  $CO_2$ , який повинен вирішувати задачі компенсації збуджень, підвищення стабільності процесу зварювання, зменшення розбризкування металу. Наступним етапом розвитку було створення джерел живлення із заданими вольт-амперними характеристиками, наприклад, джерело живлення з багатосегментною вольт-амперною характеристикою, яка має сегменти з постійною напругою, постійним струмом і постійним нахилом. Важливі ефекти якості процесу (протидія випадковим збуренням, стабільність дуги, зменшення розбризкування металу, підтримка дуги на низьких струмах) відбуваються внаслідок саморегулювання на окремих фазах зварювання. З кінця минулого століття розпочався розвиток інверторних джерел живлення з поступовим інтегруванням мікроконтролерної техніки. На перших етапах мікроконтролери застосовувались для виконання функцій людино-машинного інтерфейсу: відображення інформації на алфавітно-цифровому дисплеї, завдання параметрів і перемикання режимів зварювання за допомогою кнопок, перемикачів, енкодерів. Наступним була інтеграція мікропроцесорів і мікроконтролерів у зварювальні інвертори для прямого цифрового керування процесом зварювання.

Сучасний етап розвитку вирізняється інтелектуалізацією зварювальних інверторів завдяки збільшенню інформаційної потужності контролерів. «Інтелектуальні зварювальні інвертори» покращують безпечність і зручність експлуатації, забезпечують надійний розпал дуги (Hot Start), запобігають залипанню електрода (Arc Force, Anti-Stick), знижують напругу холостого ходу до безпечного рівня (VRD), плавно регулюють напругу в широких межах для зварювання тонких конструкцій, здійснюють автоматичний вибір режиму в залежності від матеріалів та виду зварювання (Synergy control). Надалі функції інтелектуальних інверторів розвиваються завдяки використанню новітніх засобів комунікації та зберігання інформації. Інвертори фірм Megmeet, Lincoln, EWM, Kemppi, ESAB, Fronius, Miller мають у своєму складі модулі для інтеграції в промислові мережі IoT (Internet of Things — інтернет речей). З новими інтелектуальними інверторами стають реалізованими та затребуваними інформаційно-вимірвальні системи для дугового зварювання, бази даних режимів зварювання із застосуванням інтернет-платформ. Провідні фірми мають системи керування та сервіси з доступом через інтернет та використанням віддалених серверів (Cloud Platforms — хмарні платформи). Завдяки цьому розвиваються такі функції інтелектуальних інверторів як: запис і зберігання всіх параметрів і подій у процесі зварювання для подальшого аналізу, аудиту, оптимізації, цифрового документування; використання алгоритмів штучного інтелекту для аналізу параметрів зварювання та налаштування їх в реальному часі; моніторинг і самодіагностика — контроль температури, перенавантажень, зношування, прогноз зношування компонентів; інтеграція з промисловими роботами; швидкий старт — автоматичне визначення типу електрода та параметрів зварювання без ручного налаштування; налаштування графічного операторського інтерфейсу за вимогами користувача із застосуванням сенсорних TFT та HD екранів; візуалізація дуги на моніторі в реальному часі; оновлювання програми контролера — загрузка програмного забезпечення (ПО) через інтернет, що дозволяє актуалізувати ПО та продовжити термін життя контролера; використання додатків смартфона для мобільного контролю й візуалізації даних процесу зварювання та технічних засобів.

Таким чином, сучасні інверторні джерела живлення для електродугового зварювання є багатофункціональними, гнучкими, програмованими, інтегруються в індустріальні мережі IoT. Це дає можливість застосовувати нові все більш складні та ефективні алгоритми керування процесами зварювання та реалізовувати весь накопичений технологічний здобуток способів зварювання, створювати нові технології.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ І ДИСТОРСІЇ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ТРУБЧАСТИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Сенченков І.К.<sup>1</sup>, Рябцев І.О.<sup>2</sup>, Червінко О.П.<sup>1</sup>, Доля О.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ

<sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

<sup>3</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Проведено чисельне моделювання поточного та залишкового напружено-деформованого стану трубчастого елемента при наплавленні на зовнішній або внутрішній поверхнях. Матеріал основного елемента та наплавленого шару — сталь 35ХМА.

Розрахункова модель базується на теорії тіл, що ростуть. Для чисельного моделювання використовується метод скінченних елементів. Термомеханічна поведінка матеріалу описується моделлю в'язкопластичності Боднера–Партома із залежними від температури та фазового складу параметрами. Мікроструктурний склад матеріалу визначається за допомогою термокінетичних діаграм.

На рис. 1 показано наплавлений зразок і його розрахункову схему. Результати розрахунків залишкового НДС наведені на рис. 2, а, б, де  $s_i$  — напруження Мізеса,  $\sigma_0 = \sigma_{kk}/3$ . Прогин по внутрішньому радіусу показано на рис. 2, в.

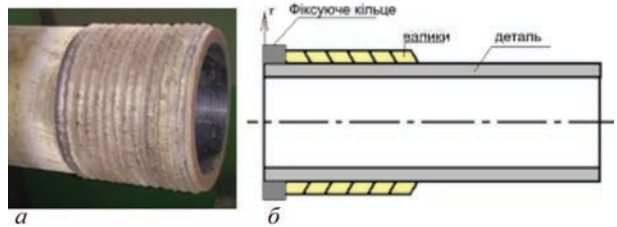


Рис. 1

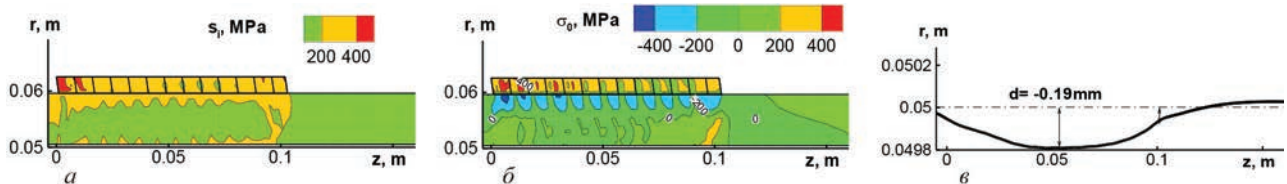


Рис. 2

Досліджено впливи умов теплообміну на залишковий стан. Надано оцінку наближеної моделі миттєвого накладання наплавленого шару.

## РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВОГО НДС ПРИ НАРОЩУВАННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ТІЛ ІЗ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Сенченков І.К.<sup>1</sup>, Юрженко М.В.<sup>2</sup>, Червінко О.П.<sup>1</sup>, Усов В.А.<sup>1</sup>

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

Робота присвячена розвитку моделей і методики розрахунку термомеханічних процесів в адитивних технологіях (AM Technology), зокрема 3D-принті. Математична модель базується на теорії тіл, що ростуть. Мікροструктурний стан матеріалу визначається за допомогою термокінетичної діаграми. Термов'язкопластична поведінка матеріалу описується уніфікованою моделлю Боднера–Партома. Методика чисельного розв'язання крайової задачі термомеханіки містить метод крокового інтегрування за часом рівнянь теплопровідності, течії, еволюції параметрів зміцнення. Використовується ітераційний метод розв'язання нелінійної задачі на кожному часовому кроці та метод скінченних елементів для розв'язання лінеаризованої задачі на кожній ітерації.



Розвинута схема пошарового нарощування матеріалу відрізняється від техніки «birth and death» в комплексах ANSYS і ABACUS та дозволяє враховувати історію навантаження нарощуваного елемента й теплові граничні умови на поверхні нарощування.

Проведено розрахунки для модельної задачі нарощування порожнистого циліндра  $0,08 < r < 0,09$  м вісьмома шарами  $\Delta z = 0,01$  м сталі 35ХМА. На рисунку показано конфігурацію нарощеного циліндра, розподіли залишкових напружень Мізеса та інтенсивностей пластичних деформацій.

Встановлено квазіперіодичний характер розподілів характеристик НДС і наявність концентрації в крайових зонах поверхні нарощення.

## **ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ПРОКОВКИ ТА МЕХАНІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНИМ НІКЕЛЕМ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ КОРОЗІЙНІЙ ВТОМІ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 15ХСНД**

**Соловей С.О., Мордюк Б.М., Мірянін В.М., Булаш В.М., Ткач І.Г.**

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

Зварні металоконструкції інженерного призначення (мости, шляхопроводи, мостові крани, антено-щоглови споруди тощо) у процесі експлуатації зазнають впливу змінних навантажень і кліматичних факторів зовнішнього середовища. З метою підвищення характеристик опору втомі зварних конструкцій, які зазнають впливу корозії та змінних навантажень, застосовуються різні методи поверхневого пластичного деформування (ППД) металу. Одним з найбільш ефективних методів ППД є комбінована обробка технологією високочастотної механічної проковки (ВМП) з одночасним механічним легуванням ультрадисперсним нікелем.

Проведено втомні випробування у 3 % розчині NaCl двох серій зразків стикових зварних з'єднань низьколегованої сталі 15ХСНД — у вихідному стані (перша серія) та зміцнених за комбінованою обробкою: технологією ВМП + механічне легування ультрадисперсним нікелем (друга серія). Зразки стикового зварного з'єднання розмірами 360×70×12 мм виготовляли автоматичним зварюванням під флюсом з двох сторін. Зміцнення ВМП з одночасним механічним легуванням зони переходу металу шва на основний метал проводили однорядною зміною головкою з діаметром бойків 4 мм. У подальшому зразки випробували на втому на випробувальній машині УРС-20 у 3 % розчині NaCl при віднульовому змінному розтягуванні з максимальними напруженнями циклу 225 МПа з частотою 5 Гц до повного руйнування.

Експериментально встановлено, що циклічна довговічність незміцнених стикових зварних з'єднань у 3 % розчині NaCl знаходиться в діапазоні 121...197 тис. циклів змін напружень, а зміцнених за комбінованою обробкою — у діапазоні 800...1750 тис. циклів змін напружень. Таким чином, зміцнення стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД комбінованою обробкою (технологією високочастотної механічної проковки + механічним легуванням ультрадисперсним нікелем) збільшує їхню циклічну довговічність у 3 % розчині NaCl у 5...8 разів.

## PATON INTERNATIONAL — EVOLUTIONS IN YEARS

**Stepakhno A.V.**

*LLC «Paton International», Kyiv*

The history of welding equipment manufacturing in Ukraine spans nearly a century. For over six decades, this legacy has been intrinsically linked to PATON INTERNATIONAL, a company founded in 1959 at the renowned E.O. Paton Electric Welding Institute. Established to bring cutting-edge welding technologies developed by the Institute to market, PATON INTERNATIONAL has since produced hundreds of thousands of units of welding equipment for industries across virtually every continent. Today, PATON INTERNATIONAL stands as a leading Ukrainian manufacturer of welding equipment and consumables and holds a prominent position in the markets of the CIS region.

PATON's **two production facilities in Kyiv** form the nucleus of its operations. These facilities collaborate closely with the E.O. Paton Electric Welding Institute, one of the world's foremost research centers in the field of welding. The company's in-house R&D laboratories manage every aspect of product development — from mechanical design and enclosure fabrication to the creation of advanced electronic circuits and proprietary software. As a result, PATON currently **manufactures over 60 models** of welding equipment, including:



- manual arc welding (**MMA**) inverters rated from 150 to 630 A;
- **MIG/MAG** semi-automatic welding machines from 150 to 630 A;
- argon arc (**TIG**) inverters from 200 to 350 A;
- air-plasma cutting machines (**CUT**) from 40 to 100 A;
- **multifunctional** welding inverters from 250 to 350 A.

PATON equipment integrates components sourced from leading global manufacturers such as **INFINEON, VI-SHAY, KENDEIL, NXP, TOSHIBA, and TEXAS INSTRUMENTS**. Com-

plemented by high-quality welding accessories produced in Germany and Ukraine, the equipment reflects the company's commitment to excellence. This dedication is backed by extended **warranties of up to 5 years**, demonstrating PATON's confidence in the durability and reliability of its products.

In addition to equipment, PATON INTERNATIONAL **produces a comprehensive range of welding accessories and electrodes**, including the 10 most popular grades that meet international standards such as **AWS 5.1:E6013, E7015, E7018; A5.4:E347-16; 5.15:ESr; and EN 14700: E Z Fe14**. Manufactured using refined formulations and raw materials from top-tier Ukrainian and international suppliers, PATON electrodes are certified by leading international quality bodies and are known for their excellent performance, arc stability, and user-friendly operation.

At the end of 2024, PATON once again reaffirmed its position as a technological leader by launching a **new generation of welding machines**. This release is the result of continuous improvement driven by feedback from professional welders and the evolving needs of modern manufacturing. Rather than being a routine upgrade, the new generation marks a significant leap forward in welding technology.

At the core of the new series is a completely redesigned hardware architecture that operates **five times faster** than its predecessor. This advancement enables much higher precision and responsiveness in controlling the welding process. User experience has also seen a major boost: a new encoder makes parameter adjustments intuitive, while a large **LCD display with a graphical interface** provides clear, real-time visual feedback during setup and operation.

The feature set has been significantly expanded, with enhancements to existing functions and the introduction of entirely new ones, **including inductance adjustment, Smart Stop, SPOT mode, PULSE welding**, and more. The

interface now updates dynamically in real time, giving welders complete visibility and control throughout the welding process.

Thanks to its engineering innovations, high manufacturing standards, and decades of expertise, PATON's products enjoy strong recognition among welding professionals both in Ukraine and around the world. Expanding its global reach remains a strategic priority for PATON. Today, the **company exports to over 50 countries**, spanning Latin America, Europe, Asia, Africa, and Australia.

One of PATON's top priorities is strengthening its position on the European market — and it's making bold strides forward.

By combining European-level quality, cutting-edge functionality, energy efficiency, and compact design, PATON delivers a powerful alternative to many global brands. And to ensure maximum convenience for European customers, the company has established official branches in Poland (**PATON Europe**) and the United Kingdom (**PATON Welding UK Ltd**). These regional offices oversee logistics, service, and product distribution across the EU and the UK — bringing PATON even closer to its customers.

To make PATON equipment more accessible than ever, the company has gone far beyond the traditional distributor model. PATON INTERNATIONAL has launched over 30 official regional online stores and ensured its presence on nearly all major European and global e-commerce platforms — **Amazon, eBay, Kaufland, CDiscount, OnBuy, Leroy Merlin, Rakuten**, and more. Whether you're a DIY enthusiast or an industrial professional, finding and ordering PATON products is just a few clicks away.

And there's even more good news for European buyers: thanks to partnerships with leading financial platforms like **PayPal, Klarna, Comgate, Santander**, and others, PATON equipment can now be purchased in convenient monthly installments. High-quality welding solutions are now more affordable and accessible than ever.



with accessible, reliable, and high-performance welding solutions.

Learn more at [paton-welding.com/en](https://paton-welding.com/en)



What truly sets PATON apart is its absolute transparency and confidence in the quality of its products. With one of the longest warranty periods on the market, PATON proudly stands behind every machine it builds. The company is also actively represented on top reputation platforms like Trustpilot and Trustmate, where real users and customers freely share their experiences, leaving honest and qualified reviews.

PATON INTERNATIONAL is not just a manufacturer — it's a driver of innovation. Constantly investing in research and development, the company is committed to its global mission: to empower welders around the world

## RESTORATION OF XM-25 TURBINE BLADES VIA DED LASER CLADDING: MICROSTRUCTURAL EVOLUTION AND MECHANICAL PERFORMANCE

**Tiancheng An, Berdnikova Olena**

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

High-strength martensitic precipitation-hardened stainless steel XM-25, widely used in low-pressure steam turbine blades, faces severe surface wear and water erosion during service. This study presents the restoration of large XM-25 blades via Directed Energy Deposition (DED) laser cladding using parent material powder, followed by aging treatment at 480 °C for 4 hours. The cladding process parameters were optimized to achieve defect-free metallurgical bonding. Comprehensive characterization, including non-destructive testing (PT, RT), microstructural analysis (OM, SEM, EDS, XRD), microhardness measurement, tensile testing, and high-cycle fatigue testing ( $R = 0.1$ ), was conducted to evaluate the repaired blades. Results show that the cladded layers exhibit refined martensitic structures with uniformly dispersed precipitation-strengthening phases, microhardness up to 400  $HV0.2$ , tensile strength exceeding 1200 MPa, and yield strength above 1050 MPa. Residual stress in the cladding area is approximately 30 % of the base material, and the fatigue limit reaches 95 % of the substrate, indicating excellent mechanical performance. The study demonstrates that DED laser cladding with subsequent aging is a reliable engineering solution for restoring XM-25 turbine blades, enhancing structural integrity, fatigue resistance, and surface durability.

## РЕТРОСПЕКТИВНИЙ ПОГЛЯД НА РОЗВИТОК ДЕФЕКТІВ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ АУСТЕНІТНОЇ СТАЛІ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС

**Тороп В.М., Рабкіна М.Д., Давидов Є.О.**

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

У наступному році минають 40 років з моменту, коли 26 квітня 1986 р. на 4-му енергоблоці Чорнобильської АЕС стався вибух, який повністю зруйнував реактор, постраждав частково машинний зал (у зоні 4-го енергоблоку); у різних приміщеннях та на даху почалася пожежа. Ця подія стала однією з найбільших техногенних катастроф в історії, що спричинила масштабне радіоактивне забруднення та серйозні довгострокові наслідки для здоров'я людей та екології. Після аварії перший та другий енергоблоки залишилися у нормальному працездатному стані та були зупинені 27 квітня 1986 р. Третій енергоблок, технічно пов'язаний з четвертим, зупинили через півтори години після аварії. Тому, на відміну від 1-го і 2-го енергоблоків, на 3-му енергоблоці ЧАЕС був проведений великий обсяг відновлювальних робіт. Устаткування, трубопроводи, вентиляційні короби, кабельні траси в приміщеннях 3-го енергоблоку з великими рівнями  $\gamma$ -випромінювання були демонтовані для зниження радіаційного фону. Захисно-розподільча стіна між 3-м та 4-м енергоблоками бетонувалася й облицьовувалася свинцем для зменшення радіаційного фону. Зводилися додаткові захисні стіни на інших ділянках блока [1].

Питання відновлення експлуатації трьох енергоблоків Чорнобильської АЕС і проведення необхідних для цього робіт були у ряді найважливіших у плані ліквідації наслідків аварії і вирішувалися паралельно з роботами з консервації четвертого енергоблоку. Але 30 листопада 1996 р. Кабінетом Міністрів України було прийняте рішення про остаточну зупинку енергоблоку № 1, 15 березня 1999 р. — енергоблоку № 2 і нарешті 29 березня 2000 р. — енергоблоку №3 та остаточне закриття ЧАЕС. Причиною таких дій стали зобов'язання України перед світовою спільнотою, що зафіксовані у Меморандумі про Взаєморозуміння між Урядом України і Урядами країн «Великої сімки» та Комісією Європейського Співтовариства щодо Закриття Чорнобильської АЕС. Меморандум було підписано 25 грудня 1995 р. «...Вжити всіх необхідних заходів для виведення ЧАЕС з експлуатації в найстисліший, практично досяжний строк», — йдеться у Меморандумі. Після аварії, у період з 1986 по 2000 рр. Чорнобильська АЕС виробила 158,6 мільярдів кВт-годин електроенергії. На момент закриття на ЧАЕС працювало 9000 осіб. Наразі кількість робітників складає менше, ніж 2400 осіб [1].

У 2009 р. прийнято Закон України «Про Загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему» [2], що передбачає «...проваджувати діяльність зі зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС за такими етапами:

- 1) припинення експлуатації (підготовчий етап до зняття з експлуатації) — етап, під час якого буде здійснено вилучення ядерного палива та переміщення його у сховище відпрацьованого ядерного палива, призначене для довгострокового зберігання. Поточний етап, під час якого виконується основне завдання, що визначає тривалість етапу, — вилучення ядерного палива з енергоблоків. Строк завершення — не раніше 2013 р.;
- 2) остаточне закриття та консервація реакторних установок. На цьому етапі буде проведено консервацію реакторів і найбільш радіаційно забрудненого устаткування (орієнтовно до 2022 р.);
- 3) витримка реакторних установок протягом періоду, під час якого повинне відбутися природне зниження радіоактивного випромінювання до прийнятного рівня (орієнтовно до 2045 р.);
- 4) демонтаж реакторних установок. На цьому етапі буде проведено демонтаж устаткування та очищення майданчика з метою максимального зняття обмежень і регуляторного контролю (орієнтовно до 2065 р.)».

Зазначимо, що підготовчий етап 1 до зняття з експлуатації, тривав з 2000 по 2015 рр., а сучасний етап 2 виконується з 2015 до орієнтовно 2028 рр. та передбачає наступні завдання:

- Приведення енергоблоків ЧАЕС до стану, який виключає можливість використання їх для виробництва електроенергії.
- Звільнення енергоблоків від джерел іонізуючого випромінювання, що підлягають контролю.
- Консервація реакторів і найбільш радіаційно забрудненого устаткування.

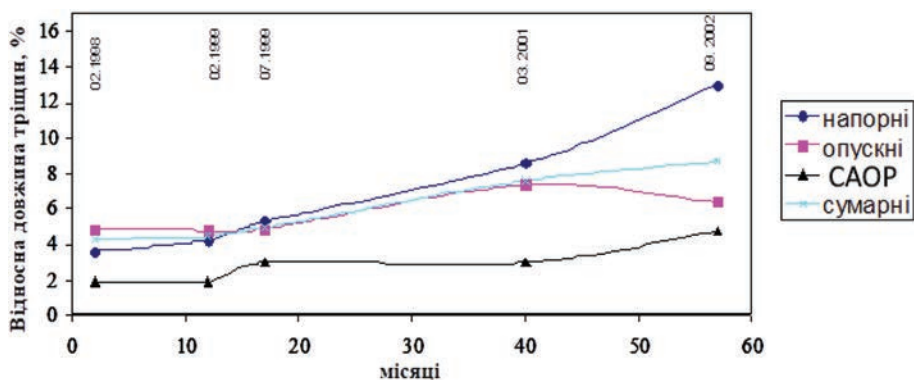
Саме на цьому етапі суспільство має бути впевнено, що обладнання та трубопроводи виведених з експлуатації енергоблоків ЧАЕС безпечні та відповідають функції за призначенням.

Слід зазначити, що співробітники спеціалізованих підрозділів Академії наук України мали виняткову можливість провести дослідження фрагментів уражених металевих конструкцій на ЧАЕС. Як приклад приведемо створену ефективну методологію прогнозування цілісності трубопроводів, що дозволяє вирішувати значний спектр проблем щодо забезпечення безаварійної експлуатації складних конструкцій з корозійними та втомними дефектами, у тому числі розташованими в околі зварних швів [3–5].

Під час зупинки третього енергоблоку ЧАЕС на планово-попереджувальний ремонт у 1997 р. було проведено 100 % радіографічний контроль, а також — ультразвуковий контроль зварних швів трубопроводів системи безпеки енергоблоку № 3 ЧАЕС, отримані в 1997–1998 рр. Результати контролю наведені в [6, табл. 2, 3].

*Особливості розвитку тріщин міжкристалічної корозії.* Як показали дослідження, виконані на вирізаних із трубопроводів блоку №3 (зовнішній діаметр 325 мм і товщина стінки 16 мм) пошкоджених кільцевих зварних швів, тріщини міжкристалічної корозії зароджуються біля кореневого шва на внутрішній стінці труби та розвиваються, як правило, у зоні термічного впливу вздовж лінії сплавлення шва. Місцями зародження тріщини є локальні концентратори напружень, викликані або стяжкою металу при охолодженні кореневого зварного шва, або грубими рисками механічного оброблення внутрішньої поверхні труби під зварювання. Велика кількість таких концентраторів на внутрішній стороні шва й поблизу шовної зони призводить до зародження декількох тріщин. Ці тріщини, що мають декілька зародків, які розташовані в різних паралельних перерізах труби, у процесі розвитку часто зливаються в одну тріщину. Оскільки моменти зародження цих тріщин не співпадають за часом, тому одні тріщини випереджають інші, що при злитті їх у загальну магистральну тріщину призводить до звивистого її фронту.

На рисунку показано що, незважаючи на виведення блоку з експлуатації, що відбулося у грудні 2000 р., зростання тріщин у всіх видах трубопроводів не припинилося, а для напірних і трубопроводів аварійного охолодження реактора (САОР) навіть прискорилося.



Розвиток пошкоджень зварних з'єднань трубопроводів Ду300 КМПЦ блока № 3 ЧАЕС за результатами неруйнуючого контролю

У цілому результати дослідження процесу міжкристалітного корозійного розтріскування (МККРТ) у зварних з'єднаннях трубопроводів із аустенітних сталей у реакторах киплячого типу показують, що в основі цього процесу руйнування лежать три основні чинники, без наявності хоч би якого-небудь одного з них явище МККРТ неможливе. Ці чинники такі:

1. *Досить високий рівень розтягуючих напружень.* У зварних з'єднаннях трубопроводів Ду300 ЧАЕС цей чинник забезпечується, насамперед, за рахунок високого рівня залишкових зварювальних напружень, які на внутрішній поверхні труби в околі кореневого шва є такими, що розтягують і досягають порядку величини границі плинності. Додатковим стимулюючим чинником є робочі напруження розтягу, що виникають від дії результуючих осьових зусиль і згинаючих моментів в області зварних з'єднань.

2. *Сенсibiliзація границь зерен сталі за рахунок їх збіднення атомами хрому, що зв'язуються в карбіди  $Cr_{23}C_6$  надмірним вуглецем.* В умовах зварювання кільцевих швів областю сенсibiliзації матеріалу виявляється вузька (декілька сотих мікронів) смужка зони термічного впливу, прилегла до лінії сплавлення. Для запобігання цьому явищу сталь стабілізують добавками титану або ніобію. Однак, як показують результати на прикладі сталі 08X18N10T, досягти повної стабілізації за рахунок добавок титану не вдається.

3. *Наявність агресивного корозійного середовища.* У реакторній воді реакторів типу РБМК основною причиною МККРТ є кисень у вигляді молекул  $O_2$  і перекису водню  $O_2H_2$ , при чому останнє з'єднання є більш

агресивним [7]. На жаль, для реакторів типу РБМК відсутня нормативна вимога контролю вмісту кисню у воді, тому оцінка рівня електрохімічного потенціалу ускладнена. Виходячи зі статистичної обробки представлених ЧАЕС даних хімічного аналізу води за 10 років (1988–1997 рр.) експлуатації блоку № 3, встановлено, що величина електричної провідності знаходилася в межах 0,10...0,35 мкС/см при середньому значенні 0,21 мкС/см і величині, що допускається, 1,0 мкС/см. Враховуючи те, що вміст кисню у воді працюючого реактора РБМК приблизно становить 30 мкг/кг (тобто 30 ррб у західних позначеннях), у [8, 9] було зроблено спробу оцінити ситуацію на блоці №3 ЧАЕС та наведено дані, що показують зв'язок між величиною електрохімічного потенціалу та електропровідністю теплоносія.

На цей час із 113 тріщиномістких зварних з'єднань залишались невідремонтованими 89. Спробуємо зрозуміти, які зміни в дії перерахованих вище трьох чинників, контролюючих процес МККРТ, могли статися після виведення блоку № 3 з експлуатації, і як ці зміни могли вплинути на швидкість росту тріщин міжкристалітної корозії.

1) *Осьові напруження розтягу*. Оскільки основний внесок у них дають залишкові напруження, тоді згідно з нашими оцінками [9] робочі напруження в найбільш несприятливих випадках ледве досягають 10...20 % від величини границі плинності, можна вважати, що цей чинник залишається в силі. Зміна параметрів (температура й тиск) води могла призвести до перерозподілу і зниження осьових напружень у зварних з'єднаннях, але немає підстав чекати, що вони будуть зниженими настільки, щоб усунути дію цього чинника.

2) *Сенсibiliзація сталі*. Очевидно, що цей чинник зумовлений режимом зварювання і не пов'язаний з умовами експлуатації, тому його вплив залишається незмінним і після виведення блоку з експлуатації.

3) *Хімічний склад води*. Згідно з даними ЧАЕС за період з серпня 2001 р. по серпень 2002 р. питома електропровідність води на блоці № 3 знаходилася в межах 0,55...1,1 мкС/см при середньому значенні 0,88 мкС/см і допустимому 2,0 мкС/см, у той час як за роки експлуатації блоку з 1988 по 1997 рр. — у межах 0,10...0,35 мкС/см при середньому значенні 0,21 мкС/см, тобто збільшилася майже в 5 разів. Це означає, що після виведення блоку з експлуатації вплив чинника корозійної агресивності води міг істотно збільшитися.

Таким чином, з наведених даних на рисунку та виконаного аналізу витікає, що немає великих підстав чекати, що з виведенням блоку № 3 з експлуатації інтенсивність процесів МККРТ в зварних з'єднаннях трубопроводів КМППЦ повинна істотно знизитися, а отже, для остаточного висновку про припинення або розвиток тріщин потрібно продовжити матеріалознавчі дослідження та проведення вибіркового обстеження дефектних зварних з'єднань за допомогою засобів неруйнівного контролю.

1. <https://chnpp.gov.ua/ua/about/history-of-the-chnpp-2/chnpp-shutdown>
2. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17#Text>
3. Красовский А.Я., Маковецкая И.А., Тороп В.М. (2003) Структура и свойства материалов блока № 3 ЧАЭС после 100000 часов эксплуатации. *Тез. докл. Международной конф. «Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС», 20–22 мая 2003, Киев*, с. 60.
4. Красовский А.Я., Маковецкая И.А., Тороп В.М., Чугунов В.А. (2000) Экспертиза причин коррозионного растрескивания под напряжением трубопроводов первого контура АЭС. *Тез. докл. Международной конф. «Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций», 6–9 июня 2000 г.*, т. 1, Киев, изд. ИПП НАНУ
5. Красовский А.Я., Орынкяк И.В. (2000) Оценка остаточного ресурса сварных швов трубопроводов первого контура АЭС, поврежденных межкристаллитной коррозией. *Автоматическая сварка*, **9–10**, 57–65.
6. Тороп В.М., Рабкіна М.Д., Давидов Є.О. (2024) Дослідження міжкристалітного корозійного розтріскування зварних з'єднань трубопроводів чорнобильської АЕС Матеріалознавчий аспект. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **4**, 23–31. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.04.04>
7. IAEA-EBP-IGSCC (2002) *Mitigation of intergranular stress corrosion cracking in RBMK reactors. Final Report of the Programme's Steering Committee. IAEA-EBP-IGSCC*. A publication of the extrabudgetary programme on mitigation of intergranular stress corrosion cracking in RBMK reactors. IAEA, September 2002.
8. Speidel M.O., Magdowski R. (1999) *Growth rates of stress corrosion cracks in Ti-stabilized austenitic stainless steel type 321 from Chernobyl №3 RBMK-1000 nuclear power plant*. Institute of Metallurgy, Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zurich.
9. Красовский А.Я., Неретин А., Тороп В.М. (2003) Межкристаллитное коррозионное растрескивание сварных швов трубопроводов Ду300 блока РБМК-1000 после вывода из эксплуатации. *Тез. докл. Международной конф. «Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС», 20–22 мая 2003, Киев*, с. 61.

## РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ТИТАНОВИХ СУГЛОБНИХ ІМПЛАНТАТІВ

**Троїцький В.О., Михайлов С.Р., Пастовенський Р.О., Карманов М.М.**

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

Нині цифрова радіографія є одним з найбільш поширених і перспективних методів радіаційного неруйнівного контролю якості матеріалів і виробів. У порівнянні з системами на основі проміжних носіїв інформації (плівкова радіографія, електрорадіографія, комп'ютерна радіографія) цифрова радіографія, разом з можливістю отримання зображень у реальному часу, дозволяє істотно підвищити продуктивність і знизити вартість контролю, дає можливість комп'ютерної обробки та аналізу цифрових зображень, створення електронних архівів цифрових зображень тощо.

У доповіді представлено результати радіаційного контролю титанових суглобних імплантатів (ендопротезів) за допомогою двох цифрових рентгентелевізійних систем. Виготовлення таких ендопротезів є однією з важливих задач медичної техніки, які застосовуються в травматології, ортопедії та онкоортопедії у клінічних установах. Такі вироби виготовляються методом 3D друку заготовок з подальшою термічною обробкою. Це — так звані адитивні технології. Для 3D друку заготовок ендопротезів використовується порошок із титанового сплаву. Друк здійснюється за допомогою 3D принтера, а термічна обробка проводиться в захисному шарі аргону.

Одна з рентгентелевізійних систем розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України на основі високочутливого ПЗЗ-сенсора Sony ICX-285AL розміром 2/3" з кількістю ефективних пікселів 1392×1040. У якості рентгенівського екрана в системі застосовується ефективний гадолінієвий екран Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S(Tb) з товщиною люмінофорного шару 200 мкм та роздільною здатністю 5,5 пар лін./мм. Розмір робочого поля системи складає 160×120 мм, що дозволяє виконувати контроль окремого ендопротеза за одну експозицію.

Друга рентгентелевізійна система виконана на основі сенсора S10811-11 фірми Hamamatsu Photonics (Японія) з робочим полем 34×24 мм. Сенсор має матрицю 1700×1200 пікселів, розмір пікселя 20 мкм та просторову роздільну здатність 20 пар лін./мм. Керування детектором S10811-11 здійснюється від комп'ютера через порт USB 2.0 за допомогою контролера C9266-04, який перетворює аналоговий сигнал детектора в цифровий (АЦП — 12 біт) та формує сигнали керування детектором.

Для контролю застосовувався рентгенівський апарат РАП-150/300. Фокусна відстань при контролі становила 700 мм, анодна напруга рентгенівської трубки — 60...70 кВ, анодний струм — 10 мА, а час експозиції — 5...10 с.

На першому етапі контролю ендопротези просвічувалися рентгентелевізійною системою з розміром робочого поля 160×120 мм. Якщо на цьому етапі на отриманих рентгенівських зображеннях виявлялися проблемні ділянки з підозрою на наявність дефектів, то на другому етапі контролю ці ділянки контролювалися за допомогою сенсора з високою роздільною здатністю S10811-11, який є фактично рентгентелевізійним мікроскопом та дозволяє виявити малорозмірні дефекти.

Результати проведеного радіаційного контролю титанових суглобних імплантатів (ендопротезів) за допомогою двох цифрових рентгентелевізійних систем показали, що запропонована методика контролю є ефективною та може повністю замінити малопродуктивну та коштovanу плівкову радіографію.

## ВІДХИЛЕННЯ ХАРАКТЕРНИХ ЧАСТОТ ПРОЯВУ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКІВ ЯК ДОДАТКОВИЙ ІНДИКАТОР ЇХ СТАНУ

Трохим Г.Р.<sup>1</sup>, Черчик Г.Т.<sup>1</sup>, Шарамага Р.В.<sup>1</sup>, Яворський І.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>2</sup>Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

Більшість дослідників розглядають вібраційний сигнал як випадковий стаціонарний процес, а всі обчислення відповідно проводять у стаціонарному наближенні. Вважають, що спектральна густина потужності є інформативною характеристикою вібраційного сигналу, а її аналіз у стаціонарному наближенні дозволяє виявляти лише розвинуті дефекти. Тому, користуючись таким підходом, важко виявляти дефекти від обертових елементів механізмів на ранніх стадіях їх розвитку.

При дослідженні й аналізі вібраційних сигналів від обертових елементів механічних систем доцільно використовувати методи статистичного аналізу, що ґрунтуються на теорії та методах періодично нестационарних випадкових процесів (ПНВП). Точність визначення частоти обертання валу є важливою при моніторингу стану підшипників. Також відомо, що визначена частота прояву дефекту підшипника у вібраційному сигналі може відхилитись від розрахункової за рахунок ефекту проковзування тіл кочення на 1...2% [1]. При аналізі двох реалізацій вібраційного сигналу відомої бази підшипникового центру SWRU [2] методами ПНВП-аналізу визначали частоти проходження кульок за дефектом зовнішнього кільця. Для дефектів з меншим розміром відхилення частоти, визначене за довжиною реалізації сигналу 120000 відліків (частота дискретизації 12 кГц) становило +0,2%, а з більшим дефектом — +0,4%. Присутність дефекту на зовнішньому кільці підшипника кочення підвищує імовірність проковзування кульок. Таке проковзування за умов достатньої довжини реалізації досліджуваного вібраційного сигналу дозволяє статистично достовірно визначити відхилення частоти проходження кульок по зовнішньому кільцю. Збільшення визначених частот порівняно з розрахунковими дає підстави вважати, що причиною є ріст дефекту, і може слугувати індикатором зміни розміру дефекту на зовнішньому кільці.

1. Minervini, M., Frosini, L., Hasani, L., Albini, A. (2020) A multisensor induction motors diagnostics method for bearing cyclic fault. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2020, **1**, pp. 1259–1265. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9271000>
2. Smith, W.A., Randall, R.B. (2015) Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study. *Mech. Syst. Signal Process.*, **64–65**, 100–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.04.021>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПНВП-МОДЕЛЕЙ

**Хміль Р.І.<sup>1,2</sup>, Юзефович Р.М.<sup>1,2</sup>, Яворський І.М.<sup>1,3</sup>, Личак О.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів

<sup>3</sup>Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

При розробленні інформаційних технологій, які застосовуються для вирішення задач неруйнівного контролю, виділяють наступні етапи: відбір сигналів; їх попередня обробка та введення у комп'ютер; обробка сигналів із використанням алгоритмів, розроблених на основі прийнятої моделі сигналу; аналіз результатів обробки та їх параметризація; аналіз точності проведених обчислень і мінімізація похибок; обґрунтування вибору інформативних ознак, їх визначення; формулювання висновку про стан об'єкту. Головним серед цих етапів є другий, основою якого є обґрунтування відповідної математичної моделі сигналу, яка дає можливість описати характерні риси об'єкту, що необхідні для вирішення поставленої задачі неруйнівного контролю. Виходячи з вибраної моделі, розробляються методи аналізу експериментальних даних, алгоритми їх обробки, проводиться інтерпретація отриманих результатів, обґрунтовуються ті параметри обробки, які потрібні для досягнення допустимих похибок обчислень. Важливо правильно здійснити вибір інформативних ознак, які описують стан об'єкту, оскільки останні можуть мати різну чутливість до змін як параметрів самого об'єкту, так і дефектів, що в ньому виникають.

Методи статистики періодично нестаціонарних випадкових процесів (ПНВП) широко застосовуються для аналізу вібраційних сигналів з метою виявлення та встановлення типів дефектів обертових вузлів механізмів. ПНВП-модель вібрацій дає можливість описати як циклічну повторюваність вібрацій, так і їх стохастичність, а з використанням кореляційної функції спектральної густини, їх коефіцієнтів Фур'є кількісно охарактеризувати їх взаємодію. Специфічні особливості кореляційної і спектральної ПНВП-структури вібрацій, а також гармонічний склад детермінованої складової, яка описується майже періодичною функцією, відображають характерні риси як розподілених, так і локалізованих дефектів. Діагностичні ознаки, побудовані з використанням імовірнісних ПНВП-характеристик першого та другого порядків, дають можливість виявляти дефекти елементів механізмів на ранній стадії розвитку.

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ RENÈ 80 ТА ЖС6К

Черв'яков М., Яровицин О., Стрєжнєв Д., Волосатов І., Хрущов Г.

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

Виконано порівняльні дослідження короткочасних механічних властивостей (20, 900, 1000 °С) наплавленого металу нікелевих жароміцних сплавів ЖС6К та Renè 80 для структурного стану «as built» згідно з ISO/ASTM 52900 та після термічної обробки за режимом 1050 °С 2,5 год із використанням мініатюрних плоских пропорційних зразків. Зразки для оцінки механічних властивостей та металографічних досліджень вирізалися електроерозійною різкою вздовж напрямку наплавлення зі зварних заготовок «вертикальна стінка», підготованих багат шаровим мікроплазмовим порошковим наплавленням. Як присадний матеріал використовувався присадний порошок фракції 63...160 мкм, отриманий з використанням процесу Argon Gas Atomization. Параметри режиму багат шарового наплавлення наступні: середньоквадратичне (діюче) значення імпульсного зварювального струму  $I = 20...35$  А, напруга  $U = 22...23$  В, подача присадного порошку  $G_p = 3,5...5,0$  г/хв; швидкість наплавлення  $v = 0,8...1,5$  м/год, захисний газ — 90 % Ar + 10 % H<sub>2</sub>. Отриманий наплавлений метал ЖС6К та Renè 80 мав близькі значення вмісту кисню та азоту в діапазоні 0,004...0,006 ваг. %, визначені за методикою відновного плавлення в потоці газу-носія. Режим його наступної термічної обробки обрано з урахуванням необхідності збереження цілісності захисних покриттів та паяних з'єднань на реальних деталях авіаційних газотурбінних двигунів. На всіх стадіях (після завершення наплавлення, після виготовлення зразків, після термічної обробки) отриманий наплавлений метал проходив капілярний контроль.

Встановлено, що при близькому значенні границь плинності та міцності випробуваних зразків наплавлений метал Renè 80 при 20, 900 та 1000 °С у структурних станах «as built» і після термічної обробки за режимом 1050 °С 2,5 год відрізняється значно вищим рівнем критичної деформації руйнування порівняно з наплавленим металом ЖС6К (більш ніж у 3 рази), що свідчить про його кращу опірність до утворення гарячих тріщин за механізмом «solid-state cracking». Дослідження мікроструктури наплавленого металу після термічної обробки за режимом 1050 °С 2,5 год, виконані растровою електронною мікроскопією, дозволили співвіднести вищу деформаційну здатність наплавленого металу Renè 80 з меншою присутністю на типовій границі зерна карбідних фаз на основі хімічних елементів з високим атомним номером та меншою кількістю наявної зернограничної  $\gamma'$ -фази.

## ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ ВІДХОДІВ ВИСОКОРЕАКЦІЙНИХ І ПРЕЦИЗІЙНИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

**Шаповалов В.О., Протоковілов І.В., Порохонько В.Б., Петров Д.А.**

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

В ІЕЗ ім. Е.О. Патона розроблено спосіб електрошлакового переплаву (ЕШП) відходів прецизійних сплавів типу ковар, пермалой, пермендюр, сплавів на основі титану, нікелю, хрому та інших. Переплав здійснюється в електрошлаковій печі камерного типу в атмосфері інертного газу. Задля гомогенізації хімічного складу та структури металу зливка застосовується вплив на рідку металеву ванну зовнішнім магнітним полем. Витратні електроди отримують із використанням ТІГ зварювання або шляхом пресування в трубну обічайку.

Створено дослідно-промислову установку для ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів потужністю 720 кВт, яка дозволяє виплавляти зливки прямокутного перерізу та циліндричні діаметром до 260 мм. Установка передбачає переплав електродів в інертній атмосфері або в умовах вакууму, із живленням процесу змінним, постійним або імпульсним електричним струмом. Установка оснащена системою електромагнітного впливу постійним або імпульсним магнітним полем індукцією до 0,35 Тл. Апаратура керування разом з джерелом живлення та механізмом подавання витратного електрода дозволяють реалізовувати процес ЕШП з пошаровим формуванням зливка.

Розроблено технологічну схему та режими електрошлакового переплаву відходів прецизійних сплавів 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ із застосуванням імпульсного електромагнітного впливу на кристалізацію металу. Виплавлено дослідні та промислові партії злиwkів діаметром 80...140 мм, розроблено режими їх термомеханічної обробки, отримано напівфабрикати у вигляді прутків діаметром 38...45 мм. Встановлено, що одноразовий ЕШП з електромагнітним впливом дозволяє переробляти відходи прецизійних сплавів з отриманням металу, що за хімічним складом і структурою задовольняє вимогам нормативних документів.

Також розроблено технологічний процес переплаву відпрацьованих катодів із хрому у камерній печі ЕШП. Отримано дослідні зразки злиwkів хрому. Показано, що за хімічним складом метал злиwkів відповідає вимогам ДСТУ 5905–2004 «Хром металевий» — до хрому марки Х99Н1. При цьому метал злиwkів має щільну структуру і в ньому відсутні дефекти металургійного походження.

Проведено роботи з переплаву відходів титанових сплавів ВТ6 і ВТ22 та обрізи нікелю Н-1. Встановлено, що отримані зливки за хімічним складом та вмістом газів (О, Н, N) відповідають вимогам стандартів на данні матеріали.

## NEW CAPABILITIES OF CALCULATION METHODS FOR ANALYZING THE WELD METAL STRUCTURE ORIENTATION

Shtofel Olha<sup>1,2</sup>, Holovko Viktor<sup>1</sup>, Korolenko Danilo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv*

<sup>2</sup>*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*

Almost all of the most important metal quality indicators are determined by its microstructure. Various metallographic studies are used to analyze the microstructure, which require a lot of time and human resources and depend heavily on the employee qualifications. The microstructure components study determines such quality indicators as the non-metallic inclusion total content, the inclusion distribution density in the size range, the of grain boundaries (crystallites) total length, the dislocations density at grain boundaries, the ferrite grain density distribution with a shape coefficient, and the structural grain orientation angle density. This work aim is to analyze the structural components, such as grains (crystallites), misorientation angles distribution at the intergranular boundary. To determine the structural grains orientation angle, the EBSD (Electron back scatter diffraction) method is usually used. This method requires special software and cannot be implemented on optical and electron microscopes commonly used in domestic metallurgical laboratories. In addition, the EBSD method does not allow determining the grain misorientation angles at the intergranular boundary, which is an indicator that has a significant impact on the metal mechanical properties.

*Keywords: EBSD, structure, metal, grain, orientation, misorientation, computer analysis, welded joints*

Low-alloy steels are widely used in various industries due to the successful combination of such different characteristics as strength, ductility and toughness. The low-alloy steels use in the welded steel structures manufacture has revealed a significant problem: the increased welded joints susceptibility to brittle fracture, which is associated with the peculiarities of the welded metal structure formation. A large number of studies have been devoted to low-alloy steels weld metal microstructure descriptions, highlighting the structural composition and structural grains morphology role, nonmetallic inclusions and dislocation structure influence. One of the parameters that characterize the metal susceptibility to brittle fracture is the structural grains orientation. The microstructure metallographic images analysis shows that the ferrite plates orientation in the grain body can be heterogeneous and this should affect the crack initiation and development processes peculiarities in the metal [1].

Grain orientation quantitative assessment is an important indicator in solving many material science problems [1]. The ferrite grain orientation distribution is studied using the electron backscatter diffraction (EBSD) method in accordance with the ASTM E112-2012 and ISO 643-2015 [2] requirements. While ferrite grains in rolled low-alloy steels have a predominant orientation due to their manufacturing technology, ferrite grains in weld metal have a stochastic orientation. This weld metal microstructure formation nature significantly complicates the determination the ferrite orientation in secondary structure grains body. Particular attention is paid to determining the misorientation level at the interface between adjacent grains, which affects the metal materials properties. The requirements for the objective analysis methods development make it important to create technologies that would automate metallographic analysis methods, including the material grains orientation. This has necessitated the new technologies development and the known technologies adaptation to solve the tasks at hand.

As an alternative to the EBSD method, a technique based on the Hough transformations [3, 4] is used to analyze the ferrite plates distribution in the grain body, where each object in the image is described by two parameters —  $\rho$  and  $\theta$  ( $\rho$  is the distance from the origin to the line, and  $\theta$  is the angle between the line perpendicular to the given line and the positive direction of the abscissa axis). However, this approach, taking into account the ferrite plates density in the structural components grains, requires processing and analyzing a large information amount. Modern computer analysis methods can solve this problem [5].

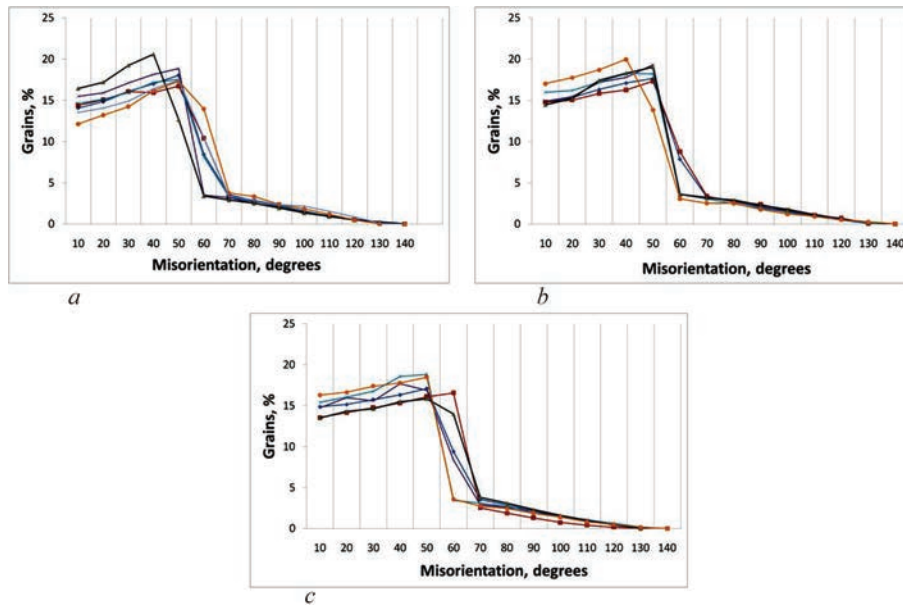
The study was carried out on weld metal samples made according to the method [6] during arc welding in a shielding gas environment (82 % Ar, 18 % CO<sub>2</sub>) with a 1.6 mm diameter flux-cored wire of the «metalcore» type at a 520–560 A constant current, at an 30–36 V arc voltage at a 14 m/h or 43 m/h constant welding speed. In order to form weld metal with a changed (within a certain range) structural components content, a flux-cored wire with a 1.6 mm diameter was introduced into the «cold» part of the weld pool, with the core contained a mixture of 10 % refractory compounds particles with a size 0.040–0.200 mm (inoculants) and 90 % iron powder grade according to DSTU 9849. Refractory particles were used as inoculants: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MgO, ZrO<sub>2</sub>, TiC, SiC. The results obtained

were compared with the data of weld metal samples (Base) obtained by flux-cored wire welding without the inoculants introduction.

Metallographic studies were performed on cross-sections cut from welded joints. The weld metal structure was studied using a Neophot 32 optical microscope. The structural components content in the weld metal was determined according to the ISO 9042 method. The weld metal mechanical properties were evaluated based on the standard tests results in accordance with the DSTU ISO 6892-1:2019, DSTU EN 10045-1:2006, and DSTU ISO 15792-1:2009 requirements. Photographs (optical images) of the structure and inclusions were studied using computer analysis based on a self-written Python program was used to determine the grains (crystallites) misorientation.

Research object is 09G2S steel, analog 13Mn6, 9MnSi5 (Germany). Samples were cut out to study structural component, hardness, stress corrosion cracking, extension properties.

The sample results structural components study, the grain (crystallite) misorientation analysis was performed and the corresponding diagrams for samples under different conditions were obtained (Fig. 1).



**Fig. 1.** Misorientation in mode: *a* — 520 A, 35 V, 14 m/h; *b* — 540 A, 30 V, 43 m/h; *c* — 560 A, 36 V, 43 m/h

**Conclusions.** There is a real opportunity to increase the results objectivity and reduce the time required to perform grain orientation metallographic studies using computer structure analysis, analyze the misorientation angles size distribution between grains/crystals, and identify critical locations for possible fracture initiation. Histograms of orientation differences clearly show the welding mode effect on the change in the misoriented grains number.

However, one of the most important key points in the correct search for misorientation is the sample preparation and the corresponding the metal microstructure images for the structure study [7].

1. Koko, A., Tong, V., Wilkinson, A.J., Marrow, T.J. (2023) An iterative method for reference pattern selection in high-resolution electron back scatter diffraction (HR-EBSD). *Ultramicroscopy*, **248**, 113705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113705>
2. ISO. Electronic resource. <https://cdn.standards.iteh.ai>
3. Atiqzaman, M. (1992) Multiresolution Hough transform — inefficient method of detecting patterns in images. *IEEE Transact. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14**(11), 1090–1095.
4. Zhuravel, I.M., Maksymovych, V.M. (2018) Quantitative analysis of orientation and elongation of grains on metallographic images using Hough transformations. *Scientific Bulletin of UNFU*, **28**(5), 135–138. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280528>
5. Holovko, V., Stofel, O., Korolenko, D. (2025) Fractal analysis method of structural components orientation. *International J. of Recent Innovations in Academic Research*, **9**(2), 130–138. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15266778>
6. Holovko, V.V., Yermolenko, D.Yu., Stepanyuk, S.M., Zhukov, V.V., Kostin, V.A. (2020) Influence of introduction of refractory particles into welding pool on structure and properties of weld metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 8–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.08.01>
7. Shtofel, O.O., Holovko, V.V., Korolenko, D.Yu. (2025) *Orientation of crystallites and grains on the weld surface depending on the image quality*. Organization of scientific research in modern conditions 2025, usc30-00, Seattle, Washington, USA, pp. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.30888/2709-2267.2025-30-00-011>

## ANALYSIS OF A DEFECTIVE STRUCTURE USING A FRACTAL PARAMETER

**Shtofel Olha<sup>1,2</sup>, Rabkina Mariana<sup>1</sup>, Chyzhska Tetiana<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv*

<sup>2</sup>*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*

This paper describes the method of fractal analysis and the invariance of fractal dimension at different magnifications of the sample. The method of fractal analysis has proven itself as one of the possible approaches to studying the structure of metal. This method is applied to the photograph of the structure, and this paper also describes the application of the method of fractal analysis to the defect. The results obtained were analyzed and the fractal dimensions for the structure and for the crack were compared. It was found that at magnifications greater than 40  $\mu\text{m}$ , the fractal dimension is invariant.

*Keywords: fractal dimension, invariant, metallography, analysis, steel cylinder*

The problem of choosing the optimal method for assessing the technical condition of a structure by predicting its remaining service life remains relevant. At the same time, various diagnostic methods are used to extract information about the structural and operational characteristics, including the physical and mechanical properties of the material, and, above all, information about defects. Most of these methods are quite laborious, time-consuming, and expensive. Moreover, non-destructive methods of analysis and control of structures are not universal [1–3].

Therefore, we propose a method of fractal analysis of materials, which is more universal and less labor-intensive.

This paper describes the application of the fractal analysis method [4] to an external defect, more specifically to a crack in a 35G (Equivalents: foreign brands such as European 1.0501, C35E, American 1035, Japanese S35, etc.) steel cylinder. For comparison, the fractal analysis method was also applied to the metal structure itself. The purpose of this work was to analyze the extent to which the fractal analysis method is invariant for external defects, in comparison with the data obtained for the metal structure.

Thus, the following tasks were set:

1. Analyze the data obtained by the fractal analysis method for a crack in a 35G steel cylinder;
2. To analyze the data obtained by the fractal analysis method for the metal structure of the cylinder.

**Table 1.** Results of spectral analysis of cylinder metal

Cylinder	Mass fraction in percent						
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
35G GOST 4543–71	0.32–0.53	0.7–1.0	0.17–0.37	<0.035	<0.035	<0.30	<0.30
35G	0.36	0.85	0.32	0.025	0.017	0.073	0.027

**Table 2.** Physical and mechanical properties of a cylinder made of 35G steel

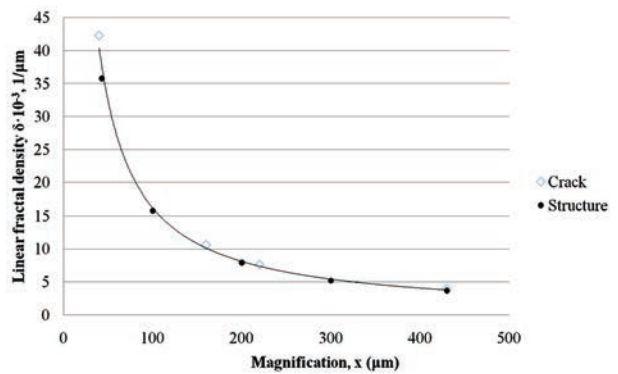
Breaking pressure $P$ , MPa, 20 °C	Yield strength $\sigma_{0.2}$ , MPa	Strength limit $\sigma_B$ , MPa
43.84	386	703

**Table 3.** Fractal dimensions of cracks at different magnifications

Magnification, $x$ $\mu\text{m}$	40	43	100	160	200	220	300	430	$S_{<D>}$ , %	
Fractal dimension, $D$	Crack	1.693	–	–	1.705	–	1.677	–	1.695	0.58
	Structure	–	1.538	1.579	–	1.589	–	1.564	1.583	0.91
Linear fractal density $\delta \cdot 10^{-3}$ , $1/\mu\text{m}$	42.325	35.767	15.79	10.656	7.945	7.623	5.213	3.942 3.681	–	



**Fig. 1.** Photo of a 40-liter oxygen cylinder made of 35G steel after hydrostatic testing with defect on the cylinder and crack viewed from above — from the outer surface of the cylinder



**Fig. 2.** Graph showing the relationship between magnification and linear fractal density

A 40-liter oxygen cylinder made of 35G steel (Table 1) (DSTU 7809:2015) [5] was studied. After destruction, samples cut from this cylinder were studied using fractal analysis, and the physical and mechanical characteristics of this cylinder were obtained (Table 2). Fig. 1 shows the cylinder under study after hydrostatic testing, as well as the location of the crack.

Using software support [6], which calculates fractal dimension using the Minkowski method [7], fractal dimen-

sions were calculated at different magnifications (Table 3).

The Table 3 shows that for cracks and structures, the fractal parameter lies within certain limits of the mean square error of 0.6 % and 0.9 %, respectively. In order to find the relationship, we introduce the linear fractal density, which we calculate based on the ratio of the fractal parameter to the magnification (parameter  $\delta$  in the Table). The graph (Fig. 2) shows that the points lie on a power-type dependence.

**Conclusion.** The space that a structure occupies can be described by its structural components (in this case, it is a crack). It is possible to compare linear fractal density with breaking pressure, but this requires further research.

- Novodranov, A.S. (2024). Methods for recognizing surface defects on thin-sheet materials for automation of visual control (Review). *Tekhnichna Diahnostyka i Neruinnyvnyi Kontrol*, **2**, 25–33 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.02.04>
- Nedosieka, S.A., Nedosiieka, A.Ya., Yaremenko, M.A., Ovsiienko, M.A., Hurianov, O.M. (2023) Use of the acoustic emission method for assessing changes in the properties of 17G1S steel after long-term operation. *Tekhnichna Diahnostyka i Neruinnyvnyi Kontrol*, **3**, 26–30 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.03.05>
- Usov, V., Rabkina, M., Shkatulyak, N., Savchuk, E., Shtofel, O. (2020) Anisotropy of fractal dimensions of fractures and loading curves of steel samples during impact bending. *Iranian J. of Materials Sci. and Eng.*, **17(3)**, 11–20. DOI: <https://doi.org/10.22068/ijmse.17.4.142>
- Shtofel, O., Holovko, V., Chyzhska, T. (2021). Fractal and metallographic analyses as an innovation in ensuring the quality of metal products. In: *Innovative «Approaches to Ensuring the Quality of Education, Scientific Research and Technological Processes»*, pp. 1013–1018). Publishing House of University of Technology [in Ukrainian].
- (2015) DSTU 7809:2015: *Rolled steel, calibrated with special surface treatment of carbon quality structural steel. General technical conditions*. State Standard of Ukraine [in Ukrainian]. [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=64320](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64320)
- Shtofel, O.O. (2021) *Improvement of the fractal analysis method for assessing the relationship between the structure and properties of structural steels*. Qualification scientific work on the rights of a manuscript, dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» [in Ukrainian]. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/39936>
- Wu, J., Jin, X., Mi, S., Tang, J. (2020) An effective method to compute the box-counting dimension based on the mathematical definition and intervals. *Results in Engineering*, **6**, 100106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100106>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ГЕОМЕТРІЮ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТОНКОЛИСТОВИХ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ

**Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Соколовський М.В., Фролов М.О.,  
Гринь А.П., Бондарєва С.В., Курило В.А., Бернацький А.В.**  
*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

Лазерне зварювання є одним із найперспективніших методів з'єднання металів, що поєднує високу точність, мінімальні термічні деформації та можливість автоматизації процесу. Завдяки високій щільності енергії лазерного променя технологія забезпечує глибоке проплавлення при вузькій зоні термічного впливу. Водночас особливості теплових процесів при лазерному зварюванні, такі як інтенсивний нагрів і швидке охолодження металу, істотно впливають на формування структури та властивостей зварного з'єднання. Тому вибір оптимальних режимів має вирішальне значення для запобігання дефектам і забезпечення високої якості зварного з'єднання. Під час дослідження впливу параметрів лазерного зварювання на геометрію зварних з'єднань було виконано провари в корозійностійкій високолегованій сталі AISI 304 завтовшки 1,5 мм. Для цього сплановано матрицю повнофакторного експерименту за моделлю простого поліному. Незалежними змінними було обрано: потужність лазерного випромінювання ( $P$ ), швидкість зварювання ( $V$ ), величину розфокусування лазерного випромінювання ( $\Delta F$ ). На основі повнофакторного експерименту побудовано регресійні моделі, що описують зміну площі та ширини провару залежно від зміни параметрів процесу. Аналіз результатів показав, що основними факторами, які визначають геометрію з'єднання, є потужність лазерного випромінювання та швидкість зварювання. Збільшення потужності сприяє зростанню площі провару, тоді як підвищення швидкості зменшує її. При високих потужностях лазерного випромінювання процес стає стабільнішим, а геометрія провару менш чутливою до коливань параметрів. Розфокусування чинить незначний вплив, лише дещо збільшуючи ширину провару. Найбільш вираженою виявилася взаємодія потужності лазерного випромінювання та швидкості зварювання, яка визначає максимальні значення площі провару. Розроблені регресійні рівняння з відхиленням менше 10 % підтвердили адекватність моделі для прогнозування геометрії зварного з'єднання. За результатами досліджень геометрії проварів обрано три режими, на яких були зварені стикові з'єднання сталі AISI 304 завтовшки 1,5 мм. Обрані режими мають однакову погонну енергію 60 Дж/мм та розфокусування лазерного випромінювання 0 мм. Вони забезпечують якісні зварні з'єднання з точки зору геометрії, якості газового захисту, відсутності дефектів і відповідають найвищому рівню «В» за EN ISO 13919-1:2019.

## ФОРМУВАННЯ ПЕРВИННОГО ШАРУ СТАЛЕВОГО ПОРОШКУ В ТЕХНОЛОГІЇ TIG-PBF ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Горбенко А.С., Перепічай А.О.

*Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ*

Розвиток адитивних технологій металевого 3D-друку упродовж останнього десятиліття суттєво розширив можливості створення конструкцій зі складною внутрішньою геометрією. Високі вимоги сучасного машинобудування, авіакосмічної та оборонної галузей стимулюють пошук технологій, здатних забезпечувати не лише точність та повторюваність, а й економічну ефективність виробничих процесів. У цьому контексті традиційні Powder Bed Fusion методи на основі лазерних або електронно-променевих джерел демонструють високу якість, однак характеризуються істотними недоліками — висока вартість обладнання, обмежена продуктивність (до 100...300 г/год) та складність експлуатації. Це актуалізує необхідність розвитку альтернативних підходів, орієнтованих на зниження вартості та підвищення технологічної гнучкості.

Одним із перспективних напрямів є застосування дугових процесів у конфігурації Powder Bed Fusion. Технологія TIG-PBF передбачає локальне проплавлення попередньо нанесеного металевого порошку за допомогою дуги TIG без подачі присадного матеріалу. На відміну від традиційного наплавлення, процес зосереджується на повторюваному формуванні тонких шарів порошку, що дозволяє розглядати його як компонент адитивного виробництва. Завдяки низькій вартості обладнання, високій доступності TIG-джерел та відсутності необхідності у складних системах подачі порошку, метод має потенціал стати основою для гібридних виробничих систем, що поєднують адитивне нарощування та механічну обробку.

Метою проведеної роботи було експериментальне дослідження можливості формування стабільного первинного шару сталевих порошків (середній діаметр частинок  $\approx 300$  мкм), нанесеного сухим способом на підкладку зі сталі Ст3. Дослідження мало на меті визначити оптимальні режими проплавлення, оцінити вплив технологічних параметрів на геометрію та структуру валика, встановити повторюваність процесу та сформувані базу даних параметрів для подальших багатошарових експериментів.

Експерименти виконували на джерелі Fronius MagicWave 2200, застосовуючи вольфрамовий електрод діаметром 2,4 мм та аргон із чистотою 99,999 %. Залізний порошок перед нанесенням просіювали та термічно дегідратували при 120 °C для мінімізації вологовмісту. Варіювали силу струму (60...120 А), напругу дуги (14...32 В), швидкість руху пальника (60...480 мм/хв), зазор між електродом та порошковим шаром (2...8 мм), а також витрату захисного газу.

Отримані результати показали, що процес TIG-PBF має чітко виражену чутливість до параметрів. За малих швидкостей руху пальника спостерігалось надмірне оплавлення порошку та формування нерівномірних валиків. За надмірно високих швидкостей — неповне проплавлення та недостатня адгезія шару до підкладки. Найбільш стабільним є режим 120 А, 30,5 В, 455 мм/хв, зазору 4 мм і витрати аргону 6,5 л/хв. У цих умовах формувалась рівномірний валик завширшки 7...9 мм та заввишки 2–3 мм при глибині проплавлення до 1,5 мм.

Макрошліфи підтвердили відсутність тріщин та непроварів, що вказує на стабільність дуги та характер взаємодії порошку з підкладкою. На мікрорівні зафіксовано лише одиничні мікропори, характерні для процесів дугового наплавлення. Виміряна мікротвердість становила 90...110 HV — типове значення для низьковуглецевих сталей після TIG-наплавлення, що підтверджує коректність теплового циклу. Оцінка повторюваності показала коефіцієнт варіації ширини валика 1,10 %, а висоти та глибини — менше 2 %, що свідчить про високу стабільність процесу.

Подальші дослідження будуть зосереджені на формуванні багатошарових структур, детальному аналізі мікроструктурних змін при повторних переплавленнях, дослідженні впливу фракцій порошку, а також вивченні механічних властивостей сформованих елементів. Важливим напрямом є також моделювання теплових циклів та прогнозування властивостей матеріалу, що дозволить оптимізувати режими TIG-PBF для промислового застосування.

# ЛІКУВАННЯ ВИРАЗКОВИХ ГАСТРОДУОДЕНАЛЬНИХ КРОВОТЕЧ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОЧАСТОТНОГО БІОЛОГІЧНОГО ЗВАРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕКТРО-ГІДРОЕЛЕКТРОЛІГУВАННЯ

**Опарін С.О.**

*Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика*

## Актуальність

- Частота ГШКК — 50 – 140 випадків на 100 000 населення в рік.
- Від 6 % до 10 % становить загальна летальність.
- До 8,7 % — летальність в центрах шлунково-кишкових кровотеч.
- Від 10 % до 25 % — п/о летальність.
- Від 15 % до 50 % — летальність при важких виразкових гастродуоденальних кровотечах.
- Від 30 % до 70 % — летальність при рецидиві кровотечі.

Ендоскопічний гемостаз дозволяє знизити як загальну так і післяопераційну летальність в 3–4 рази!!!

## Пошук іноваційного способу ендоскопічного гемостазу

- Прогноз рецидиву кровотечі тісно пов'язаний з використанням способу ендоскопічного гемостазу.
- Аналіз причин несприятливих результатів лікування хворих з виразковими гастродуоденальними кровотечами показує, що одним з напрямків бажаного результату є досконалість методів ендоскопічного гемостазу та профілактики рецидивів кровотечі.
- Розробка сучасних, іноваційних, ефективних заходів ендоскопічного гемостазу є актуальною, оскільки з широким впровадженням лікувальної ендоскопії в клінічну практику дає можливість істотно поліпшити показники хірургічного лікування пацієнтів з виразковими гастродуоденальними кровотечами.

## Клінічне дослідження

- 160 пацієнтів з виразковими гастродуоденальними кровотечами. Вік пацієнтів 40–85 років. Чоловіків — 110 і жінок — 50.
- Основна група: 80 пацієнтів, яким виконувалось ендоскопічне високочастотне біологічне зварювальне електролігування за розробленою методикою, на який отримано патент України на винахід № 121365 UA.
- Група порівняння: 80 пацієнтів, яким використовувалась монополярна термічна аргоноплазмова коагуляція.

## Характеристика способу ендоскопічного високочастотного біологічного зварювального електролігування

1 — SEI з електродом в формі еліпса (випуклий) діаметром 2,2 мм — патент на корисну модель № 115147 UA.

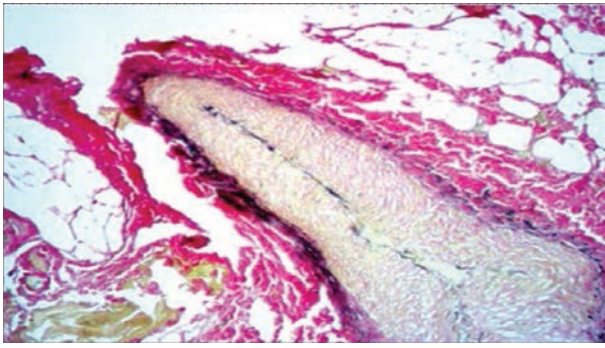
2 — SEI з увігнутих електродом, для збільшення зіткнення електрода з судиною, яка кровоточить діаметром 2,5 мм для відеогастроскопа та 3,2 мм для відеодуоденоскопа — патент України на корисну модель № 137508 UA.

3 — SEI з випуклим електродом (в формі еліпса) і з каналом для води діаметром 2,5 мм для високочастотного біологічного зварювального гідроелектролігування — патент на корисну модель № 146869 UA.

4 — Пристрій для ендоскопічного високочастотного біологічного зварювального електролігування складається з генератору струму — багатофункціональ-



SEI з випуклим електродом (в формі еліпса) і з каналом для води діаметром 2,5 мм для високочастотного біологічного зварювального гідроелектролігування — патент на корисну модель № 146869 UA

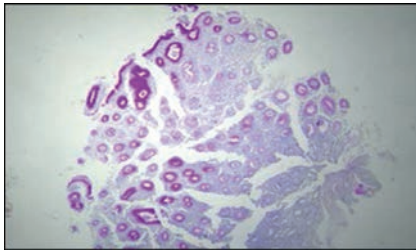


Фрагмент артерії діаметром 2 мм: тотальна облітерація простору артерії, внутрішня еластична мембрана дезорганізована, еластичні волокна адвентиції не визначаються, зовнішня еластична мембрана розшарована

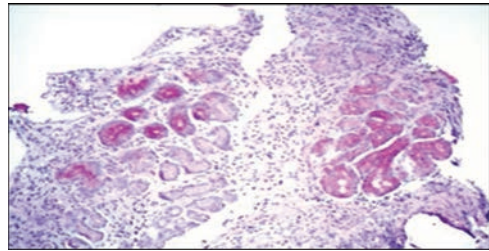
ного апарату для електрозварювання ЕКВ3-300 «Патонмед».

Морфологічна верифікація ефективності високочастотного біологічного зварювального електролігування судин, які кровоточать, діаметром від 1 до 5 мм була підтверджена експериментально. Встановлено, що після заварювання судини настає її тотальна облітерація за рахунок заварювання ендотелію інтими судини, дезорганізації внутрішньої еластичної мембрани, розшаруванні зовнішньої мембрани, що охоплює адвентицію судини, а потім денатурацією білкових елементів судинної стінки. Слизова оболонка кишки навколо зони заварювання судин не піддається дії високих температур, завдяки цьому досягається менший відсоток ускладнень.

### Результат клініко-морфологічного дослідження впливу процесу заварювання на регенераторні властивості виразки під час лікування пацієнтів з виразковою хворобою



**Перша група.** П'ята доба лікувального процесу без використання зварювальних технологій. Фрагмент слизової шлунку з ознаками регенерації залоз, секретія слизу в частині залоз відсутня та/або знижена, в частині залоз секретія слизу збережена. PAS-реакція



**Друга група.** П'ята доба лікувального процесу, друга група пацієнтів з використанням зварювальних технологій. В регенераторних залозах в слизовій шлунку різного ступеня вираженості секретія слизу

### Клінічне спостереження



Пацієнтка І. 1940 р.н.  
І.х. № 117128/102231/471  
після первинного гемостазу F1a АПК з переходом F1a



Пацієнтка І. 1940 р.н.  
І.х. № 117128/102231/471  
під час моніторингово обстеження,  
на якому виявлено РРК F1a

### Результати клінічних досліджень

Методика ендоскопічного гемостазу виразкових гастродуоденальних кровотеч з використанням високочастотного біологічного зварювального електролігування (ВБЗЕЛ) виконувалась на апараті ЕКВ3-300 «Патонмед» в режимі "автоматичного заварювання" — 5 підтип.

В першій (основній) групі пацієнтів з виразковими гастродуоденальними кровотечами, яким проводився ендоскопічний гемостаз з використанням високочастотного біологічного зварювального електролігування, первинний гемостаз досягнуто у 77 (96,25 %) пацієнтів. В цій досліджуваній групі після ендоскопічного гемостазу на першу добу виник рецидив кровотечі у 3 (3,75 %) пацієнтів.

В другій (порівняння) групі з виразковими гастродуоденальними кровотечами, яким проводився ендоскопічний гемостаз з використанням монополярної термічної аргоноплазмової коагуляції первинний гемостаз досягнуто у 66 (82,5 %) пацієнтів. В цій досліджуваній групі порівняння рецидив виник у 14 (17,5 %) пацієнтів.

Більш висока ефективність ендоскопічного гемостазу у пацієнтів досягнута за рахунок контакту спеціального ендоскопічного інструменту (СЕІ) — зонду з діаметром 2,5 мм та 3,2 мм, з випуклим електродом (сплав Cu + Mo) з судиною та процесом заварювання судини шляхом імпедансної дії модульованого сигналу високочастотного струму та завдяки адаптивній системі автоматичного управління.

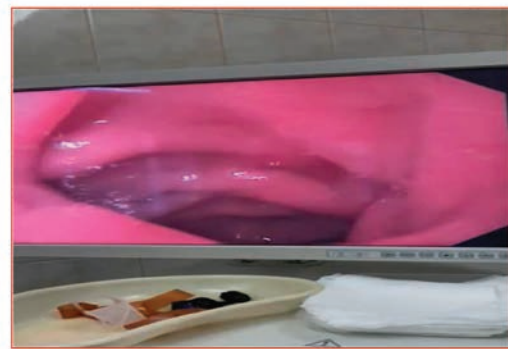
### Висновки

1. Вперше на підставі даних експериментальних, морфологічних та клінічних досліджень, завдяки СЕІ оригінальної конструкції, нами запропонован науково обґрунтований та розроблений альтернативний метод ендоскопічного гемостазу — високочастотне біологічне зварювальне електролігування для лікування виразкових гастродуоденальних кровотеч із судин діаметром 1,0 мм і більше.
2. Ендоскопічне високочастотне біологічне зварювальне електролігування відбувається у вигляді послідовних структурних змін в судині, яка кровоточить впродовж чотирьох фаз (спазм, оклюзія, заварювання та карбонізація), які супроводжуються динамікою електричних параметрів заварювання.
3. При проведенні комплексного патоморфологічного дослідження доведено, що зварювальні технології, які застосовуються при ендоскопічному гемостазі при виразкових гастродуоденальних кровотечах не впливають на регенераторні функції уражених ділянок під час лікування, а місцями покращують регенераторні властивості тканини.
4. Враховуючи результати експериментально-морфологічного дослідження, недоліки вже існуючих методів зупинки кровотеч, більш ефективно наступає гемостаз при використанні високочастотного біологічного зварювального електролігування при кровотечах із судин діаметром 1–4 мм без пошкодження сусідніх судин або анатомічних утворень.
5. Використання високочастотного біологічного зварювального електролігування для ендоскопічного гемостазу при виразкових гастродуоденальних кровотечах забезпечує надійний остаточний гемостаз у порівнянні з використанням монополярної термічної аргоноплазмової коагуляції, у 96,5 % проти 82,5 %. Зменшує частоту рецидивів кровотечі до 3,5 % проти 17,5 %, а також кількість хірургічних втручань на висоті кровотеч при рецидивах з 3,5 % проти 8,75 %.
6. Впровадження та використання на практиці лікарями-ендоскопістами високочастотного зварювального електро-, гідроелектролігування доповнює вже існуючі методи ендоскопічного гемостазу при виразкових гастродуоденальних кровотечах.

### Клінічне спостереження



Пацієнтка І. 1940 р.н.  
І.х. № 117128/102231/471  
після використання комбінованого гемостазу  
(ін'єкційний: адреналін 1:5000 +  
ендоскопічне високочастотного біологічного  
зварювального електролігування)



Пацієнтка І. 1940 р.н.  
І.х. № 117128/102231/471  
через три тижні на контрольній ВЕГДС

## ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРУ РУХУ РІДКОГО ТИТАНУ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ПЛАВЛЕННІ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Березос В.О., Ахонін Д.С.

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

З метою визначення характеру руху рідкого титану при електронно-променевому плавленні зливка були побудовані дві стаціонарні тривимірні математичні моделі тепло- та масо- переносу в зливку з урахуванням гідродинамічних течій в наближенні турбулентного та ламінарного руху розплаву.

Теплові процеси розраховувались згідно рівняння теплопровідності, а гідродинамічні процеси описувались рівняннями Нав'є–Стокса та рівнянням нерозривності. Для визначення значення коефіцієнта турбулентної динамічної в'язкості  $\mu_t$  використовували стандартну  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності. При розрахунку ламінарного руху значення турбулентної динамічної в'язкості  $\mu_t$  та коефіцієнту турбулентної теплопровідності приймали рівними нулю.

Область розрахунку, враховуючи наявність площини симетрії, складала половину зливку. Для рівнянь теплопровідності граничними умовами в моделі враховували: випаровування і випромінювання з дзеркала ванни металу; тепловіддачу в кристалізатор; випромінювання з поверхні зливка; та теплопровідності зливка на нижній межі розрахункової області. Для рівняння Нав'є–Стокса та нерозривності граничні умови в моделі формулювали в припущенні наявності ковзання на стінках кристалізатора.

Залежність об'ємної частки рідкого металу  $F_{L-S}$  в перехідній зоні від температури була описана згладженою функцією з використанням математичної функції «erf», що забезпечило неперервність як самих функцій так і їх похідних.

Для побудови математичної моделі використовували апроксимаційні залежності теплофізичних параметрів титанового сплаву Ti–6Al–4V від температури, з урахування того що теплофізичні параметри різних титанових сплавів є близькими. Для збільшення точності розрахунків в роботі було обчислено питому теплоємність для сплаву Ti–6Al–7Nb використовуючи правило Неймана–Коппа щодо адитивності теплоємності сплавів.

При розрахунках тривимірної математичної моделі використовували чисельний метод скінченних елементів програмного комплексу COMSOL Multiphysics.

Результати моделювання представлені у вигляді векторів швидкості потоків рідкого металу, розмір яких пропорційний швидкості переміщення розплаву. Аналіз результатів розрахунків за двома математичними моделями для турбулентного та ламінарного руху показав, що для турбулентного руху видно що потоки розплавленого металу розповсюджуються від місця його заливання, утворюючи декілька вихорів, а ламінарний рух характеризується значно меншою кількістю вихорів.

За результатами розрахунків за математичними моделями було встановлено, що в припущенні турбулентного характеру руху розплаву його швидкість в кристалізаторі не перевищує 7 мм/с, тоді як в припущенні ламінарного характеру руху розплаву його швидкість не перевищує 3 мм/с.

Для визначення характеру руху розплаву титанового сплаву було розраховано число Рейнольдса. Для моделі турбулентного руху воно дорівнює 133, що відповідає глибоко ламінарному руху. Тобто припущення про турбулентний характер руху було помилкове. Для моделі ламінарного руху розраховане числа Рейнольдса дорівнює 83, що підтверджує ламінарний характер руху.

Таким чином, шляхом чисельного моделювання за розробленими тривимірними математичними моделями процесів тепло- та масопереносу під час електронно-променевого плавлення титанових сплавів було доведено, що рух розплавленого титану в кристалізаторі має ламінарний характер, а швидкість течії розплаву не перевищує 3 мм/с.